

DIGITAALINEN TAISTELUKENTTÄ

- informaatioajan sotakoneen tekniikka -

Jyri Kosola, Tero Solante



kolmas uusittu laitos

***Maanpuolustuskorkeakoulu
Sotatekniikan laitos***

***Julkaisusarja 1
No 35***

Digitaalinen taisteluentä

informaatioajan sotakoneen tekniikka

Jyri Kosola, Tero Solante

Maanpuolustuskorkeakoulu
Sotatekniikan laitos

Julkaisusarja 1

No 35



Tekstiä, kuvia tai piirroksia lainattaessa lähde on mainittava.

Kannen kuva: Jyri Kosola

Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotatekniikan Laitos

ISSN 1796-4059

ISBN 978-951-25-2503-4 (PDF)

Kolmas laitos

Helsinki

2013

ESIPUHE

Digitaalinen taistelukenttä – informaatioajan sotakoneen tekniikka on tarkoitettu kaikille niille, jotka haluavat ymmärtää nykyaikaisen digitaalelektroniikkaan perustuvan sotakoneen toimintaa ja rakennetta. Digitaalinen taistelukenttä muodostuu fyysisesti hajautetuista tietojärjestelmistä, tiedustelu-, valvonta-, johtamis- ja asejärjestelmälustoista ja yksittäisistä taistelijoiden järjestelmistä, reaaliaikaisesta alustakohtaisesta tiedonvälitysjärjestelmästä, lähes reaaliaikaisesta tietoliikennealustasta sekä näiden muodostaman verkon avulla luodusta tilannetietoisuudesta ja taistelutilan hallinnasta.

Aihepiirin laajuuden ja käytettävissä olevan sivumäärän rajallisuuden vuoksi kirjassa on pyritty keskittymään järjestelmäkokonaisuuden ymmärtämisen ja suorituskyvyn arvioimisen kannalta olennaisiin asioihin. Kirjassa tarkastellaan nykyisen ja tulevaisuuden taistelukentän järjestelmiä painopisteen ollessa sähkömagneettisessa spektrissä, erityisesti siinä **miten sähkömagneettista spektriä voidaan hyödyntää taistelussa, miten sen kautta voidaan hyökätä vihollisen järjestelmiä ja toimintaa vastaan ja miten vihollisen käyttämiltä sähkömagneettista spektriä hyödyntäviltä järjestelmiltä voidaan suojautua.**

Kirjassa on pyritty korostamaan järjestelmätason näkökohtaa. Kirjan tavoitteena on se, että lukija ymmärtää eri järjestelmien ja tekniikoiden toimintaperiaatteen sekä olennaiset suorituskykyyn vaikuttavat fysikaaliset vuorovaikutussuhteet.

Järjestelmien suunnittelussa ja analysoinnissa on olennaista kyetä näkemään järjestelmän toiminnan kannalta keskeiset suorituskykyyn vaikuttavat vaatimukset sekä muodostamaan käsitys niiden realistisuudesta ja vaikutuksesta kokonaiskustannuksiin. Arvioitaessa järjestelmän suorituskykyä on kyettävä muodostamaan matemaattinen näkemys järjestelmän toiminnasta; mikä on sen suurin teoreettinen suorituskyky, mihin nykytekniikalla korkeintaan päästään, mikä on järjestelmäkokonaisuuden suorituskyvyn heikoin lenkki, miten vihollinen pyrkii heikentämään järjestelmän suorituskykyä ja mikä on todennäköinen käyttöön otetun järjestelmäkokonaisuuden suorituskyky. Järjestelmätekniikassa matematiikka on vain työkalu, ei itsetarkoitus. Tämän mukaisesti emme ole katsoneet tarpeelliseksi johtaa kaavoja tai erikseen todistaa niitä oikeiksi. Olemme pyrkineet valitsemaan sellaisia kaavoja, jotka ovat matemaattisesti niin yksinkertaisia, että niitä voidaan käyttää yksinkertaisella laskukoneella. Approksimoivien kaavojen käyttö järjestelmätasolla yleissuunnittelussa on sitäkin perustelumpaa, kun otetaan huomioon ne monet epävarmuudet ja lähtöarvojen epätarkkuudet, jotka vaikuttavat järjestelmän toiminnan arvioimiseen. Yksityiskohtaisessa analysoinnissa ja toteutuksen suunnittelussa on luonnollisestikin käytettävä tarkempia menetelmiä.

Kolmas painos sisältää joitakin tarkistuksia toiseen painokseen. Kolmannen painoksen laadinnassa on pyritty lisäämään teoksen luettavuutta toisaalta lisäämällä kuvia ja esimerkkejä ja toisaalta karsimalla sellaisten alueiden käsittelyä, joita ei ole käytetty opetuskäytössä tai joiden osalta tekninen kehitys on ajanut ohitse.

Helsingissä 20.12.2013

Jyri Kosola ja Tero Solante

Sisällysluettelo

ESIPUHE	3
JOHDANTO	7
SODAN KUVAN KEHITYS	7
<i>Teollisen yhteiskunnan sota</i>	7
<i>Tietoyhteiskunnan sodankäynnin piirteet</i>	8
<i>Taistelun elementit</i>	10
SODANKÄYNNIN OSA-ALUEET	13
<i>Käsittehierarkia</i>	13
<i>Informaatioidankäynti</i>	14
<i>Johtamissodankäynti</i>	17
<i>Informaatioylivoima</i>	17
ELEKTRONINEN SODANKÄYNTI	19
<i>Signaalitiedustelu</i>	21
<i>Elektroninen tuki</i>	21
<i>Elektroninen vaikuttaminen</i>	23
<i>Elektroninen suojautuminen</i>	24
<i>Sähkömagneettisen spektrin kokonaishallinta</i>	26
DIGITAALINEN TAISTELUKENTÄ	27
<i>Digitaalisen taistelukentän rakenneosat</i>	28
<i>Järjestelmien järjestelmä</i>	28
<i>Järjestelmien vaatimukset</i>	30
<i>Avaintekijänä järjestelmäintegraatio</i>	32
SOTILASJÄRJESTELMÄN TEHOKKUUS.....	33
<i>Suorituskyky</i>	33
<i>Käytettävyys</i>	34
<i>Riippuvuus</i>	35
<i>Kustannusvaikutus</i>	36
JÄRJESTELMÄN SELVIYTYMISKYKY	37
SÄHKÖMAGNEETTINEN SPEKTRI	39
JOHDANTO	39
SÄHKÖMAGNEETTINEN SÄTEILY	40
SÄHKÖMAGNEETTISEN SÄTEILYN TEORIAA	41
<i>Sähkö- ja magneettikentät</i>	41
<i>Aallonpituus ja taajuus</i>	42
<i>Polarisaatio</i>	43
<i>Lähi- ja kaukokenttä</i>	44
<i>Kvantin energia</i>	45
<i>Vuorovaikutus materian kanssa</i>	45
<i>Heijastuminen</i>	46
<i>Taituminen (refraktio)</i>	46
<i>Taipuminen (diffraktio)</i>	47
<i>Sirona scattering</i>	47
<i>Tehotiheys</i>	48
<i>Antennin ominaisuudet</i>	49
<i>Dispersio</i>	51
<i>Dopplerilmiö</i>	51
YMPÄRISTÖN VAIKUTUS	52
<i>Mustan kappaleen säteily</i>	52
<i>Aurinko</i>	54
<i>Troposfääri</i>	56
<i>Ionosfääri</i>	58
RADIOTAAJUINEN SÄTEILY	61
<i>Radioaallot</i>	61
<i>Mikroaallot</i>	64

<i>Tutkataajuuskaistat</i>	65
<i>Radiotaajuuden säteilyn etenemiseen vaikuttavat seikat</i>	66
<i>Radiotaajuuden säteilyn etenemistavat</i>	72
OPTINEN SÄTEILY	79
<i>Infrapunäsäteily</i>	79
<i>Näkyvä valo ja lähi-infrapuna</i>	81
<i>Ultraviolettisäteily</i>	82
<i>Röntgen- ja gammasäteily</i>	82
<i>Kosminen säteily</i>	83
<i>Optisen säteilyn eteneminen</i>	83
SPEKTRIN HYÖDYNTÄMISEN REUNA-EHDOT	86
<i>Kohina</i>	86
<i>Monitie-eteneminen ja häipyminen</i>	91
<i>Spektrin rajallisuus</i>	91
TIETOLIIKENNEJÄRJESTELMÄT	93
VIESTIJÄRJESTELMÄN RAKENNEOSAT	93
<i>Rakenteellinen jako</i>	93
<i>Liityntäjärjestelmä</i>	93
<i>Kytkenä- ja välitysjärjestelmä</i>	94
<i>Transmissiojärjestelmä</i>	95
<i>Verkon suunnittelu ja ohjaus</i>	95
<i>Solmottomat verkot</i>	95
<i>Siirto- ja liityntäjärjestelmän toiminnallinen jako</i>	96
SIGNAALITEORIAA	97
<i>Normalisoitu signaali-kohinasuhde</i>	97
<i>Shannon-Hartleyn teoreema</i>	99
<i>Modulointi ja koodaus</i>	100
<i>Bittivirhesuhde</i>	103
LINKKIANALYYSI	104
<i>Tehobudjetti</i>	104
<i>Järjestelmän häviöt</i>	106
<i>Kohinalähteet</i>	107
RADIOKANAVAN OMINAISUUDET	107
YHTEYSVÄLIN MEDIAANIVAIMENNUS	109
<i>Yleinen vaimennusmalli</i>	109
<i>Vapaan tilan vaimennus</i>	109
<i>Kokeellisia malleja</i>	109
<i>Kasvillisuuden vaikutus</i>	113
<i>Lisävaimennus</i>	114
<i>Sään vaikutus</i>	115
TAHDISTUS	115
KOODAUS JA VIRHEENKORJAUS	117
<i>Perusteet</i>	117
<i>FEC-koodaus</i>	117
<i>ARQ-protokolla</i>	119
<i>Virheenkoodausmenetelmän valinta</i>	120
HAJASPEKTRITEKNIKAT	122
<i>Taajuushypintä</i>	122
<i>Aikahypintä</i>	128
<i>Suorasekvenssimenetelmä</i>	129
LIITYNTÄMENETELMÄT	135
<i>TDMA</i>	136
<i>CDMA</i>	136
<i>FDMA</i>	138
VIESTIYHTEYDEN TIEDUSTELU JA HÄIRINTÄ	138
<i>Tiedusteltavuus</i>	138
<i>Suojautuminen tiedustelulta</i>	139
<i>Häirinnän vaikutus viestiyhteyteen</i>	140
<i>Vastatoimenpiteet häirinnälle</i>	143

YHTYMÄN VIESTIJÄRJESTELMÄ	145
RADIOJÄRJESTELMÄT	146
<i>Radiovastaanotin</i>	146
<i>Ohjelmistoradio</i>	149
<i>VHF-kenttäradiot</i>	151
<i>HF-radiot</i>	155
<i>Radiolinkit</i>	157
SATELLIITTIKOMMUNIKAATIOJÄRJESTELMÄT	159
SENSORIJÄRJESTELMÄT	165
JOHDANTO	165
<i>Sensoreiden luokittelu</i>	165
<i>Sensorin toiminnan vaiheet</i>	166
<i>Sensorin rakenne</i>	168
<i>Sensorifuusio ja päätöksenteko</i>	169
SENSORIN TOIMINTAYMPÄRISTÖ	172
TUTKA	173
<i>Tutkatyypit</i>	174
<i>Tutkan rakenneosat</i>	176
<i>Tutkayhtälö</i>	178
<i>Tutkahäirintä</i>	187
<i>Tutkahäirintäyhtälö</i>	188
<i>Tutkan toimintaan vaikuttavat parametrit</i>	192
<i>Valvontatutka ja sen häirintä</i>	204
<i>Seurantatutka</i>	209
<i>Etäisyysseurantamenetelmät ja niiden häirintä</i>	210
<i>Nopeudenseurantamenetelmät ja niiden häirintä</i>	212
<i>Kulmaseurantamenetelmät ja niiden häirintä</i>	214
<i>Eri häirintämenetelmien yhdistäminen</i>	221
<i>Synteettisen apertuurin tutka, SAR</i>	222
<i>CW-tutka</i>	234
<i>Maastonvalvontatutka</i>	236
<i>Vastatykistötutka</i>	239
<i>Millimetriaaltotutka</i>	240
<i>Laajakaistatutka</i>	244
<i>Lähettimeen tutka</i>	245
<i>Pulssidopplertutka</i>	247
ELEKTRONINEN TIEDUSTELU JA VALVONTA	252
<i>Signaalitiedustelu</i>	253
<i>Signaalin havaitseminen</i>	254
<i>Signaalin sieppaaminen</i>	255
<i>Signaalin ilmaisu</i>	256
<i>Tiedustelun ulottuvuus</i>	256
<i>Havaitsemisen virhelähteet</i>	259
<i>Elektroninen tuki, ES</i>	259
<i>Elektroninen tiedustelu, ELINT</i>	261
<i>Järjestelmäkokonaisuus</i>	261
<i>Analysoitavat signaaliparametrit</i>	262
<i>Vastaanottimet</i>	268
<i>Suuntiminen</i>	280
<i>Paikantaminen</i>	290
OPTRONISET SENSORIT	293
<i>Näkyvyys ja kontrasti</i>	293
<i>Optiset komponentit</i>	295
<i>Johnsonin kriteeri</i>	296
<i>Kohinan vaikutus</i>	298
LÄMPÖSENSORIT	300
<i>Lämpölähteet</i>	300
<i>Lämpökontrasti, eli kontrasti termisen infrapunan alueella</i>	301
<i>Transmissioikkunat</i>	304

<i>Ilmaisimet</i>	305
<i>Jäähdytys</i>	309
<i>Lämpöhakupäät</i>	311
LASER.....	314
<i>Laserlähettimen rakenne</i>	315
<i>Laserperiaate</i>	315
<i>Lasertyypit</i>	316
<i>Lasersäteen ominaisuudet</i>	318
<i>Lasersäteen eteneminen</i>	319
<i>Lasertäisyysmittarit</i>	320
<i>Lasertutka</i>	322
NÄKYVÄN VALON SENSORIT.....	325
<i>Valovahvistimet</i>	325
<i>Niukan valon televisio</i>	328
HÄIVEMENETELMÄT JA MAASTOUTTAMINEN.....	329
<i>Tutkataajuudet</i>	331
<i>Terminen infrapuna-alue</i>	336
<i>Näkyvä valo ja lähi-infrapuna</i>	337
<i>Ultravioletti</i>	339
<i>Kokonaisuuden huomioiminen</i>	339
HARHAUTTAMINEN.....	340
TIEDUSTELUJÄRJESTELMÄ.....	343
<i>Tiedusteluajoneuvot</i>	343
<i>Tiedustelukoneet</i>	344
<i>Tiedustelulennokit</i>	345
<i>Tiedustelusatelliitit</i>	347
ASEJÄRJESTELMÄT	350
OHJUksen LENNON VAIHEET.....	360
OHJAUTUSMENETELMÄT.....	360
SUUNNISTAVAT ASEET.....	361
KOMENTO-OHJAUS.....	363
SÄTEENSEURANTA.....	366
MAALIN HAKEUTUVAT ASEET.....	367
<i>Aktiiviset millimetrialueen hakupäät</i>	367
<i>Puoliaktiivinen laservalaisu</i>	370
<i>Puoliaktiivinen tutkavalaisu</i>	372
<i>Passiiviset lämpöhakupäät</i>	373
<i>Passiivisesti tutkalähettimeen hakeutuvat ohjukset</i>	376
HERÄTESYTYTTIMET.....	380
<i>Radiotaajuiset herätesytyttimet</i>	380
<i>Optiset herätesytyttimet</i>	381
HÄIRINTÄJÄRJESTELMÄT.....	381
<i>Elektroninen häirintä</i>	381
<i>Häirintäsignaali</i>	383
<i>Häirintäjärjestelmän tyyppi</i>	390
SUUNNATUN ENERGIAN ASEET.....	392
<i>Suurtehomikroaaltoase</i>	393
<i>Sähkömagneettinen pulssi</i>	404
<i>Sokaisulaser</i>	405
<i>Suurteholaser</i>	407
OMATUNNISTUSJÄRJESTELMÄT	410
OMIEN TUNNISTUS TAISTELUKENTÄLLÄ.....	410
AKTIIVINEN OMATUNNISTUSJÄRJESTELMÄ.....	411
PASSIIVINEN OMATUNNISTUS.....	414
OMASUOJAJÄRJESTELMÄT	416
OMASUOJAJÄRJESTELMÄN RAKENNE.....	416
VAROITTIMET.....	419

<i>Tutkavaroitin</i>	420
<i>Laservaroitin</i>	423
<i>Passiivinen ohjusvaroitin</i>	425
<i>Akustinen varoitin</i>	427
<i>Aktiivinen lasertutka</i>	428
<i>Millimetriaaltotutka</i>	428
AKTIIVISET VASTATOIMENPITEET	429
<i>Tutkahäirintä</i>	429
<i>Infrapunahäirintä</i>	430
<i>Laservalaisun häirintä</i>	433
<i>Lasersokaisu</i>	433
<i>Näkyvän valon hakupään häirintä</i>	434
<i>Sytyttimen häirintä</i>	434
<i>Aseen laukaisijan häiritseminen</i>	435
<i>Ammuksen tai ohjuksen tuhoaminen</i>	435
PASSIIVISET VASTATOIMENPITEET	435
<i>Silppuheitin</i>	436
<i>Lämpösoihdu</i>	437
<i>Suojasavuheitin</i>	440
<i>Vesisumu</i>	440
<i>Valemaalit</i>	441
<i>Esimerkki omasuojajärjestelmästä</i>	443
PAIKANTAMISJÄRJESTELMÄT	445
ANTENNITEKNIikka	454
<i>Johdanto</i>	454
<i>Perusantennit</i>	455
<i>Heijastinantennit</i>	457
<i>Pienet aukkosäteilijät</i>	459
<i>Torviantennit</i>	459
<i>Laajakaista-antennit</i>	459
<i>Antenniryhmät</i>	460
HAVAITSEMISTODENNÄKÖISYYDEN LASKEMINEN	463
<i>SIEPPAUSIKKUNA</i>	463
<i>HYPPIVÄTAAJUISEN LÄHETTEEN SIEPPAAMINEN</i>	468
<i>ILMAISU</i>	471
HÄIRINTÄLINKKIBUDJETIN LASKEMINEN	477
SÄTEILYN VAIKUTUS IHMISEEN	480
<i>Yleistä</i>	480
<i>IONISOIMATON SÄTEILY</i>	481
<i>Pientaajuusalue</i>	481
<i>Radioaallot</i>	482
<i>Mikroaallot</i>	482
<i>Optinen alue</i>	482
<i>IONISOIVA SÄTEILY</i>	483
SIGNAALIKOHINASUHDE JA SÄHKÖINEN ETÄISYYS	484
LUONNONVAKIOITA JA KAAVOJA	485
<i>SI-JÄRJESTELMÄN YKSIKÖT</i>	485
<i>KERTOIMET</i>	485
<i>SÄHKÖTEKNIIKAN SUUREITA JA MITTAYKSIKÖITÄ</i>	486
<i>VALAISTUKSEEN LIITTYVIÄ SUUREITA JA YKSIKÖITÄ</i>	486
<i>LUONNONVAKIOT</i>	487
<i>KREIKKALAISET AAKKOSET</i>	487
<i>MUUNNOSKAAVOJA</i>	489

LOGARITMIT	489
LYHENTEET	490

JOHDANTO

Taistelukentän järjestelmät ovat integroitumassa toiminnalliseksi kokonaisuudeksi, josta käytetään nimitystä *digitaalinen taistelukenttä* (digital battlefield). Haluttaessa korostaa taistelun siirtymistä pinnasta viisiulotteiseen tilaan, jossa kolmen fyysisen ulottuvuuden lisäksi keskeisiä ulottuvuuksia ovat aika ja sähkömagneettinen spektri puhutaan usein *digitaalisesta taistelutilasta* (digital battlespace).

Taistelukentän järjestelmien laajamittainen integroituminen muodostaa erillisistä aselajeista ja joukoista sekä eri tyyppisistä tiedustelu-, johtamis- ja asejärjestelmistä eheän taistelumeکانismin. Tämän mekanismin taisteluteho on huomattavasti suurempi kuin erillisten osien summa antaisi olettaa. Yleisesti puhutaankin '*järjestelmien järjestelmästä*' (system of systems), johon nykyiset teknisesti erilliset järjestelmät tullaan integroimaan. Tämän järjestelmien järjestelmän mahdollistaa digitaalitekniikan laajamittainen hyödyntäminen kaikissa järjestelmissä, mutta sen perusedellytyksenä on tietoteknisen alustan hallinta ja muuntautumiskyky teknologian kehittymisen myötä.

Digitaalitekniikka mahdollistaa tiedon tehokkaan keräämisen, käsittelyn ja jakelun nopeasti ja tehokkaasti. Digitaalitekniikan tuomia mahdollisuuksia voidaan verrata 1600-luvulla tehtyyn aseiden kaliiperin ja patruunoiden standardointiin. Vasta kun sotatitit ymmärsivät vakioida käsiaseiden ampumatarvikkeet ja varaosat, voitiin sodankäyntiä tehostaa luotien, patruunoiden ja piippujen sarjavalmistuksella. Standardoinnin myötä samanlaiset patruunat kävivät jokaiseen käytettyyn kivääriin. Vastaavalla tavalla digitaalitekniikka mahdollistaa tiedon massamaisen hyväksikäytön kaikissa järjestelmissä.

Tässä kirjassa esitetään digitaalisen taistelukentän eri osakokonaisuudet sekä perehdytään niiden fysikaalisiin toimintaperiaatteisiin, sovellusmahdollisuuksiin sekä periaatteellisiin rajoituksiin. Kirjan johdantoluku käsittelee sodan kuvan muuttumista yhteiskunnan kehittymisen myötä, sodankäynnin elementtejä ja niiden muutoksia sekä tekniikan merkitystä sodankäynnissä. Toisessa luvussa perehdytään sähkömagneettiseen spektriin, kolmannessa viestijärjestelmiin ja tiedonsiirtotekniikkaan, neljännessä sensorijärjestelmiin, viidennessä sähkömagneettisen spektrin hyödyntämiseen asejärjestelmissä, kuudennessä omatunnistusjärjestelmiin, seitsemännessä omasuojajärjestelmiin ja kahdeksannessa paikannusjärjestelmiin. Kirjan viimeisessä luvussa käsitellään teknologisen kehityksen vaikutusta sähkömagneettisen spektrin hyödyntämiseen. Kirjassa ei pyritä esittelemään olemassa olevia järjestelmiä kattavasti eikä ennustamaan järjestelmien kehittymistä, vaan tavoitteena on tuoda esiin millaiset tekniset vuorovaikutussuhteet eri järjestelmien kehittämiseen ja toimivuuteen vaikuttavat.

SODAN KUVAN KEHITYS

Teollisen yhteiskunnan sota

Nykyinen sodankäynti perustuu teollisen yhteiskunnan konseptiin käydä sotaa. Tätä kutsutaan teolliseksi sodankäynniksi. Sille on tunnuksenomaista muun muassa seuraavat tekijät:

- Sotaa käydään kolmessa dimensiossa, eli maalla, merten syvyyksissä ja ilmassa. Ensimmäinen maailmansota oli ensimmäinen laajamittainen konflikti, jossa käytet-

tiin kolmatta dimensiota, eli toisaalta ilmatilaa tiedusteluun ja pommittamiseen (sekä vastatoimenpiteenä näiden torjuntaan ja vastatoimenpiteen vastatoimenpiteenä hävittäjien torjuntaan) ja toisaalta meren syvyyksiä kauppamerenkulun häiritsemiseen. Toisessa maailmansodassa kolmannella dimensiolla oli jo ratkaiseva merkitys sekä taktisten operaatioiden että strategisten tavoitteiden onnistumisen kannalta.

- Sodankäyntikyky perustuu suureen ihmis- ja kalustomassaan. Joukkojen tulivoima, tulen ulottuvuus ja liikkuvuus on pieni, minkä vuoksi jokaiselle sektorille on kyettävä kohdentamaan riittävän suuri massa. Yhdysvaltain sisällissodassa käyttöön otettu konekivääri vähensi ihmismassan merkitystä. Elävän voiman keskeinen asema sodankäynnissä päättyi ensimmäisessä maailmansodassa, jolloin materiaali-massa korvasi elävän voiman taistelun ratkaisevana tekijänä. Toisessa maailmansodassa korostui joukon teknisen materiaalin taso ja määrä elävän voiman merkityksen pienentyessä sodan loppua kohti. Tekninen kehitys lisäsi joukkojen liikkuvuutta, suojaa ja tulivoimaa sekä johtamisedellytyksiä.
- Voittoon pyritään tuottamalla vastustajalle omia suuremmat tappiot, jolloin vastustajan voima saadaan joko tuhottua tai muutoin eliminoitua sodankäynnistä nopeammin kuin oma voima kuluu. Ensimmäisen maailmansodan rintamataistelut olivat malliesimerkki tästä ajattelu- ja taistelutavasta, jossa lopulta voittaa väijäämättä se, jolla on enemmän resursseja käytössään, tai jonka kyky sietää tappioita on parempi. Toisessa maailmansodassa saksalainen salamatasotaktiikka pyrki syvin murroin ja nopeatempoisin sotatoimin ensin saamaan aikaan aukon vihollisen puolustuksessa ja sitten saattamaan puolustavan joukon sekavaan tilaan ja lopulta eristämään vihollisen taistelevat osat niiden huollosta. Eristyksiin joutuneet ja kokonaistilanteesta epätietoiset joukot eivät kykenisi pitkään vastarintaan. Tällaista taktiikkaa käytettiin ensin Puolassa, sitten Alankomaissa ja Ranskassa ja lopulta venäläisiä vastaan.
- Yhteiskunnan normaali toiminta keskeytyy ja kaikki ponnistukset kohdistetaan sotaan; kansakunnan kaikki voimavarat valjastetaan sodankäyntiin. Äärimmilleen vietynä tämä tarkoittaa niin sanottua totalitääristä sodankäyntiä, jossa kaikki yksilöt ja kansakunnan koko tuotanto-, varastointi-, kuljetus- ja korjauskapasiteetti on hyödynnetty taistelujen tukemiseen.
- Koska sodankäynti perustuu suureen massaun, jota ei voida normaalioloissa pitää yllä, perustuu armeija asevelvollisuuteen ja säännöllisiin kertausharjoituksiin. Asevelvollisuusajan lyhyden ja suhteellisen harvoin kunkin kohdalle osuvien kertausharjoitusten vuoksi järjestelmien ja menettelytapojen on oltava varsin yksinkertaisia ja muuttumattomia.

Edellä kuvatut seikat eivät enää kaikilta osiltaan päde, sillä ympäröivä yhteiskuntamme on muuttunut sekä teknisen kehityksen että ihmisten ja yhteiskunnan yleisen rakenteen muuttumisen myötä.

Tietoyhteiskunnan sodankäynnin piirteet

Yhteiskunnan muuttuessa globaaliksi jälkiteolliseksi tietoyhteiskunnaksi myös sodankäynnissä siirrytään kohti johtamis- ja tietosodankäyntiä. Tietoyhteiskunnan sodankäynnin ominaisuuksia voidaan hahmotella esimerkiksi seuraavasti:

Sotaa käydään viidessä ulottuvuudessa, joista neljäs, eli aika korostuu sekä hyökkäyksessä että puolustuksessa. Joukkojen ja vaikutuksen paikka riippuu ajasta: olennaista on keskittää

voimat oikeaan aikaan ja oikeaan paikkaan. Viides ulottuvuus muodostuu sähkö-magneettisessa spektrissä. Se, joka hallitsee sähkömagneettista spektriä, kykenee voittamaan taistelun. Se, joka ei sitä hallitse, on tuomittu reagoimaan vastustajan toimiin hajanaisin vastatoimenpitein. Sähkömagneettisen spektrin hallitsija näkee ja kuulee sekä kykenee johtamaan. Riistämällä spektrin käyttökyky vastustajalta kyetään tekemään se paitsi sokeaksi ja kuuroksi, myös mykäksi. Tällöin sen lihaksistakaan ei ole sille hyötyä.

Sodankäynti perustuu massan ja materiaalin sijasta tietoylivoimaan. Pelkällä tiedolla ei sotia tietenkään voiteta, mutta sillä kyetään saavuttamaan sama lopputulos huomattavasti pienemmällä massalla ja tappioilla. Tämä pätee niin tarvittavaan ihmisten kuin aseiden ja ammusten määrään.



Kuva 1: Yhteiskunnan riippuvuus teknisestä infrastruktuurista kasvaa, mikä tekee infrastruktuurista myös sodankäynnin yhden maalin ja suojattavan kohteen. [SA-kuva]

Voittoon pyritään lamauttamalla vastustajan tärkeimmät järjestelmät iskemällä sen kriittisimpiin ja heikoimpiin kohtiin. Vastustaja pyritään voittamaan mahdollisuuksien mukaan jo ennen taistelun aloittamista. Strategisella tasolla tämä tarkoittaa sitä, että sota pyritään voittamaan jo ennen kuin se on aloitettu sodan perinteisessä merkityksessä, eli ennen kuin viholliselle on tuotettu fyysisiä tappioita. Vaikutuskeinoina voisivat olla esimerkiksi kansallinen

sähkö-, tietoliikenne- ja raideliikenneverkon, vedenjakelun ja -puhdistuksen, ydinvoimaloiden, kaukolämpöverkon ja yleisradiotoiminnan lamauttaminen tai haltuunotto. Taktisella tasalla vihollisen järjestelmät pyritään tuhoamaan niiden ryhmitysalueilla ennen taistelutoimenpiteiden aloittamista, tai lamauttamalla esimerkiksi epäsuoran tulenkäytön yhteydet ja pataljoonien johtamisyhteydet.

Määrällisen ylivoiman sijasta pyritään laadulliseen ylivoimaan. Joukot ovat entistä pienempiä ja teknologisempia. Taistelevan joukon pienuus ei kuitenkaan merkitse sen tulivoiman vähenemistä. Teknisten järjestelmien tehostumisen myötä joukon pienuus on pikemminkin etu kuin haitta. Pienen joukon operatiivinen ja taktinen liikkuvuus on parempi kuin ison. Pieni joukko on lisäksi helpompi suojata tiedustelulta kuin iso ja aseiden tulivoiman kasvaessa pienen joukon tappiot muodostuvat pienemmäksi kuin ison.

Kriisien syntymisen nopeutumisen, keston lyhenemisen sekä operaatioissa tarvittavan joukon pienenemisen myötä sotaa käydään entistä useammin muusta yhteiskunnasta erillisenä toimintona – ainakin silloin kun yhteiskuntaa puolustetaan oman maan rajojen ulkopuolella, mihin yleiseurooppalainen kehitys on viime aikoina tuntunut johtavan. Tilanteessa, jossa sotaa käydään oman maan alueella, ei mikään yhteiskunnan osa ole siitä erillään. Informaatio- ja siviili-infrastruktuurin yhtenä ongelmana onkin se, että siinä pyritään hyökkäämään myös siviili-infrastruktuuria ja -yhteiskuntaa vastaan, kansainvälisten sopimusten kieltämää tai ainakin niiden hengen vastaista toimintaa.

Sodankäynnissä ei voida hyödyntää yhteiskunnan kaikkia voimavaroja. Kaikkia resursseja ei ehditä tai kyetä valjastamaan sodankäyntiin kriisien äkillisyyden ja lyhytkestoisuuden sekä järjestelmien monimutkaisuuden vuoksi. Järjestelmissä käytetään lisäksi suuressa määrin ulkomailla valmistettuja komponentteja, joten kotimainen teollisuus ei kykene tuottamaan näitä järjestelmiä kriisin aikana. Toisaalta yhteiskunnan teknistyminen ja asutuskeskusten roolin kasvu taistelualueena lisää siviiliyhteiskunnan infrastruktuurin käyttömahdollisuuksia myös aseellisissa konflikteissa.

Taistelun elementit

Taistelun elementteinä pidetään 1) tiedustelua, valvontaa ja johtamista, 2) tulivoimaa, 3) liikettä ja 4) taistelukyvyyn säilyttämistä. Tiedustelu-, valvonta- ja asejärjestelmien ulottuvuuden ja tarkkuuden parantumisen myötä taistelutilan syvyys ja laajuus kasvaa. Taisteluja käydään yhä laajemmalla alueella eikä varsinaista etulinjaa ja selustaa enää ole. Taistelun kululle ovat tyypillisiä samanaikaiset iskut koko syvyydessä muun muassa täsmäasein ja elektronisen asevaikutuksen keinoin, helikopterein, integroidun epäsuoran tulen ja informaatio- ja siviili-infrastruktuurin menetelmien avulla. Taistelualueen laajuuden ja joukkojen vähäisyyden vuoksi taistelutilan läpinäkyvyys kasvaa. Suurin osa taistelutilasta on itse asiassa tyhjää aluetta, jota kuitenkin valvotaan elektronisesti ja jolla havaituille maaleille voidaan kohdentaa tulta ja joukkoja hyvinkin nopeasti.

Liike tulee olemaan tulta tärkeämpi elementti taistelussa. Liike toimii suojana vastustajan tulelta sekä mahdollistaa olosuhteiden ja tilanteiden optimaalisen hyväksikäytön ja voimien nopean keskittämisen. Liikkeen osalta ollaan siirtymässä siirtyilevistä järjestelmistä täysin liikkuviin, siis liikkeensä aikana toimintakykyisiin (OTM, On-The-Move). Muutamia kertoja vuorokaudessa siirrettävän ja vain paikalleen pystytetyn systeemin liikkuvuus ei muodosta suojaa tulelta eikä sellaisella kyetä reagoimaan nopeisiin tilannevaihteluihin. Liike on paitsi suojakeino, myös olennainen voiman keskittämiskyvyssä, vastustajan yllättämisessä ja

vastustajan heikkouksiin iskemisessä. Taistelussa käytetään hajautettuja toiminnaltaan keskenään synkronoituja pieniä joukkoja, joita johdetaan liikkuvista hajautetuista esikunnista ja komentopaikoista. Hajautettujen osien välinen yhteys riippuu sähkömagneettisen spektrin hallinnasta.

Aseiden ja joukkojen tulivoima on koko ajan lisääntynyt aseiden tuhoenergian kasvamisen ja tuho vaikutuksen entistä tarkemman kohdentamisen myötä. Olennaisin tehokkuuteen vaikuttava tekijä on elektronisten komponenttien ja informaatiotekniikan hyödyntäminen asejärjestelmien tarkkuuden parantamisessa sekä tulenkäytön nopeuttamisessa. Yksittäisten aseiden tarkkuus on kasvanut aseiden ja ennen kaikkea ammusten älykkyyttä lisäämällä. Tämän vuoksi myös näiden aseiden häirintä ja harhauttaminen kehittyy koko ajan – mikä puolestaan edellyttää jatkuvaa aseiden kehittämistä. Aseen ja vasta-aseen välinen kilpajuoksu on siirtynyt sähkömagneettiseen spektriin. Elektroniikkaa hyödynnetään paitsi maaliin hakeutuvissa täsmäaseissa, myös ballististen ammusten hajonnan pienentämisessä. Koko-naisten asejärjestelmien tehoa on kyetty nostamaan kehittämällä maalin paikantamiseen ja tulenkäytön valmisteluun liittyviä elektroniikkajärjestelmiä sekä luomalla entistä paremmat ja nopeammat edellytykset tulen avaamiselle ja tulivaikutuksen keskittämiseksi.



Kuva 2: Johtamisen merkitys tulee kasvamaan. Johtamisessa on aina ensisijaisesti kyse ihmisten johtamisesta taisteluun ja taistelussa. Tekniikka on tällöin vain työkalu – toisaalta tämänkin työkalun on toimittava. [SA-kuva]

Tulivoiman ja tulenkäytön edellytysten kehittyminen korostaa järjestelmien integraalisen aktiivisen ja passiivisen suojan merkitystä sekä järjestelmien kykyä sietää tappioita ja väistää tulivaikutusta. Edellisessä keskeisinä tekijöinä ovat fyysinen ja toiminnallinen hajautus, jälkimmäisessä liikkuvuus. Taistelukyvyyn säilyttäminen muodostaa merkittävän haasteen joukkojen koon pienentymisen ja liikkuvuuden kasvamisen myötä. Lukumääräisesti entistä vähäisemmät taistelijat joutuvat yhä suurempien rasitusten kohteeksi ja heidän mahdollisuuttaan lepoon rajoittaa koko ajan kiihtyvä taistelun tempo. Tämä puolestaan lisää taisteluväsymystä, minkä kompensoiminen edellyttää entistä automaattisempia järjestelmiä. Lisäksi logistiikkajärjestelmän keskeisiksi haasteiksi muodostuu tuettavien nopeampoinen ja

syvälle ulottuva liike sekä vihollisen asejärjestelmän kantaman, tarkkuuden ja tulenavausnopeuden kehittyminen. Oman lisänsä tuo vielä informaatiologiikan merkityksen korostuminen: pelkkä ammuksen toimittaminen lavetille ei riitä, jos ammuksen älykkyys ei riitä kohteen omasuojajärjestelmän kiertämiseen.

Eri tiedustelu-, valvonta-, johtamis- ja asejärjestelmien keräämän ja tuottaman tiedon määrä kasvaa ja muoto kehittyy, mikä aiheuttaa painetta erityisesti johtajien koulutustason nostamiseksi. Joukkojen liikkuvuuden kasvun myötä taistelun tempo nopeutuu. Kohtaamistais- teluiden merkitys kasvaa voimakkaasti: nopeat ja yllättävät tilannevaihtelut sekä pienten tulivoimaisten yksiköiden merkitys ovat ratkaisevia. Taistelujen tempo sekä odottamattomat muutokset taistelutilanteessa edellyttävät johtajalta kykyä itsenäisyyteen ja aloitteellisuuteen sekä mahdollisuutta hahmottaa häntä ympäröivä taistelukenttä.

Johtamisen merkitys tulee kasvamaan ja johtaminen tulee olemaan olennainen painopistealue toiminnallisessa ja teknisessä kehityksessä. Sillä on keskeinen merkitys sekä liikkeen että tulen hallinnassa ja koordinoinnissa. Liike ilman sen johtamista ei ole taistelua tukeva vaan hajottava tekijä. Samoin tulivoiman lisääntymisestä ei ole hyötyä ellei tulta voida johtaa ja käyttää. Johtamisessa korostuu tilannetietoisuus sekä vihollista paremman tilannetietoisuuden myötä saavutettava johtamisylivoima. Kehittyvä tilannetietoisuus muuttaa johtamistapoja, esimerkiksi uutta roolijakoa hajautetun päätöksenteon ja toiminnan vapauden sekä keskitetyn johdon välillä. Tilannetietoisuuden kehittyminen muuttaa myös esikuntien ja komentopaikkojen rooleja, tehtäviä ja rakennetta.

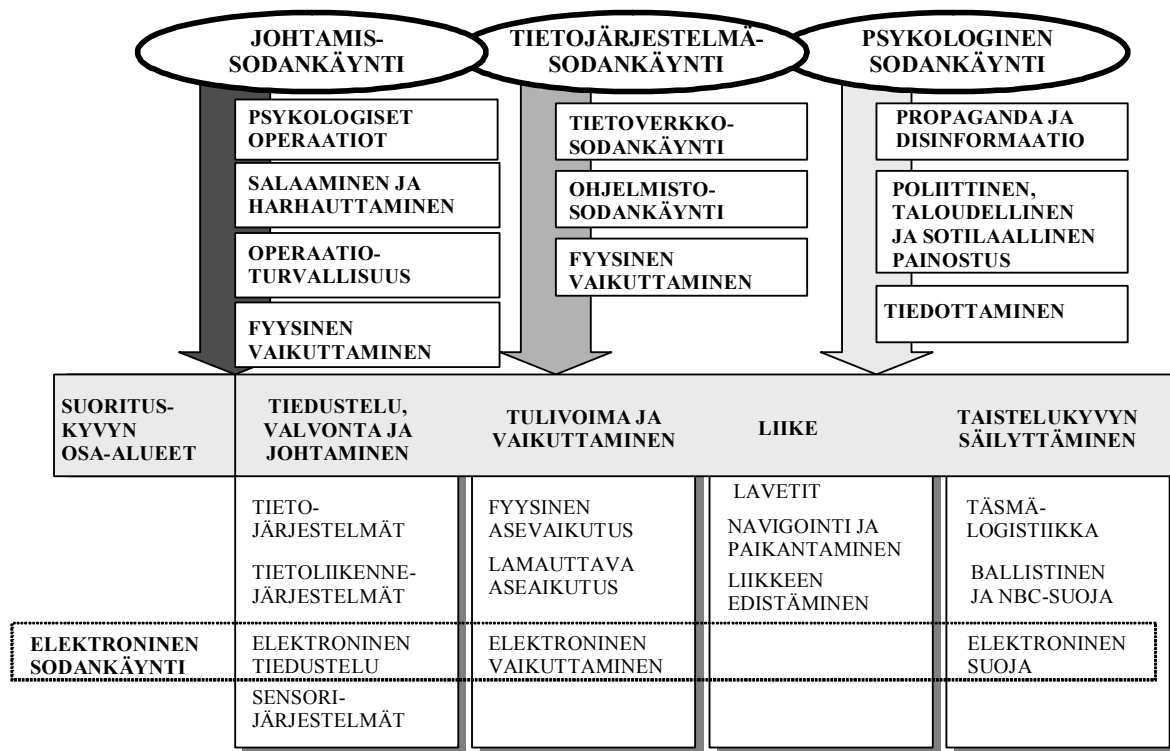
Edellä kuvatuissa neljässä keskeisessä taistelutekijässä – johtamisessa, tulivoimassa, liikkeessä sekä taistelukyvyyn säilyttämisessä – ei sinänsä ole mitään uutta. Niiden merkitys sodankäynnissä on tunnettu jo pitkään. Ihmiskunnan teknologinen kehitystaso vain on eri aikoina antanut näille käsitteille erilaisen sisällön. Tämänhetkinen informaatiota painottava teknologinen aikakausi on tuomassa näille käsitteille täysin uuden merkityksen. Olennaisimpana seikkana on tiedon ja johtamisen korostuminen muiden edelle erityisesti sen vuoksi, että tällä sektorilla on vielä saavutettavissa olennaisia tuloksia taistelukyvyyn tehostamisessa. Länsimaisen filosofian mukaisesti elektroniikkaan ja digitaalitekniikkaan sijoittamalla saavutetaan suurin investoidun pääoman tuotto mitattuna saavutettavalla taistelutehon kasvulla tutkimukseen, tuotekehitykseen, hankintoihin ja materiaalin ylläpitoon sekä käyttöön uhrattaviin varoihin ja henkilömääriin nähden.

Johtopäätöksinä taistelun ja sodan kuvan kehittymisestä voidaan todeta, että yhdistelmä pieniä joukkoja, yhä suorituskykyisempiä sensoreita ja pitkän kantaman täsmävaikutusta lisää tulevaisuudessa suuntausta kohti hajautetumpia joukkoja, tyhjempää taistelutilaa ja suurempaa taktista liikkuvuutta. Nämä puolestaan edellyttävät tehokkaita sensorijärjestelmiä ja toimivaa tietoliikenneinfrastruktuuria. Puuttuvat rintamalinjat ja etu- ja takarintaman sekä maa- ja ilmakomponentin välisen rajan hämärtyminen lisää olennaisesti tilannetietoisuuden ja tunnistusjärjestelmien tarvetta. Teknologia sallii taistelun yhä pidemmiltä etäisyyksiltä. Operaatioita suoritetaan yöstä päivään ja kaiken tyyppisessä säässä, usein myös äärimmäisissä ilmasto- ja maasto-olosuhteissa. Asutuskeskustaisteluiden todennäköisyys kasvaa. Joukkojen on kyettävä taistelemaan taajamissa, joissa kevyillä joukoilla on etulyöntiasema raskaita panssaroituja joukkoja vastaan, joissa tilannetietoisuus ja viestiyhteydet saattavat muodostaa ongelman ja joissa siviilien sotkeutuminen mukaan toimintaan on merkittävää. Asutuskeskuksissa korostuu myös kehittyvien teknologioiden ennustettavuuden vaikeus.

SODANKÄYNNIN OSA-ALUEET

Käsitehierarkia

Eri aikakausien sodankäynnistä käytetään useita erilaisia nimityksiä, joiden merkitys ja suhde toisiinsa saattaa olla hämärä jopa ammattisotilaille. Esimerkiksi käsitteitä salamasota, liike-sodankäynti, navigointisodankäynti tai vaikkapa informaatio-sodankäynti ei ole standardoitu, joten niiden sisällöstä on useita erilaisia näkemyksiä. Koska kuitenkin näitä käsitteitä käytetään laajasti kuvaamaan sodan ja taisteluiden kehittymistä, ja koska tekniikkaa tarkastellaan usein osana jotakin näistä käsitteistä, olisi hyvä ymmärtää niiden merkitys. Tämän kirjan tavoitteen kannalta olennaista on ymmärtää käsitehierarkian eri tasojen merkitys kokonaisuutena. Tätä havainnollistetaan kuvassa 3, joka esittää nykyisen informaatioajan sodankäynnin kolme keskeistä konseptia ja niiden liitännät taistelun eri elementteihin.



Kuva 3: Kaikki informaatio-sodankäynnin kolme osa-alueita tukeutuvat perinteisiin sodankäynnin elementteihin.

Informaatioon perustuvaan sodankäyntiin voidaan katsoa kuuluvaksi kolme varsin erityyppistä sodankäyntitapaa; johtamissodankäynti (Command and control warfare, C2W), tietojärjestelmäsodankäynti ja psykologinen sodankäynti. Sodassa näitä kaikkia käytetään yhteisen päämäärän saavuttamiseksi, vaikka keinot ja suorittajat ovatkin hyvin erilaisia. Psykologisella sodankäynnillä pyritään heikentämään kansakunnan halua käydä sotaa sekä vähentämään taistelutehoa iskemällä sekä kansan että joukkojen moraaliin samalla kun oman kansakunnan ja omien joukkojen tahtoa ja moraalia pyritään pitämään yllä. Tietojärjestelmäsodankäynnillä vaikutetaan vihollisen koko yhteiskunnan kriittisiin tietojärjestelmiin sekä taistelun johtamisen kannalta keskeisiin sotilaallisiin järjestelmiin. Tällä tuetaan sekä psykologisten operaatioiden että johtamissodankäynnin suorittamista; esimerkiksi vihollisen hallituksen kyky

kontrolloida tapahtumia voidaan asettaa kyseenalaiseksi propagandan keinoin paljon tehokkaammin, jos samalla voidaan osoittaa, että joku kykenee aina halutessaan lamauttamaan sähköverkon ja TV-lähetykset.

Nämä kolme informaatioidankäynnin osa-aluetta tukeutuvat kaikkiin neljään suorituskyvyn osa-alueeseen, eli tiedusteluun, valvontaan ja johtamiseen, tulivoimaan ja vaikuttamiseen, liikkeeseen sekä taistelukyvyn säilyttämiseen. psykologisessa sodankäynnissä vaikutukseen pyritään nimenomaan taistelutahdon välityksellä. Suorituskykyäkin voidaan ryhmitellä teknologisesti, esimerkiksi elektroninen sodankäynti on teknologia-alue, joka vaikuttaa suoraan liikettä lukuun ottamatta kaikkiin suorituskyvyn alueisiin ja jonka vaikutus ulottuu välillisesti myös liikkeeseen.

Edellä kerrottu pyrkii osoittamaan, ettei yksi-yhteen – kuvausta voida tehdä sodan erilaisten konseptien ja niitä tukevien suorituskyvyn osien tai teknologioiden välille. Siten ei voida sanoa vaikkapa, että elektroninen sodankäynti kuuluu johtamissodankäyntiin, vaan tulisi havaita, että elektronisella sodankäynnillä voidaan tukea sekä johtamissodankäyntiä ja tietojärjestelmäsodankäyntiä että psykologisia operaatioita. Jos ajatellaan esimerkiksi tilannetta, jossa fyysisellä asevaikutuksella on ensin lamaautettu vihollisen yleisradiotoiminta elektronisen tiedustelun antamien tietojen perusteella, jonka jälkeen psykologisen sodankäynnin sanoma välitetään tietokone-emulaation keinoin muodostetulla vihollismaan presidentin puheella, joka syötetään vihollisen TV-järjestelmään tietoverkkosodankäynnin tai ilmasta elektronisen sodankäynnin keinoin, niin havaitaan heti, ettei selkeätä jakoa voida tehdä. Sitä paitsi sodankäynnissä käytetään aina kaikkia keinoja taistelun ja sodan voittamiseksi riippumatta siitä, mihin kategoriaan mikin keino on määritelty kuuluvaksi.

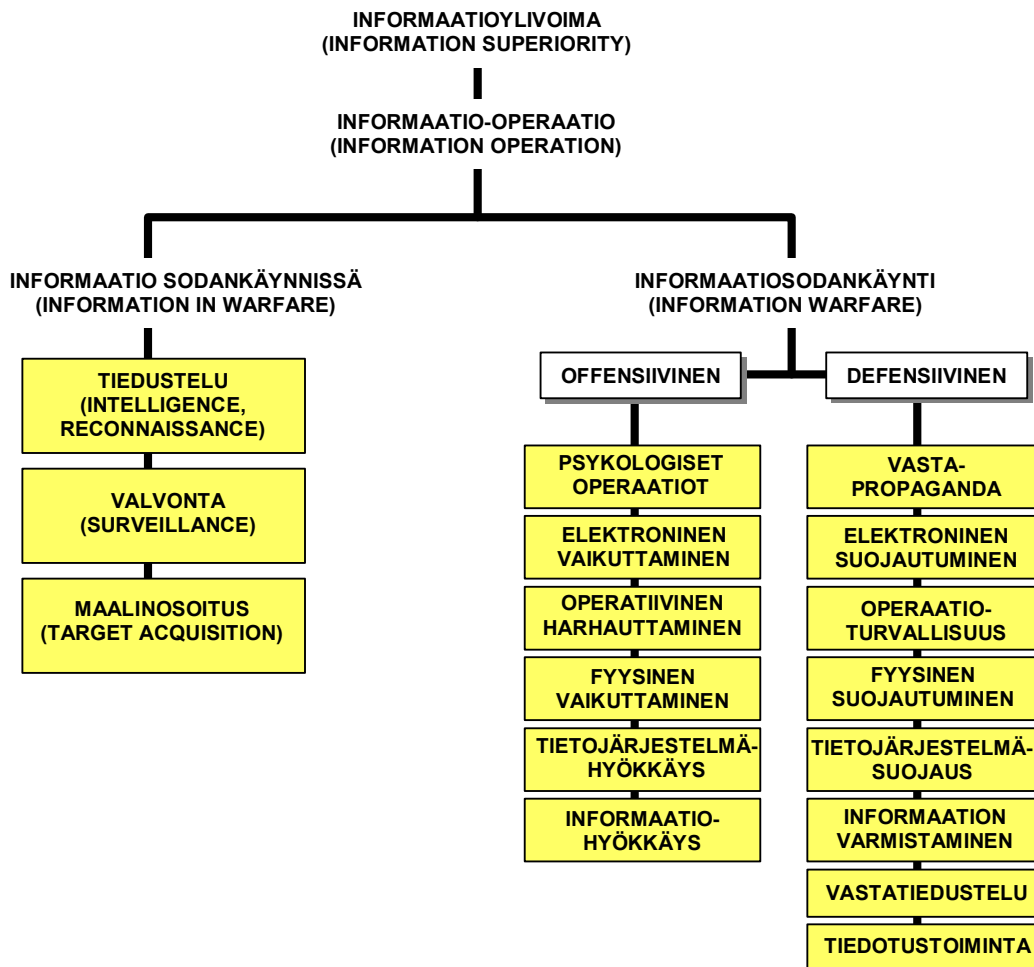
Informaatioidankäynti

Informaatiolla on koko ajan kasvava merkitys tuotteiden ja palveluiden tuotannossa ja ihmisten jokapäiväisessä elämässä. Yhteiskunnan tuotannosta ja työpaikoista yhä suurempi osa liittyy informaatioon. Terminä informaatioidankäynti¹ (IW, Information Warfare) on hieman harhaanjohtava, sillä eihän informaatio tapa eikä sillä voida ottaa aluetta haltuun. Tietokoneviruksilla ei torjuta rynnäkkökiväärimestä eikä vihollisen tarkka paikantaminen sinänsä tee tämän aikeita tyhjiksi. Sodankäynti perustuu yhä viime kädessä yksittäiseen taistelijaan aseineen ja muine varusteineen. Taistelun voittaminen edellyttää yhä perinteisten aseiden kuten käsiaseiden, tykistön, ohjuksien, kranaatinheittimin, sinkojen, rakettien ja miinojen käyttöä. Informaatioidankäynnin oppien soveltaminen ei tähän tuo olennaista muutosta. Sen sijaan se mahdollistaa järjestelmien ja taistelevan joukon tehon olennaisen lisäämisen – sekä vastustajan suorituskyvyn lamauttamisen. Informaatio sodankäynnissä ja informaatioidankäynti ovat kaksi käsitettä, jotka valitettavan usein sekoitetaan toisiinsa. Kaikki sodankäynti perustuu informaation hyödyntämiseen, mutta vasta informaatioidankäynnin myötä fokus on hyökätä informaatiota vastaan ja suojata sitä, sen sijaan että näitä vain käytettäisiin hyväksi muilla sodankäynnin alueilla.

Yleisesti *informaatioidankäynti* luokitellaan strategis-operatiivisen tasan sodankäynnin muodoksi, johon kuuluu tietojärjestelmäsodankäynti ja psykologinen sodankäynti. *Tietojärjestelmäsodankäynti* sisältää vaikuttamisen vihollisen järjestelmiin sekä omien järjestelmien suojaamisen tietoverkkojen kautta tapahtuvilta hyökkäyksiltä sekä järjestelmäkomponentteihin ujutettujen haaitaohjelmien ja -koodien avulla suoritetuilta hyökkäyksiltä. Lisäksi tieto-

¹ **Tietosodankäynti**-termin sijasta puolustusvoimissa käytetään termiä informaatioidankäynti.

järjestelmäsodankäyntiin katsotaan kuuluvan myös fyysinen vaikuttaminen vihollisen järjestelmäinfrastruktuuriin ja oman infrastruktuurin suojaaminen tällaiselta vaikuttamiselta. Fyysisen vaikuttamisen lisäksi keinoina voidaan toki käyttää elektronista vaikuttamista, vaikka se luokitellaankin yleensä osaksi johtamissodankäyntiä. *Psykologinen sodankäynti* on vaikuttamista ihmisten arvostuksiin, asenteisiin, tunteisiin, motiiveihin, päätöksentekoon ja lopulta käyttäytymiseen. Se sisältää diplomaattiset ja sotilaalliset painostuskeinot, sekä omille kansalaisille että viholliselle ja myös kolmansille osapuolille suunnatun propagandan, disinformaation levittämisen sekä myös perinteisen tiedottamisen. Tiedottaminen tulisi aina pitää erillään dis-informaation sekä propagandan muodostamisesta ja levittämisestä – sekä asiallisesti että organisatorisesti – organisaation tiedottamisen uskottavuuden takaamiseksi.



Kuva 4: Informaatio sodankäynnissä ja informaatiosodankäynti ovat kaksi eri käsitettä, jotka molemmat muodostavat osan informaatioylivoimaa.

Informaatiosodankäynnissä osa vastuusta kuuluu selkeästi perinteisten puolustusvoimien tehtävien ja jopa valtiokoneiston ulkopuolelle. Kyseessä on siten yhteiskunnan johtamaa toimintaa. Länsimaissa valtiokoneistosta riippumattoman median merkitys saattaa olla keskeistä informaatiosodankäynnissä. Valtiolla ei kuitenkaan ole keinoja ja aina edes mandaattia suojella mediaa informaatio-operaatioilta. Lisäksi psykologisen sodankäynnin tavoitteet ja keinot ovat ainakin osin ristiriitaisia länsimaisen demokratian arvojen ja osin jopa lainsäädännön kanssa. Informaation manipulointi, estäminen, viivästäminen ja tiedottamisen aikautus itselle sopivaksi sotivat vapaaseen tiedonkulkuun pohjautuvan demokraattisen valtion perusarvoja vastaan. Sen vuoksi onkin mahdollista, että demokratioissa informaatiosodankäynnin

keinovalikoima jääkin tiedottamiseen: oikean tiedon jakamiseen, huhujen kiistämiseen sekä lievästi sävytetyn mutta sinänsä oikean tiedon aktiiviseen jakamiseen.

Informaatioidankäyntiä käydään koko ajan: valtio ja yksityiset organisaatiot suojaavat omia järjestelmiään ja kehittävät keinoja hyökkäysten havaitsemiseksi ja torjumiseksi, erilaiset toimijat pyrkivät tiedustelemaan järjestelmiä ja murtautumaan niihin. Tietoverkkojen globaalisuuden vuoksi hyökkäys voi tulla toiselta puolelta maapalloa ja sen käynnistäjänä voi olla valtiollisen toimijan lisäksi yksityinen ryhmittymä tai jopa yksittäinen henkilö.

Termi "information warfare" on eri tahoilla suomennettu joko informaatioidankäynniksi tai tietosodankäynniksi. Englannin kielen sana information voidaan suomentaa sekä tiedoksi että lainasanaksi informaatio. Knowledge puolestaan tarkoittaa tietoa ja tietämystä. Information warfare on siten kielellisesti suomennettavissa sekä tietosodankäynniksi että informaatioidankäynniksi. Kuitenkin informaatioteoriassa termeillä informaatio ja tieto on eri merkitys. Käsittehierarkiassa alimpana on termi data, joka tarkoittaa symbolia, jonka vastaanottaja kykenee tulkitsemaan signaalin jostakin ominaisuudesta jollakin ennalta sovitulla tavalla. Esimerkiksi binäärialgebrassa datalla voi olla kaksi arvoa: 1 ja 0. Signaali voidaan tulkita dataksi 1 tai 0 vaikkapa jännitetaso tai vaiheinformaation perusteella. Informaatio puolestaan syntyy siitä, että dataa tulkitaan – jälleen kerran ennalta sovitulla tavalla. Informaatio määritellään informaatioteoriassa vastaanotetun datan sisältämäksi ennakoimattomuudeksi. Jo ennalta tiedetty saapuva tieto ei sisällä informaatiota ja odotettu tietokin vähän². Tieto "knowledge" puolestaan sisältää informaation tulkinnan "meaning". "Information warfare" voidaan siten suomentaa informaatioidankäynniksi, jos halutaan korostaa sitä, että vaikutuskeinona on informaation jakaminen, muokkaaminen, estäminen ja viivästäminen. Suomennos tietosodankäynti puolestaan korostaa sitä, että informaatio on vain keino vaikuttaa vihollisen tietämykseen ja sitä kautta päätöksentekoon sekä suojata oma tieto ja siihen perustuva päätöksenteko.

Suomen puolustusvoimien määritelmässä informaatio- ja johtamissodankäynti on mielletty saman asian, eli informaatioon perustuvan sodankäynnin, kahdeksi eri ilmentymäksi: informaatioidankäynti on puolustusvoimien määritelmän mukaan *valtiojohtoista rauhan ja sodan aikaista toisen valtion yhteiskunnalliseen ja sotilaalliseen päätöksentekoon ja toimintakykyyn vaikuttamista ja tältä suojautumista käyttämällä informaatiota ja tiedonkäsittelyä sekä kohteena että aseena*. Informaatioidankäyntiä toteutetaan informaatio-operaatioilla, joilla pyritään saavuttamaan vastustajasta informaatioylivoima. Informaatioidankäyntiä voidaan käydä yhteiskunnallisin, poliittisin, psykologisin, sosiaalisin, taloudellisin ja sotilaallisoin keinoin strategisella, operatiivisella tai taktisella tasolla. Informaatioidankäyntiä voidaan käydä hyökkäyksellisesti tai puolustuksellisesti. Informaatioidankäynti on kilpailua informaatiosta ja informaatiojärjestelmistä. Rauhan aikana informaatioidankäynnissä korostuu tietojärjestelmäsodankäynnin ja psykologisen vaikuttamisen puolustuksellinen toiminta. Puolustusvoimien määritelmän mukaan johtamissodankäynti (engl. Command and Control Warfare, C2W) on *asevoimien informaatioidankäynnin sotilaallista toteuttamista kriisin ja sodan aikana ja tämän toiminnan rauhanaikaista valmistelua*. Puolustusvoimien oma määritelmä jättää huomioimatta informaatioidankäynnin strategisen ja johtamissodankäynnin operatiivisen luonteen. Tämän vuoksi seuraavassa on esitetty puolustusvoimien määritelmää laajemmin johtamissodankäynnin käsitettä.

² Shannon määritteli informaation $I_i = -\log_b P_i$, missä I_i on sanomassa i vastaanotetun informaation määrä, b on järjestelmän kantaluuku (esimerkiksi binaariaritmetiikassa 2) ja P_i on viestin i todennäköisyys (eli todennäköisyys, että tapahtuma i tapahtuu). [Shannon C. E.: *A Mathematical Theory of Communication*. Bell Systems Technical Journal. Vol. 27. 1948]

Johtamissodankäynti

Johtamissodankäynti on operatiivis-taktisen tasan sodankäynnin muoto, jota käydään sota-tilanteessa ja jonka vastuu yhteiskunnassa selkeästi on sotilasorganisaatioilla. Johtamissodankäynnin osa-alueissa ei sinänsä ole uutta verrattuna vaikkapa toisen maailmansodan menetelmiin. Olennaista on kuitenkin se, että nämä osatekijät on koottu yhdeksi toisiaan tukevaksi kokonaisuudeksi, jolle on laadittu oma doktriininsa.

Johtamissodankäynnin tavoitteena on kyetä käyttämään oikeita joukkoja ja sopivaa vaikutusta oikeaan aikaan oikeassa paikassa ja oikeassa mitassa sekä estää tämä vastustajalta. On saavutettava informaatioylivoima vastustajaan nähden. Vaikutuskeinoina käytetään perinteisen fyysisen asevaikutuksen lisäksi elektronista, psykologista ja tiedollista vaikuttamista. On kuitenkin huomattava, ettei informaatio- tai johtamissodankäynti suinkaan vähennä perinteistä asevaikutusta, pikemminkin päinvastoin. Elektroniikan mahdollistama tulen ulottuvuuden kasvu, tulenavauksen nopeus ja tulen tarkkuus nostavat tulivaikutuksen uudelle tasolle. Informaatioylivoima antaa mahdollisuudet käyttää vastustajaa paremmin hyväksi sodankäynnin perinteisiä elementtejä, kuten tulta ja liikettä. Kaiken vaikuttamisen olennaisimpana motiivina on päästä vihollisen johtamissyklin sisälle, eli asettamaan vihollinen jatkuvasti tapahtuneiden tosiasioiden eteen "*get into enemy's decision cycle*". Tällöin vihollinen ei kykene reagoimaan tapahtumiin ennen kuin oma toiminta on jo siirtynyt seuraavaan vaiheeseen ja vihollisen reagointi perustuu vanhentuneeseen tilanteeseen. Informaatiosodankäynti korostaa siten aloitteellisuutta ja perustuu aktiiviseen joukkojen käyttöön.

Aloitteellisuus edellyttää sekä tilannetietoisuutta että kykyä johtaa joukkoja reaaliaikaisesti. Joukkojen aktiivinen käyttö edellyttää niiltä riittävää liikkuvuutta ja tulivoimaa sekä nopeaa huoltotukea. Pelkkä oikeaan aikaan oikeassa paikassa oleminen ei riitä, ellei keskitettykään tulivoima, tulen tarkkuus tai aseiden kantama riitä vastustajan lamauttamiseen tai tuhoamiseen. Informaatiosodankäynnin antamia etuja ei siten voida hyödyntää joukolla, joilla ei ole riittävää liikkuvuutta ja tulivoimaa. Vaikka informaatio tehostaa muita taisteluelementtejä, se ei korvaa niitä.

Informaatioylivoima

Informaatioylivoima (engl. **Information Superiority, IS**) on puolustusvoimien määritelmän mukaan *suhteellinen ylivoima informaatio-operaatioissa vastustajaan nähden ajantasaisen ja oikean informaation keräämisessä, prosessoimisessa ja jakamisessa sitä tarvitseville*. Informaatioylivoima saavutetaan sekä tukemalla omaa informaatioprosessia että heikentämällä vastustajan informaatioprosessia.

Informaatiosodankäynnin kannalta teknisen kehityksen painopisteenä tulee olemaan tilannetietoisuuden (SA, Situational Awareness) olennainen lisääminen. Tilannetietoisuus käsittää tietoisuuden omista ja vihollisen joukoista – niiden sijainnista, tilasta, kyvyistä ja aikeista – sekä taisteluympäristöstä – tiestöstä, maastosta, säästä, ulkopuolisista toimijoista yms.

Tilannetietoisuuden saavuttaminen edellyttää tiedustelu- ja valvontajärjestelmien sensoritietojen ja tilanne- sekä maali-ilmoitusten keräämisen, tilannekuvan muodostamisen ja koosteiden sekä johtopäätösten ja käskyjen jakelun edelleen tarvitsijoille. Vihollinen pyrkii vaikuttamaan kuvan 4 mukaisesti myös tilannetietoisuuteen harhauttamalla ja käyttämällä sekä fyysistä että elektronista asevaikutusta.



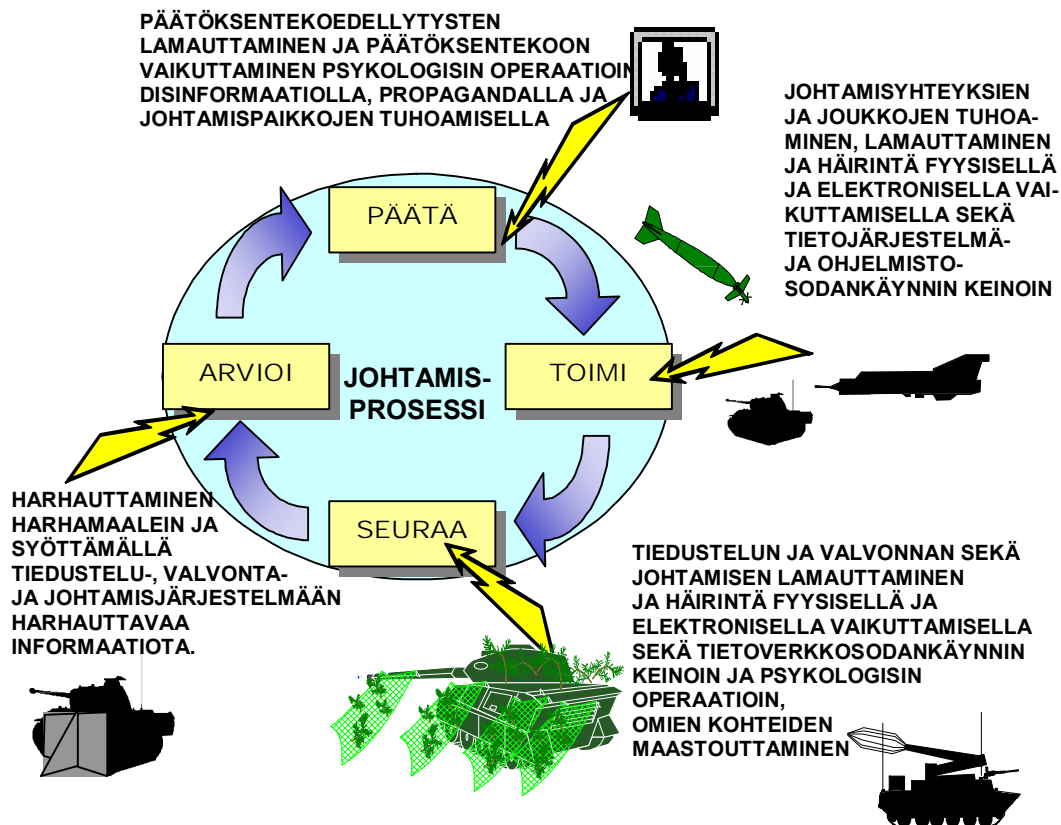
Kuva 5: Johtamissodankäynnin perusfilosofia käy selvästi ilmi yllä kuvatusta neliportaisesta toimintamallista.

Digitaalinen taistelukenttä kulminoituu reaaliaikaisen ja luotettavan tilannekuvan luomiseen, ylläpitämiseen ja jakamiseen. Tilannekuva kerätään eri asejärjestelmiltä, sensoreilta ja johtamislaitteistoilta. Se jalostetaan eri tarkoituksia varten tarvittaviin muotoihin sekä jaetaan asejärjestelmiin ja yhteiskäyttöisiin tietokantoihin, joista se on kaikkien tarvitsijoiden saatavilla. Tämä antaa kaikille taisteluun osallistuville mahdollisuuden kerätä tarvitsemansa tiedot ja siten saavuttaa käsitys siitä mitä heidän ympärillään tapahtuu, minkälaisia suunnitelmia heihin liittyen on tehty ja millaisia uhkia on odotettavissa. Tilannekuva kyetään välittämään reaaliaikaisesti alustan (ajoneuvo, asejärjestelmä tai taistelija) sisällä ja lähes reaaliaikaisesti alustojen välillä. Joissakin tapauksissa tilannekuva voidaan välittää reaaliaikaisesti myös lähellä toisiaan sijaitsevien alustojen tai taistelijoiden välillä.

Tilannetietoisuudella tarkoitetaan (riittävän) reaaliaikaista tilannekuva, joka luodaan yhdistämällä eri tietolähteistä saatava informaatio ja jakamalla siitä tehtävät koosteet sekä johtopäätökset tarvitseville reaaliaikaisesti. Jaettavan ja esitettävän informaation määrä, laatu, luokitus ja esitystapa on sovitettu kullekin johtajalle ja järjestelmälle. Olennaista on tilannekuvan jakaminen kaikille tarvitsijoille yhteisestä informaatiosta aina komentajasta etulinjan taistelijaan ja asejärjestelmään saakka.

Järjestelmistä saatavien tietojen yleiskäyttöisyys tarjoaa mahdollisuuden fuusioida eri sensoreista saatavat vihollistiedot ja siten parantaa sekä paikantamisen tarkkuutta että havainnoista tehtävien johtopäätösten luotettavuutta. Tiedot omien joukkojen sijainnista ja tehtävästä, tehdyistä ja suunnitteilla olevista liikkeen estämis- ja edistämistoimenpiteistä, tulisuunnitel-

mista sekä maastosta, ti verkosta yms. ovat kaikkien niitä tarvitsevien käytössä riittävän reaaliaikaisesti. Tiedot käyttöönsä saava yksikkö tai johtaja kykenee siten muodostamaan selkeän käsityksen siitä, mitä hänen ympärillään parhaillaan tapahtuu, ja mitä on odotettavissa sekä mitä tukea hän voi pyytää taistelunsa suorittamiseen.



Kuva 6: Sotilasjohtamisen päätöksentekoprosessi ja vaikutuskeinot siihen.

Tietoisuus ympäröivästä taistelutilasta, vihollisesta, omista joukoista sekä tukevista järjestelmistä edellyttää taistelukentällä olevien sensoreiden ja informaatiolähteiden laajamittaista hyväksikäyttöä kokonaisuuden hyväksi (ei siis pelkästään niiden järjestelmien hyväksi, joiden osana kyseiset sensorit yms. ovat). Tarvittavat tiedot on kyettävä keräämään liikkuvilta järjestelmiltä ja tehdyt koosteet sekä johtopäätökset on kyettävä jakamaan tarvitsijoille myös näiden ollessa liikkeessä. Tämä edellyttää liikkeessä toimivaa viestijärjestelmää sekä kaikkien taistelukentän osajärjestelmien täydellistä integroitumista yhdeksi eheäksi kokonaisuudeksi.

ELEKTRONINEN SODANKÄYNTI

Tämän kirjan keskeinen teema on elektroninen sodankäynti, mikä myös määrittelee lähestymistavan eri teknologioihin. Tämän vuoksi seuraavassa käydään tiivistetysti läpi elektronisen sodankäynnin eri osa-alueet. **Elektroninen sodankäynti** (EW, Electronic Warfare) tarkoittaa sähkömagneettisen spektrin hyväksikäyttöä oman sodankäynnin edistämiseen ja vihollisen sodankäynnin edellytysten heikentämiseen. Sähkömagneettista spektriä hyväksikäyttävät tiedustelu-, valvonta-, johtamis- ja asejärjestelmät eivät sinänsä ole osa elektronista sodankäyntiä. Elektronisesta sodankäynnistä on kyse silloin, kun sähkömagneettisen spektrin

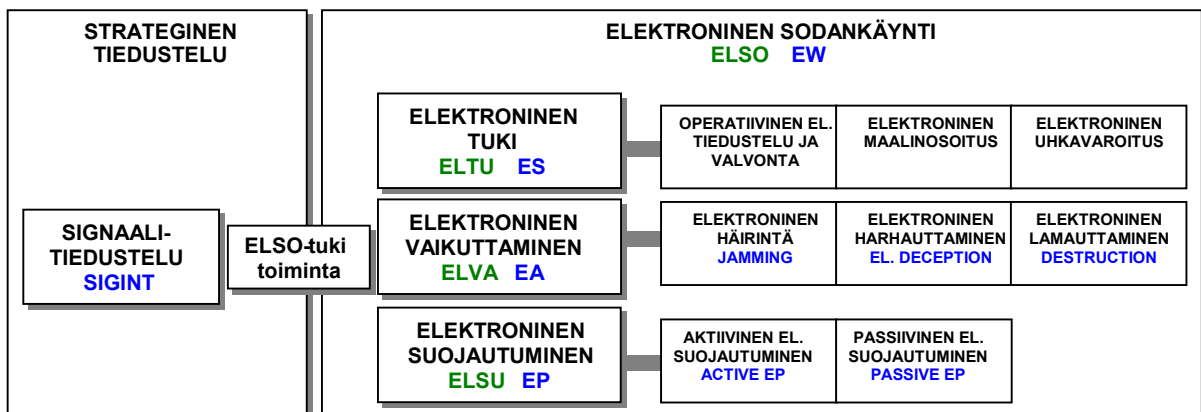
avulla pyritään edistämään tai haittaamaan näiden järjestelmien toimintaa tai saamaan niistä tietoja.

Elektroninen sodankäynti (ELSO, engl. Electronic Warfare, EW) on sähkömagneettista säteilyä käyttävien tai lähettävien järjestelmien tiedustelua ja valvontaa ja niihin vaikuttamista sekä suojautumista näiden järjestelmien vaikutuksilta. Elektronisen sodankäynnin tavoitteena on

- 1) **hankkia passiivisin menetelmin sähkömagneettisen spektrin kautta tietoa** vihollisen joukoista ja järjestelmistä tilannekuvan muodostamiseksi, maalien paikantamiseksi sekä uhkavaroituksen antamiseksi omille joukoille välittömästi uhkaavista vaaroista
- 2) **lamauttaa ja hidastaa** vihollisen tiedustelua, valvontaa, johtamistoimintaa sekä ase- ja omasuojajärjestelmien käyttöä **häiritsemällä** tai **estämällä** sähkömagneettisen spektrin käyttöä, **harhauttamalla** sensoreita sekä **lamauttamalla** elektronisia järjestelmiä ja
- 3) **suojata** omat joukot ja niiden järjestelmät **estämällä** tai **harhauttamalla** vihollista saamasta tietoa niiden määrästä, sijainnista, liiketilasta, käyttötavasta ja -aikeista sekä teknisistä ja toiminnallisista ominaisuuksista sekä **valvomalla** omaa sähkömagneettisen spektrin käyttöä.

Kuva 7: Puolustusvoimien elektronisen sodankäynnin määritelmä.

Elektroninen sodankäynti jakautuu (1) elektroniseen tukeen, (2) elektroniseen vaikuttamiseen ja (3) elektroniseen suojautumiseen. Elektroniseen sodankäyntiin liittyy lisäksi elektronisen tiedustelun muodossa signaalitiedustelu (SIGINT, Signals Intelligence), jonka Suomessa ei kuitenkaan katsota olevan osa ELSOa. Signaalitiedustelulla kerätään tietoja sekä strategisen tiedustelun, että elektronisen sodankäynnin tarpeisiin. Lisäksi signaalitiedustelussa käytetään samoja menetelmiä ja osin jopa samoja järjestelmiä kuin elektronisessa tiedustelussa ja valvonnassa, joten SIGINT:n ryhmittäminen ELSOn ulkopuolelle kuvaa pikemminkin asioiden organisoimista ja tiedon hyödyntämiskohdetta kuin asian teoreettista tai konseptuaalista olemusta.



Kuva 8: Elektronisen sodankäynnin jakautuminen eri osa-alueisiin suomalaisten määritelmien mukaan.

Elektroniseen sodankäyntiin liittyy läheisesti myös **Paikantamis- ja navigointisodankäynti (Navigation Warfare, NAVWAR)**, joka käsittää pääosin elektronisen sodankäynnin keinoin toteutettavan paikantamisjärjestelmien häirinnän ja lamauttamisen sekä näiltä suojautumisen.

Edellä tehty elektronisen sodankäynnin jako ei ole ainoa. Julkisuudessa esiintyy useita erilaisia ja keskenään ristiriitaisia määritelmiä. Joskus elektroninen vaikuttaminen on nähty yhtenä asevaikutuksen muotona siinä missä räjähdekranaateinkin tehty hyökkäys. Elektroninen tiedustelu voidaan nähdä osana muuta tiedustelua eikä elektronisena sodankäyntinä. Tällaisella näkökannalla halutaan yleensä korostaa elektronisen sodankäynnin täydellistä integroitumista osaksi muuta sodankäyntiä. Toisaalta joissakin yhteyksissä esimerkiksi tutkahakuiset ohjukset on nähty yhtenä elektronisen sodankäynnin muotona. Tällöin käsite elektroninen sodankäynti on laajennettu koskemaan myös fyysistä asevaikutusta.

Signaalitiedustelu

Signaalitiedustelu (Signals Intelligence, SIGINT) on strategiseen tiedusteluun liittyvää vihollisen sähkömagneettisiin signaaleihin kohdistuvaa tiedustelua, jonka tarkoituksena on havaita vihollisen sähkömagneettisen spektrin käyttö, analysoida, luokitella ja tunnistaa vihollisen läheteet sekä luokitella, tunnistaa, yksilöidä ja paikantaa vihollisen elektroniset järjestelmät ja assosoida havaitut läheteet joukkoihin tai järjestelmiin. Signaalitiedustelun antamia tietoja käytetään yhtenä tiedustelulähteenä vihollistilannekuvan muodostamiseen, uhkavaroitukseen, omien vastatoimenpiteiden valmistelemiseen sekä omien hyökkäystoimenpiteiden vaikutuksen arvioimiseen. Signaalitiedustelusta ja elektronisesta tiedustelusta voidaan sen kohteen perusteella käyttää nimityksiä elektroninen mittaustiedustelu ja elektroninen viestitiedustelu. **Elektroninen mittaustiedustelu** (Electronic Intelligence, ELINT) on vihollisen sensori- ja navigointisignaaleihin sekä muihin viestijärjestelmiin kuulumattomiin signaaleihin kohdistuvaa elektronista tiedustelua ja valvontaa. **Elektroninen viestitiedustelu** (Communications Intelligence, COMINT) on vihollisen viestisignaaleihin kohdistuvaa elektronista tiedustelua ja valvontaa. Signaalitiedusteluun voidaan katsoa kuuluvaksi myös hajasäteilytiedustelu ja telemetriatiedustelu. **Hajasäteilytiedustelu** (Radiation Intelligence, RINT) on vihollisen elektronisten ja sähköisten järjestelmien haja- ja vuotosäteilyyn kohdistuvaa elektronista tiedustelua ja valvontaa. **Telemetriatiedustelu** (Telemetry Intelligence, TELINT) tarkoittaa vihollisen järjestelmien ja laitteiden tutkimus-, kehitys- ja käyttövaiheisiin liittyvien mittaus- ja raportointilaitteiden läheteiden sieppaamista ja analysointia.

Signaalitiedustelu ei yleensä ole luonteeltaan reaaliaikaista, eli sen tulokset eivät ole välittömästi käytettävissä. Suomalaisessa käsitemaailmassa signaalitiedustelun liityntä elektroniseen sodankäyntiin toteutuu ELSO-tukitoiminnassa (EW Support), joka käsittää signaalitiedustelun avulla tuotettujen signaalikirjastojen muokkauksen lähetinkirjastoiksi, ELSO-järjestelmien parametroidin (evästyksen) ja operaatioiden tuen parametritietojen avulla.

Elektroninen tuki

Elektroninen tuki (ELTU, engl. Electronic Support, ES) tuottaa elektronisten läheteiden ilmaisun ja mahdollisesti myös suuntimisen perusteella tilannekuvaa tai sitä täydentäviä tietoja. Se on reaaliaikaista tiedustelua ja valvontaa, joka kohdistuu vihollisen lisäksi omien joukkojen ja niiden toimintaympäristön sähkömagneettista säteilyä käyttäviin järjestelmiin. Elektroninen tuki jakautuu

- 1) operatiiviseen elektroniseen tiedusteluun ja valvontaan
- 2) elektroniseen maalinosoitukseen
- 3) elektroniseen uhkavaroitukseen.



Kuva 9: Elektroninen tuki tuottaa elektronista tilannekuvaa taistelun johtamisen tueksi sekä osoittaa tärkeimpiä maaleja tulenkäytölle. Kuvassa saksalainen COMINT-järjestelmäajoneuvo. [EADS ewation]

Operatiivinen elektroninen tiedustelu ja valvonta on vihollisen, omien joukkojen ja mahdollisten kolmansien osapuolten sensori-, navigointi- ja viestijärjestelmiin kohdistuvaa tiedustelua ja valvontaa, jonka tavoitteena on reaaliaikaisen elektronisen tilannekuvan luominen ja ylläpito sekä elektronisen maalinosoituksen ja uhkavaroituksen tukeminen. **Elektroninen maalinosoitus** on reaaliaikaista maalien etsintää ja paikantamista, jonka tavoitteena on asejärjestelmän tarvitsevan maalitiedon tuottaminen. **Elektroninen uhkavaroitus (Threat Warning)** tarkoittaa järjestelmiä, joiden avulla voidaan havaita, paikantaa ja tunnistaa omiin järjestelmiin välittömästi kohdistuva tiedustelu, häirintä ja asevaikutusuhka ja joiden antamien tietojen perusteella voidaan optimoida omat vastatoimet. Elektroninen uhkavaroitus muodostaa yleensä osan kohteiden omasuojajärjestelmää. **Uhkavaroittimilla** tarkoitetaan järjestelmiä, joiden avulla voidaan havaita, paikantaa ja tunnistaa omiin järjestelmiin välittö-

mästi kohdistuva tiedustelu ja asevaikutusuhka ja joiden antamien tietojen perusteella voidaan optimoida omat vastatoimet. Uhkavaroittimet jaetaan aktiivisiin ja passiivisiin. Ne ovat osa ajoneuvojen, lentokoneiden sekä muiden kohteiden omasuojajärjestelmää. **Aktiivisia uhkavaroittimia** ovat esimerkiksi omasuojajärjestelmien millimetriaaltotutka ja lasertutka. **Passiivisia uhkavaroittimia** ovat esimerkiksi omasuojajärjestelmien laservaroitin (LWR, Laser Warning Receiver), tutkavaroitin (RWR, Radar Warning Receiver) ja ohjusvaroitin (MAW, Missile Approach Warner). Elektroninen tukitoiminta on luonteeltaan reaaliaikaista ja taistelun välittömään tukemiseen liittyvää.

Elektroninen vaikuttaminen

Elektroninen vaikuttaminen (EA, Electronic Attack) tarkoittaa hyökkäyksellisiä toimenpiteitä, joilla pyritään heikentämään vihollisen toimintakykyä vaikuttamalla sen elektronisiin järjestelmiin. Elektronisella vaikuttamisella pyritään estämään, hidastamaan tai vähentämään vihollisen sähkömagneettista säteilyä hyödyntävien tai elektroniikasta riippuvien järjestelmien käyttöä.

Elektroninen vaikuttaminen jakautuu

- (1) elektroniseen häirintään
- (2) elektroniseen lamauttamiseen
- (3) elektroniseen tuhoamiseen
- (4) elektroniseen harhauttamiseen.

Elektronisella häirinnällä vaikeutetaan tai estetään vihollisen kykyä hyödyntää sähkömagneettista spektriä. Elektroninen häirintä kohdistuu aina järjestelmien vastaanottimiin. Häirintä voi olla luonteeltaan estävää tai harhauttavaa. Estävällä häirinnällä pyritään vaikeuttamaan vihollisen kykyä vastaanottaa tietoa sähkömagneettisesta spektristä. Harhauttavalla häirinnällä pyritään vaikuttamaan viholliseen niin, että se tekisi vastaanottamansa sähkömagneettisen säteilyn perusteella vääriä johtopäätöksiä joukkojen ja laitteiden sijainnista, liikeradasta yms. seikoista. Häirintä voidaan jakaa myös tukihäirintään (stand-off jamming), saattohäirintään (escort jamming) ja lähihäirintään (stand-in jamming).

Elektroninen lamauttaminen tarkoittaa vihollisen elektronisten laitteiden toimintakyvyn heikentämistä kohdistamalla niihin sähkömagneettista energiaa. Lamauttaminen on luonteeltaan tilapäistä, eikä se aiheuta suoraan vihollisen järjestelmään pysyviä vaurioita. Välillisesti pysyviä vaurioita voi syntyä esimerkiksi silloin, kun sensori- tai ohjausjärjestelmän lamauttaminen johtaa ajoneuvon törmäykseen tai ohjuksen maahan syöksymiseen. Elektronisen häirinnän ja lamauttamisen erona on se, että edellinen kohdistuu vastaanottimiin ja sillä pyritään estämään vihollisen kykyä vastaanottaa tietoa sähkömagneettisesta spektristä, kun taas lamauttamisella sen sijaan pyritään vaikuttamaan itse laitteen sisäiseen toimintakykyyn.



Kuva 10: E6 Prowler -häirintäkone nousemassa lentoon. Elektroninen häirintä on tehokainta ilmasta suoritettuna, jolloin häirintäsignaali vaimenee huomattavasti vähemmän kuin maan pinnan läheisyydessä edetessään. [Lockheed Martin UK]

Elektronisella tuhoamisella pyritään aiheuttamaan vihollisen elektroniikan laitteisiin pysyviä vaurioita kohdentamalla niihin niin suuri sähkömagneettinen energia, että laitteiden elektroniset komponentit vaurioituvat. Elektronisessa tuhoamisessa voidaan käyttää esimerkiksi sähkömagneettista pulssia (EMP, Electro-Magnetic Pulse) tai suurtehomikroaaltopulssia (HPM, High Power Microwave).

Elektroninen harhauttaminen tarkoittaa aktiivisia hyökkäyksellisiä toimenpiteitä, joilla pyritään syöttämään viholliselle vääriä tietoja omien järjestelmien ja joukkojemme määrystä, sijainnista, liikkeestä, aikeista ja teknisistä ominaisuuksista. Elektronisella harhauttamisella vaikeutetaan ennen kaikkea vihollisen tiedustelutoimintaa, mutta sillä voidaan pyrkiä myös vaikuttamaan vihollisen johtamistoimintaan lähettämällä harhauttavia sanomia ja käskyjä vihollisen komentoverkkoon.

Elektroninen suojautuminen

Elektroninen suojautuminen (EP, Electronic Protection) tarkoittaa toimenpiteitä, joilla pyritään takaamaan omien elektronisten järjestelmien toimintakyky ja joilla vaikeutetaan vihollisen tiedustelutoimintaa. Elektroninen suojautuminen on siten luonteeltaan puolustuksellista.

Elektroninen suojautuminen jakautuu

- (1) aktiiviseen elektroniseen suojautumiseen
- (2) passiiviseen elektroniseen suojautumiseen
- (3) joidenkin tahojen käsityksen mukaan lisäksi uhkavaroittimiin

Aktiivisella elektronisella suojautumisella tarkoitetaan kaikkia niitä aktiivisia toimia, joilla pyritään peittämään omien elektronisten järjestelmien toiminta, takaamaan niiden toimintakyky vihollisen niihin kohdentaman elektronisen vaikutuksen alaisena ja joilla pyritään estämään niihin kohdistuva vihollisen asevaikutus. Aktiivisia elektronisen suojautumisen keinoja ovat (1) omasuojahäirintä, (2) suojaheitteiden käyttö, (3) suojaava harhauttaminen ja (4) järjestelmien toimintaparametrien muuttaminen uhkatilanteen mukaisesti. **Omasuojahäirintä** voi kohdistua uhkaavan asejärjestelmän komentolinkkiin tai sensoriin. Suojaheitteitä ovat erilaiset savut, soihdut ja silput, joilla pyritään peittämään suojattava kohde ja haittaamaan vihollisen asejärjestelmän sensorin tai maalinosoitusjärjestelmän toimintaa. **Suojaava harhauttaminen** tarkoittaa omien läheteiden peittämistä tai aktiivisten valemaalien käyttöä. **Järjestelmien toimintaparametrien**, kuten lähetysteho, taajuushypintänopeus, modulointinopeus jne., **muuttamisella uhkatilanteen mukaisesti** mahdollistetaan järjestelmän toimintakyky muuttuvassa uhkatilanteessa.

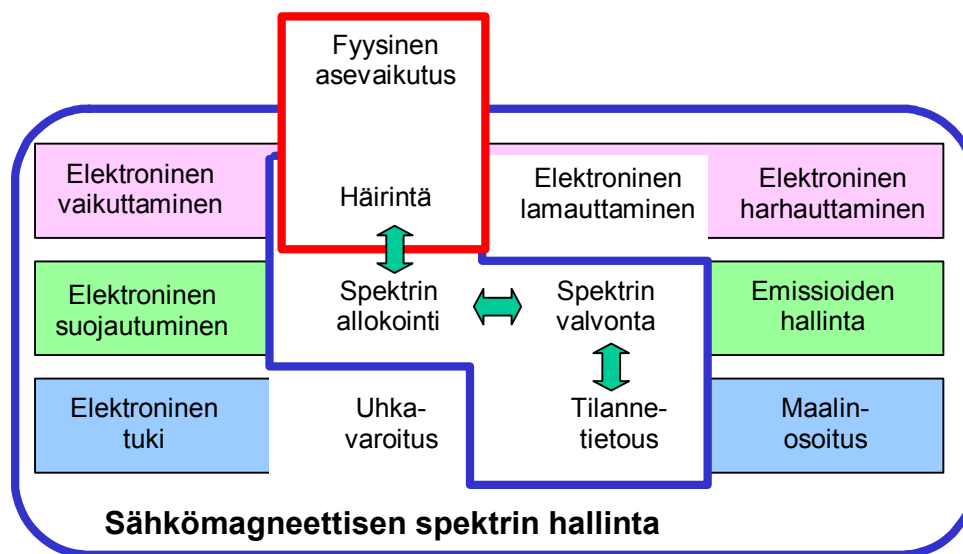
Passiivisella suojautumisella (Passive Electronic Protection) tarkoitetaan järjestelmien suunnittelua ja käyttöä siten, että elektronista uhkaa erikseen havaitsematta haitataan tai estetään vihollisen suorittamaa tiedustelua, valvontaa, tai vaikuttamista. Suojautumistoimenpiteet jakautuvat taktisiin, toiminnallisiin ja teknisiin keinoihin. Passiivinen elektroninen suojaus jakautuu (1) emissioiden hallintaan, (2) taajuushallintaan, (3) elektroniseen vahvistamiseen, (4) häivemenetelmiin, (5) hajauttamiseen, (6) harhauttamiseen ja (7) liikkuvuuteen. **Emissioiden hallinnalla** (emission control) tarkoitetaan omien järjestelmien toiminnallisten ja tahattomien sähkömagneettisten emissioiden tuntemista ja minimoimista siten, että minimoidaan vihollisen mahdollisuudet havaita, analysoida, luokitella, tunnistaa, yksilöidä ja paikantaa järjestelmiämme sekä estetään järjestelmiämme vastaan kohdistuvien vastatoimien optimoimista. **Elektroninen vahvistaminen** (electronic hardening) tarkoittaa keinoja, joilla pyritään takaamaan omien elektronisten järjestelmien toimintakyky vihollisen niihin sähkömagneettisen spektrin avulla kohdistaman uhan alaisena. **Häivemenetelmillä** (stealth measures) pyritään minimoimaan suojattavien kohteiden emittoiman ja heijastaman säteilyn erot taustaansa nähden kaikilla sähkömagneettisen spektrin alueilla, kuten radio- ja tutkataajuuksilla, infrapuna-aallonpituuksilla sekä näkyvän valon ja ultraviolettisäteilyn alueella. Minimoitavia eroja ovat kohteen ja taustan välinen kontrasti, ääriwiivojen luonne sekä pinnan kuviointi. **Hajauttamisella** (decentralisation) tarkoitetaan järjestelmien fyysistä ja toiminnallista hajauttamista siten, että järjestelmäkokonaisuuden toimivuus ei riipu yhden tai muutaman yksittäisen laitteen tai toiminnon toimivuudesta. Suojatoimenpiteeksi käytettävällä **harhauttamisella** (deception) tarkoitetaan järjestelmien sijainnin, liikkeen ja spektrin käytön peittämistä fyysisin harhamaalein ja sähkömagneettisin harhalähettein sekä järjestelmien käyttöasteen ja käyttötarkoituksen peittämistä harhauttavien lähetein. Suojaavalla harhauttamisella pyritään estämään järjestelmien kriittisten osien paljastuminen ja paikantaminen sekä vaikeuttamaan vihollisen asejärjestelmien maalin valintaa ja aseiden maaliin hakeutumista. **Liikkeellä** tarkoitetaan järjestelmien fyysistä ja toiminnallista kykyä suorittaa useita nopeita asemapaikan vaihtoja, kykyä aloittaa toiminta uudessa asemapaikassa välittömästi liikkeen päättymisen jälkeen, kykyä lähteä liikkeelle välittömästi toiminnan asemapaikassa päätyttyä sekä järjestelmien kykyä toimia liikkeessä. Liikkeen tavoitteena on haitata vihollisen tiedustelutoimintaa sekä vähentää järjestelmiä vastaan kohdistuvaa asevaikutusta vaihtamalla asemapaikkoja riittävän usein. Liikettä pidetään yhtenä merkittävimmistä suojakeinoista nykyaikaisella taistelukentällä.

Johtamisessa teknisten apuvälineiden merkitys on kasvanut olennaisesti ja informaatioidonkäynnissä johtamista tukevien tieto- ja tietoliikennejärjestelmien rooli on keskeinen. Elektronisen sodankäynnin painopisteenä tulee olemaan vastustajan johtamisedellytysten lamautta-

minen sekä omien johtamisjärjestelmien toiminnan edistäminen. Koko johtamisjärjestelmä joutuu vihollistoiminnan primääriseksi kohteeksi. Vihollinen pyrkii paikantamaan viesti- asemat ja johtamispaikat radiotaajuisten paikannuksen, lennokki- ja kaukotähystysjärjestelmien sekä tiedustelulentokoneiden avulla. Esimerkiksi lennokkien avulla voidaan sekä etsiä ja paikantaa maaleja että johtaa epäsuoraa tulta tai aloittaa elektroninen häirintä niitä vastaan. Elektronisen suuntimisen uudet menetelmät ja niiden tarkkuus sekä nopeus riittävät usein tulenkäytön aloittamiseen havaittuja maaleja vastaan koko taktisessa ja jopa operatiivisessa (30-100 km) syvyydessä.

Sähkömagneettisen spektrin kokonaishallinta

Elektronisessa sodankäynnissä on kyse sähkömagneettisen spektrin hallitsemisesta – omien joukkojen ja järjestelmien spektrin käyttö on mahdollistettava ja vastustajan kykyä käyttää sähkömagneettista spektriä hyväkseen on kyettävä heikentämään. Nämä vaatimukset ovat toisinaan ristiriitaisia: vihollisen järjestelmien häirintä saattaa vaikuttaa omien joukkojen toimintakykyyn, mikäli niiden järjestelmät toimivat samalla taajuuskaistalla. Toisaalta omien taajuuksien käytössä on jo etukäteen otettava huomioon mahdolliset tulevat tarpeet häiritä näitä taajuuksia. Tämä tieto puolestaan saadaan etukäteen signaalitiedustelulta ja taistelujen aikana reaaliaikaisesti elektroniselta tuelta.



Kuva 11: Sodankäynnissä sähkömagneettinen spektri on hallittava integroituna kokonaisuutena.

Perinteisesti viesti- tai teletoimialan vastuulla ollut taajuushallinta ja operatiivisen alan vastuulla oleva elektroninen sodankäynti sisältävät samoja toimintoja: taajuushallinta allokoit käyttäviä taajuuksia, elektroninen suojaus pyrkii osoittamaan käyttöön taajuuksia ja toimintamoodeja, joilla toiminta vihollisen tiedustelu-, valvonta-, maalinosoitus- ja häirintä-uhkan alla on mahdollista. Taajuushallinta pyrkii valvomaan omien joukkojen taajuuksien käyttöä allokointi- ja käyttökonfliktien havaitsemiseksi. Elektroninen tuki puolestaan pyrkii muodostamaan kokonaistilannekuvaa riippumatta siitä onko informaation lähde vihollisen tai oma järjestelmä. Elektronisella vaikuttamisella pyritään estämään vihollisen järjestelmien kykyä käyttää sähkömagneettista spektriä. Vaikuttamisessa on otettava huomioon paitsi se, miten vihollisen operatiivinen kyky tietyistä spektrin osista riippuu, myös se, että häiritsemällä voidaan samalla estää tai haitata omaa kykyä hyödyntää spektriä sekä oman

tiedustelujärjestelmän toimintaa. On kyettävä tarvittaessa reaaliaikaisesti arvottamaan onko häirinnän antama lisäarvo omalle operaatiolle merkittävämpi kuin vaikkapa joidenkin omien tiedustelu- tai johtamisjärjestelmien lamautumisen aikaansaama suorituskyvyn heikkeneminen. Edellä kuvattujen sidosten ja reaaliaikavaatimusten vuoksi perinteinen jako taajuushallinnan ja elektronisen sodankäynnin välillä ei enää toimi. Taajuuksien allokoinnin on oltava reaaliaikaista ja perustuttava omien joukkojen elektronisen suojan tarpeeseen, elektronisen tuen antamiin tilanne- ja vihollistietoihin ja omaan tiedustelu- ja häirintätarpeeseen. Tämän vuoksi kaikki sähkömagneettisen spektrin hallintaan liittyvät toiminnot ja voimavarat on keskitettävä samaan organisaatioon.

DIGITAALINEN TAISTELUKENTTÄ

Taistelukentän elektroniset järjestelmät ovat digitaalitekniikkaan pohjautuvia. Käytössä olevat ja lähitulevaisuudessa toteuttavat järjestelmät perustuvat elektroniseen binäärilogiikkaan ja sen mahdollistamaan tiedon käsittelyyn, siirtoon ja varastointiin. Digitaalitekniikka on mahdollistanut aseiden, ammusten, tiedonsiirtojärjestelmien yms. taistelukentän olennaisen osatekijöiden älykkyyden kasvattamisen ja sitä myötä järjestelmien ja järjestelmäkokonaisuuksien tehon lisäämisen. Järjestelmien elektroniikkaan investoimalla on niiden tehoa voitu lisätä hyvin kustannustehokkaasti.

Integroitua koko yhtymän kattavaa kaikkia digitaalisia järjestelmiä hyväksikäyttävää reaaliaikaisesti tietoja keräävää ja hyödyntävää kokonaisuutta kutsutaan digitaaliseksi taistelukentäksi. Järjestelmäintegraatio digitaalisella taistelukentällä on siten ennen kaikkea horisontaalista, eli erityyppisten ja eri tarkoituksiin käytettävien järjestelmien keskinäistä integroimista.

Kokonaisuuden digitalisoinnista ja integroinnista saatavat suurimmat hyödyt ovat:

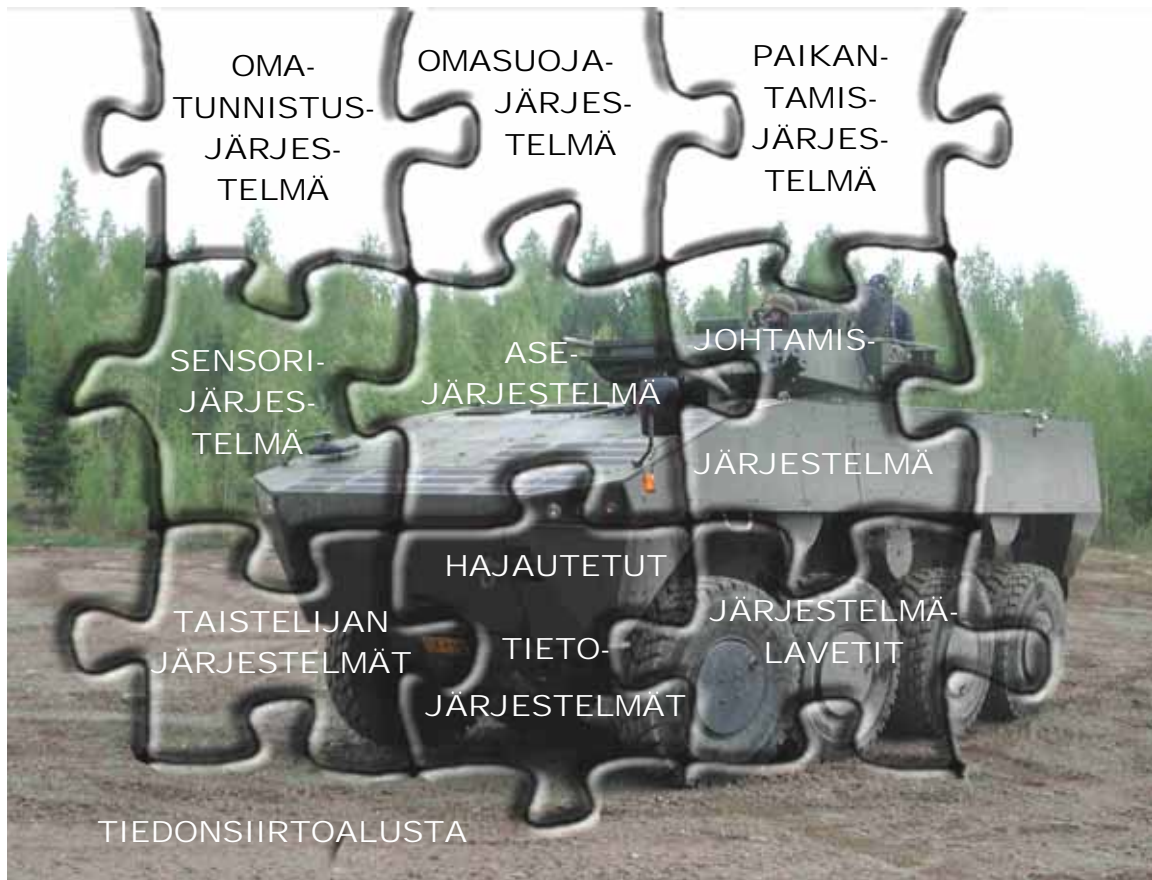
- yleiskäyttöinen taistelukentän reaaliaikainen tilannekuva ja jaettu tilannetietämys eri osajärjestelmien kesken
- mahdollisuus keskittää joukot ja tulenkäyttö oikeaan aikaan oikeaan paikkaan
- nopea tiedonvälitys eri järjestelmien, johtoportaiden ja yksilöiden välillä
- valvonta-, tiedustelu- ja asejärjestelmätietojen nopea automaattinen fuusiointi, korrelointi, jakelu ja esittäminen kaikille johtamistasoille
- nopea maalinosoitustietojen välitys sensoreilta asejärjestelmille.

Digitalisoidulla joukolla on perinteisesti toimivaan vastustajaansa nähden olennaisesti paremmat kyvyt eloonjäämiseen. Tällainen joukko kykenee hyödyntämään kaikkia taistelukentällä aukeavia mahdollisuuksia ja välttämään odottamattomia riskejä. Se kykenee nopeampaan ja tarkempaan tulenkäyttöön sekä ainakin jossain määrin välttämään itseensä kohdistuvan tulen. Kokonaisuuden digitalisoinnin ja integroimisen ongelmina on spektrin hallinnan tarve ja eheän kokonaisuuden muodostamisen edellyttämä tekninen harmonisointi ja järjestelmäkonfiguraation hallinta. Lisäksi täysin integroidussa järjestelmässä saattaa esiintyä odottamattomia järjestelmien välisiä riippuvuuksia, jotka lisäävät kokonaisuuden haavoittuvuutta.

Digitaalisen taistelukentän rakenneosat

Digitaalinen taistelukenttä muodostuu seuraavista peruselementeistä:

- Taistelukentän elektroniset osakokonaisuudet yhdistävä, lähes reaaliaikaiseen tiedonvälitykseen kykenevä tietoliikennealusta.
- Integroidut älykkäät sensori-, ase-, omatunnistus-, omasuoja- ja johtamisjärjestelmät.
- Miehitetyt ja miehittämättömät tiedustelu-, valvonta-, johtamis- ja asejärjestelmäalustat.
- Hajautetut tietojärjestelmät.
- Edellisten avulla luotu tilannetietoisuus ja taistelutilan hallinta.



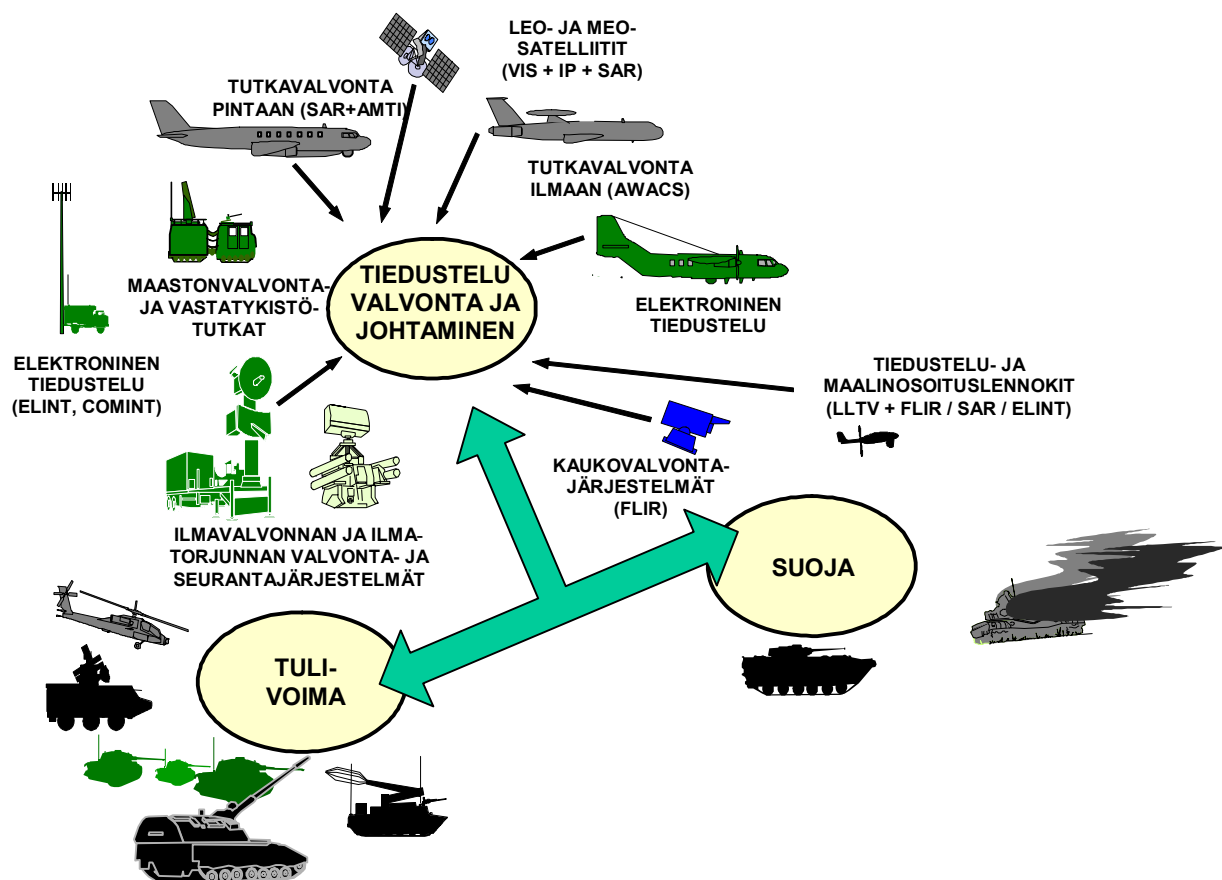
Kuva 12: Digitaalisen taistelukentän osat muodostavat toisiaan tukevan kokonaisuuden, keskeistä on määrittellä kokonaisarkkitehtuuri siten, että siihen kuuluvat eri järjestelmät muodostavat keskenään yhteistoimintaan kykenevän kokonaisuuden. Häirintää ja tiedustelua sekä asevaikutusta sietävän tiedonsiirtoalustan merkitys on keskeinen.

Järjestelmien järjestelmä

Digitaalinen taistelukenttä muodostuu useista toisiinsa kytketyistä järjestelmistä, jotka yhdessä muodostavat järjestelmien järjestelmän (SoS, System of Systems). Järjestelmien järjestelmä koostuu riippumattomista ja itsenäiseen toimintaan kykenevistä järjestelmistä, joiden maantieteellinen etäisyys toisistaan rajoittaa järjestelmien välisen yhteistoiminnan informaation vaihtoon. Tämän informaationvaihdon vuoksi järjestelmien järjestelmän suorituskyky on suurempi kuin sen osajärjestelmien suorituskyvyn summa. Järjestelmien järjestelmä on

luonteeltaan evolutionaarinen, eli se kehittyy jatkuvasti, mutta ilman tarkkaa etukäteissuunnitelmaa. Koska se perustuu verkottuneiden itsenäisten järjestelmien hyväksikäyttöön, sodankäynnistä digitaalisella taistelukentällä on alettu puhua myös termillä *verkkokeskeinen sodankäynti* (Network-Centric Warfare).

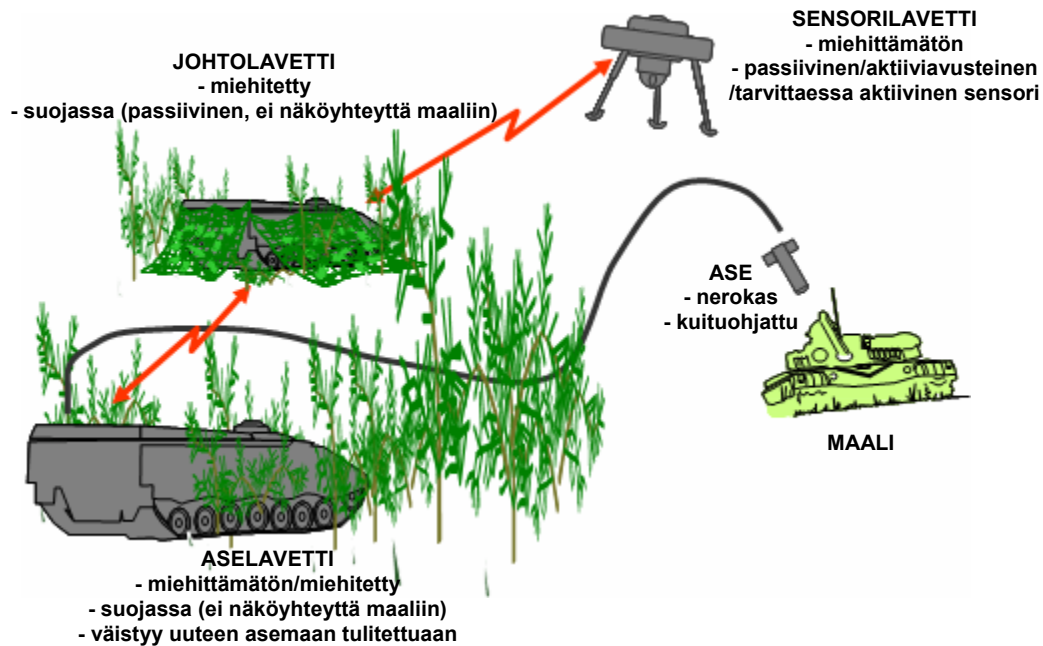
Järjestelmien järjestelmän ja verkkokeskeisen sodankäynnin periaatteet pätevät operatiiviselta tasolta, taktiselle ja taistelutekniselle tasolle. Kyseessä on siten pikemminkin konsepti kuin järjestelmä. Operatiivisella tasolla verkkokeskeinen sodankäynti perustuu toisiinsa liittyvien tiedustelu-, valvonta-, johtamis-, maalinosoitus- ja asejärjestelmien muodostaman kokonaisuuden hyväksikäyttöön.



Kuva 13: Operatiivisella tasolla järjestelmien järjestelmä koostuu kolmenlaisista elementeistä: 1) tiedustelu-, valvonta ja johtaminen, 2) tulivoima ja 3) suoja. Ajatuksena on käyttää näitä tilanteen mukaisesti maksimoimaan kokonaisuuden suorituskyky.

Taisteluteknisellä tasolla hajautus ja verkkokeskeinen toiminta voi tarkoittaa esimerkiksi sensorin, ase- ja miehistön erottamista toisistaan. Sensorin on yleensä oltava näköyhteydessä maaliin, jolloin myös maali kykenee havaitsemaan sensorin. Jos sensori on asejärjestelmässä, kuten nykyisissä taistelupanssarivaunuissa, voi vihollinen havaita vaunun samalla hetkellä kun vaunu havaitsee vihollisen. Nykyisten ase- ja ammunnanhallinta-järjestelmien nopeus ja tarkkuus ovat tuovat huomattavan edun sille, joka kykenee ampumaan ensiksi. Sensori kannattaa usein sijoittaa ilmaan, jolloin se kykenee etsiytymään kulloisenkin tilanteen kannalta parhaaseen paikkaan paljastamatta kuitenkaan isäntälavettiaan. Myös asejärjestelmä saattaa kannattaa sijoittaa omalle lavetille erilleen miehistöstä, sillä ase- ja ammunnan käyttö paljastaa

lähes aina aselavetin sijainnin, ja vihollinen pyrkii käyttämään tulta sitä vastaan. Mikäli asejärjestelmä käyttää ohjattavia tai autonomisesti hakeutuvia ammuksia, senkään ei tarvitse olla näköyhteysreitillä viholliseen – ja samalla vihollisen tulilinjalla. Tällaisessa hajautetussa mallissa miehistö on aina sijoitettu suojaan: sen eri tarvitse olla näköyhteysreitillä viholliseen eikä lähellä asetta, jonka käyttö on havaittavissa vihollisen valvonta- ja omasuojajärjestelmillä. Tällöin vihollinen ei kykene havaitsemaan miehistölavetta eikä käyttämään sitä vastaan tulta. Vihollinen ei välttämättä havaitse myöskään pienikokoista sensoria, ja aseeseen se havaitsee vasta sen jälkeen kun asejärjestelmä on hyökännyt sitä vastaan, jolloin saattaa olla jo liian myöhäistä.



Kuva 14: Verkottuneen sodankäynnin konseptin soveltaminen taisteluteknisellä tasolla voi tarkoittaa esimerkiksi sensorin, miehistön ja aseiden hajauttamista.

Järjestelmien vaatimukset

Digitaalinen taistelukenttä lisää saatavan, välitettävän, prosessoitavan ja jaettavan tiedon määrää, jolloin keskeiseksi tekijäksi muodostuu informaatioylivuodon välttäminen sekä kyky käyttää hyväksi saatuja tietoja. Tietojärjestelmistä ja tilannetiedosta on oltava hyötyä, itseisarvo ne eivät saa olla. Toisaalta tiedosta, jota ei kyetä jakamaan sitä tarvitsijoille ei juuri ole hyötyä ja tällöin tietojärjestelmiin uhratut rahat ovat valuneet hukkaan. Informaatioylivuodon välttämiseksi on saatavat tiedot karsittava ja luokiteltava automaattisesti. Mitä lähempänä tiedon tuottajaa prosessointi suoritetaan, sitä vähemmän kuormitetaan koko järjestelmän pullonkaulan muodostavaa tietoliikennealustaa. Toisaalta varhaisessa vaiheessa suoritettavan karsinnan myötä osa informaatiosta katoaa. Tiedoista on tehtävä eritasoisia koosteita eri käyttäjien tarvitseman abstrahointitason aikaansaamiseksi. Informaation tuottaminen on mahdollisimman pitkälle automatisoitava, ettei käyttäjien tarvitse syöttää järjestelmään tarpeetonta tietoa.

Tiedon kerääminen ja koostaminen eivät vielä yksin riitä, sillä käyttäjien on vielä kyettävä löytämään tarvitsemansa tiedot, eli tiedot, joiden olemassaoloa, tunnistetietoja tai sijaintia he eivät ehkä edes tiedä. Myös tietojen syöttöön sekä esitystapaan ja -muotoon on kiinnitettävä

huomiota. Tällöin kuvan ja puheen tunnistus ja syntesointi saattavat hyvinkin olla kyseeseen tulevat tekniikat tiedon syöttämiseen ja tulostamiseen.

Digitaalisen taistelukentän elektronisille järjestelmille asetettavat keskeiset vaatimukset ovat:

- taistelunkesto (survivability)
- luotettavuus (reliability) ja kestävyys (durability)
- nopeus (speed)
- turvallisuus (security)
- käytettävyys (availability)
- hajautus (dispersion)
- liikkuvuus (mobility)

Edellä asetetut järjestelmävaatimukset voidaan toteuttaa vain automaattisella (automatic), saumattomalla (seamless), läpinäkyvällä (transparent) ja reaaliaikaisella (real-time) sekä kaikkien järjestelmien kesken yhteentoimivalla (interoperable) sensori-, ase-, tieto- ja tietoliikennejärjestelmällä. Näiden vaatimusten voidaan katsoa olevan sinänsä yleispäteviä kaikkiin taistelukentän elektronisiin järjestelmiin. Vaatimusten painoarvojen määrittämisessä kansalliset erot tulevat mitä selkeimmin esiin. Suhteelliset painoarvot riippuvat esimerkiksi kriisin ennustetusta pituudesta ja eskaloitumisasteesta, todennäköisestä taistelumaastosta, oletettavasta ilmaherruudesta ja tuliylivoimasta sekä arvioitavasta kyvystä hallita sähkömagneettista spektriä.

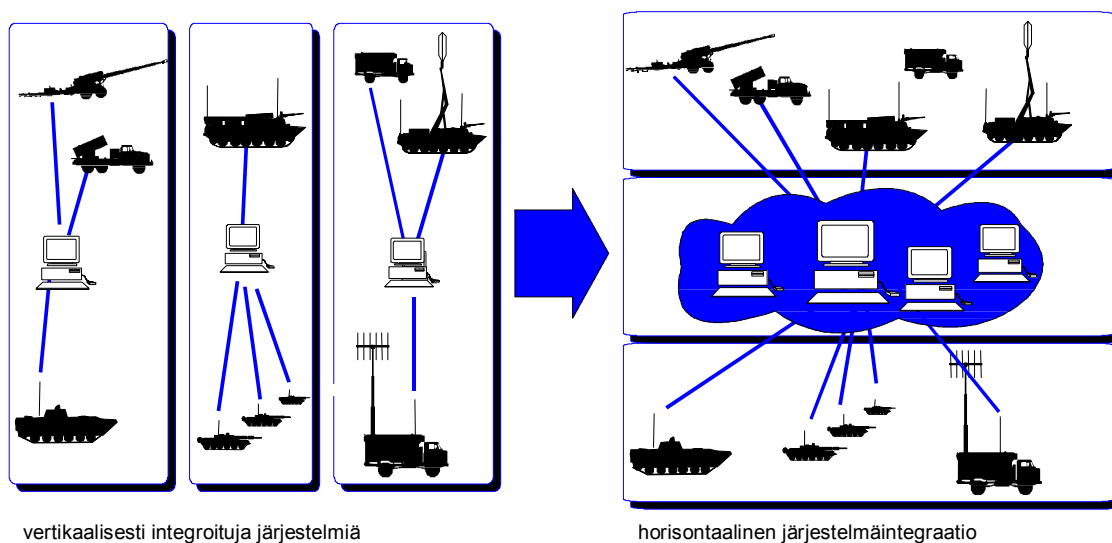
Maavoimien järjestelmien kehitystä hahmoteltaessa esiin tulevat lisäksi sitkeys, skaalautuvuus, avoimuus, käyttäjäystävällisyys, hallittavuus ja virhesietoisuus. Sitkeydellä tarkoitetaan järjestelmän asteittaista suorituskyvyn laskua tappioiden ja elektronisen lamauttamisen seurauksena; Kerralla tapahtuvaa romahdusta ei saa syntyä. Skaalautuvuus puolestaan merkitsee sitä, että järjestelmää voidaan laajentaa tai supistaa tilanteen mukaan ilman muutoksia järjestelmän rakenteeseen. Teknisenä terminä käytetään nimitystä arkkitehtuurin dynaamisuus. Myös järjestelmässä kulkevan tiedon määrä on kyettävä automaattisesti mitoittamaan järjestelmän kulloisenkin välityskyvyn mukaiseksi. Välityskapasiteetin laskiessa tietoja on kyettävä priorisoimaan siten, että välttämättömimmät tiedot kyetään välittämään luotettavasti.

Arkkitehtuurin avoimuudella tarkoitetaan sitä, että järjestelmän rakenne sallii uusien osajärjestelmien liittämisen ja liityntärajapinnat ovat standardoitu. Tällöin eri valmistajien laitteita ja ohjelmistoja kyetään liittämään olemassa olevaan infrastruktuuriin. Käyttäjäystävällisyys edellyttää uusien teknologioiden hyväksikäyttöä tiedon syöttämisessä ja tulostamisessa. Nykyisin yleisin syöttömenetelmä suoran sensoritiedon lisäksi on näppäimistö ja tulostukseen käytetään katodisäde-, LED- tai LCD-näyttöjä sekä paperia. Tulevaisuudessa puheen tunnistukseen pohjautuvan tiedon hakemisen ja syötön sekä kypäränäyttöjen ja äänisyntesoijien merkitys tulee kasvamaan. Järjestelmäkokonaisuuden hallinnalla tarkoitetaan järjestelmän eri osien tilan tuntemista sekä osien toiminnan ohjaamista kokonaisuuden toiminnan optimoimiseksi. Virhesietoisuudella tarkoitetaan yleisimmin järjestelmän kykyä havaita ja korjata tallennuksessa, siirtoprosessissa tai varastoinnissa korruptoitunut data. Lisäksi käsitettä voidaan laajentaa koskemaan vaikkapa tietoisesti tai vahingossa muutetun datan vaikutusta järjestelmään. Tietojen manipulointi väärin käsiin joutuneella laitteella ei saa uhata järjestelmäkokonaisuuden toimivuutta.

Avaintekijänä järjestelmäintegraatio

Järjestelmäintegraatiolla tarkoitetaan teknologioiden, tekniikoiden, standardien, työkalujen ja komponenttien harmonisointia eri järjestelmien, osajärjestelmien tai järjestelmäkomponenttien kesken. Ilman sitä elektroniset järjestelmät muodostavat hajanaisia saarekkeitä taistelukentällä. Yhteentoimimattomista järjestelmistä on nopeatempoisessa sodankäynnissä enemmän haittaa kuin hyötyä. Siten integraatio muodostaa avaintekijän digitaalisen taistelukentän koneiston luomisessa.

Heikko sisäinen ja ulkoinen integraatioaste merkitsee eri ase-, johtamis- ja viestiyhteysjärjestelmien keskinäistä yhteentoimimattomuutta, mikä heikentää järjestelmien tehokkuutta, käytettävyyttä ja taistelunkestoa. Tietoliikennealustan integraation lisääminen on yksi keskeisimmistä tekijöistä kehitettäessä kykyä käydä informaatio sodankäyntiä.



Kuva 15: Nykyiset ase- ja johtamisjärjestelmät tukeutuvat omiin tietojärjestelmiinsä sekä usein myös omiin viestiyhteyksiin. Siksi ne eivät juuri kykene hyödyntämään muita järjestelmiä toimintansa tueksi. Horisontaalinen järjestelmäintegraatio lisää ase- ja johtamisjärjestelmien mahdollisuuksia hyödyntää muissa järjestelmissä olevaa tietoa ja koko yhtymän alueella olevaa elektronista infrastruktuuria.

Digitaalitekniikan ja elektroniikan hyväksikäyttö erillisissä aseissa ja sensoreissa ei vielä tee taistelukentästä digitaalista. Erillisen aseiden tai tiedonsiirtovälineen tehon lisääminen ei sinänsä olennaisesti nosta kokonaisen yhtymän tehoa (tulivoimaa, liikkuvuutta yms.). Olennaista lisähyötyä järjestelmille saadaan, mikäli ne integroidaan saumattomaksi kokonaisuudeksi, jossa käytetään maksimaalisesti hyväksi eri tiedustelu-, valvonta- ja johtamisjärjestelmien sekä tulenkäyttöön liittyvien järjestelmien sisältämää tietoa sekä siitä tehtäviä johtopäätöksiä. Näin järjestelmien ja joukkojen tehoa voidaan nostaa ilman laajoja investointeja uusiin ase- ja ampumarviketeknologioihin ja tekniikoihin.

Järjestelmäintegraatio on luonteeltaan toiminnallista ja liittyy NATO:n standardisointijaotteen kahteen ensimmäiseen ryhmään:

1. Yhteensopivuus (compatibility)
2. Vaihdeavuus (interchangeability)
3. Yhtenäisyys (commonality)

Järjestelmäintegraation lisäämisen tavoitteena on yhteentoimivien rajapintojen luominen, rajapintojen tehokkaan hallinnan mahdollistaminen, järjestelmänhallinnan yhteentoimivuuden kehittäminen, luotettavuuden ja taistelunkeston parantaminen, palveluiden määrän, laadun ja saatavuuden parantaminen, järjestelmien liikkuvuuden ja dynaamisuuden parantaminen sekä ylläpitojärjestelmän yhdenmukaistaminen ja keventäminen

Integraatioasteen nostamisella voidaan pienentää järjestelmien kokoa, vähentää kustannuksia sekä lisätä luotettavuutta. Primäärinen integraatioasteen nostamisen peruste on kuitenkin yleensä järjestelmien tehokkuuden olennainen lisääminen. Vain integroidut järjestelmäkoko- naisuudet kykenevät tarjoamaan riittävän suojan, tulivoiman ja johtamisedellytykset.

SOTILASJÄRJESTELMÄN TEHOKKUUS

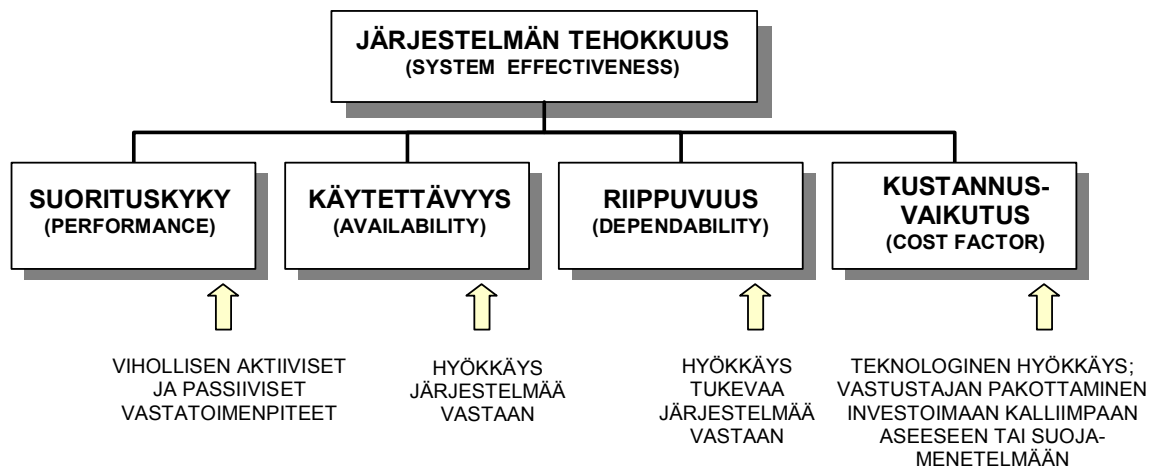
Ennen kuin siirrymme tarkastelemaan eri teknologioita ja tekniikoita sekä näistä rakentuvia järjestelmiä, on syytä tarkastella mistä järjestelmän tehokkuus muodostuu. Järjestelmän lopulliseen tehokkuuteen vaikuttaa järjestelmän suorituskyvyn (performance) lisäksi käytettävyys (availability) ja riippuvuus (dependability) ulkoisista tekijöistä, kuten muista järjestelmistä. Kuvassa 16 on esitetty yksinkertaistettu malli järjestelmän tehokkuuden määräävistä osatekijöistä. Järjestelmän suorituskyky on saanut usein turhankin paljon korostetun merkityksen arvioitaessa järjestelmän tehokkuutta. Teknisesti hyvin suorituskykyisestä järjestelmästä, joka heikon luotettavuuden tai vaikean huollettavuuden vuoksi ei ole käytettävissä taistelukentällä, ei ole juurikaan hyötyä. Sotahistoria on täynnä esimerkkejä teknisesti edistyksellisistä järjestelmistä, jotka ovat olleet teknisesti liian epäluotettavia, liian vaikeasti korjattavia tai liian vaikeita käyttää.

Suorituskyky

Järjestelmän suorituskyky jakautuu tekniseen laitteiden ja laitteistokokonaisuuksien suorituskykyyn sekä käyttöhenkilöstön suorituskykyyn, eli siihen, kuinka paljon tehoa teknisistä laitteista ja järjestelmistä lopulta saadaan irti. Järjestelmien monimutkaistuminen ja toimintojen nopeutuminen vaatii käyttöhenkilöstöltä yhä enemmän. Henkilöstön suorituskykyyn vaikuttavat muun muassa henkilöstöaines, koulutustaso, koulutusjärjestelmä ja organisaatiomallin soveltuvuus kyseiselle henkilöstölle.

Järjestelmän suorituskykyä on aina tarkasteltava vihollisen vastatoimenpiteitä varten. Ja kääntäen; jos vihollisella on järjestelmä, meillä tulee olla vastatoimenpide, jolla sen toimintaa haitataan, estetään kokonaan, tai jolla vihollisen järjestelmää voidaan käyttää hyväksi omassa sodankäynnissä. Järjestelmän kykyä sietää vihollisen vastatoimenpiteitä, kykyä toimia vaikeissa ympäristöolosuhteissa sekä kykyä sietää käyttäjän virheitä kutsutaan termillä robustisuus. Robusti järjestelmä on vankka ja sitkeä ja kykenee toimimaan vaikeissakin olosuhteissa. Sen suorituskyky voi laskea vihollisen toimenpiteiden tai ympäristön vaikutuksesta, mutta robusti järjestelmä ei romahda kerralla. Digitaalisen taistelukentän kannalta keskeinen robustisuuteen vaikuttava tekijä on järjestelmän kyky sietää elektronista vaikuttamista ja elektronisia vastatoimenpiteitä. Robustisuus korostuu järjestelmien kehittymisen myötä: Esimerkiksi pst-tykkiä, joka ei kykene läpäisemään vihollisen taisteluvaunujen panssarointia, voidaan kuitenkin käyttää esimerkiksi rynnäkövaunuja ja asepesäkkeitä vastaan. Sen sijaan ilmatorjuntaohjus, joka ei osu maaliinsa maalissa olevan omasuojajärjestelmän vuoksi tai

viestilaite, jolla ei saada yhteyttä elektronisen häirinnän aikana, on täysin hyödytön ja siten täydellinen hukka-investointi.



Kuva 16: Järjestelmän tehokkuus muodostuu suorituskyvystä, käytettävyydestä, ja riippuvuudesta ulkoisista tekijöistä. Vihollinen pyrkii vaikuttamaan kaikkiin näihin, samoin kuin itse pyrimme vaikuttamaan vihollisen järjestelmiin.

Käytettävyys

Järjestelmän käytettävyys on järjestelmän valmiuden mittari, joka voidaan määritellä osuudeksi, jonka järjestelmästä on toimittava tai todennäköisyydeksi, että järjestelmä on toimintavalmis kun sitä tarvitaan. Käytettävyys voidaan määritellä myös muilla tavoin. Onkin syytä huomioida, ettei käytettävyys ole yksikäsitteinen termi, edes standardit eivät määrittele käytettävyyttä yksikäsitteisesti.

Käytettävyyden käsittelyssä käytetään usein jakoa kolmeen eri tyyppiseen käytettävyyteen: *Luontaisessa käytettävyydessä* (inherent availability) ei lasketa mukaan ennakoivaa ylläpitoa ja ylläpitojärjestelmän logistisia ja hallinnollisia viipeitä. *Saavutetussa käytettävyydessä* huomioidaan ennakoiva ylläpito, muttei ylläpitojärjestelmän logistisia ja hallinnollisia viipeitä. *Operatiivisessa käytettävyydessä* otetaan huomioon kaikki todellisen operatiivisen toimintaympäristön vaikutukset ja ominaisuudet. Yksi lisämääritelmä käytettävyyden mittaamiseksi on joihinkin tilanteisiin soveltuva käytettävän ja epäkäytettävän ajan suhde. Menetelmä soveltuu parhaiten yksittäisten järjestelmäkomponenttien karkean käytettävyyden kuvaamiseen, esimerkiksi lentokone joka on tai ei ole lentokunnossa.

Järjestelmän käytettävyyttä tulee tarkastella ensisijaisesti esittämällä kysymys; mihin tarkoitukseen järjestelmä on hankittu ja miten hyvin se kulloinkin on kyseiseen tarkoitukseen käytettävissä. Järjestelmän operatiivisen käytön aikana kokonaiskäytettävyyteen vaikuttavia tekijöitä ovat:

- Järjestelmän sisäinen tekninen käytettävyys, eli järjestelmän ja sen osakomponenttien toiminta- ja toteutusperiaatteet, järjestelmäkomponenttien luontainen luotettavuus sekä muut järjestelmän toimittajan ja hankkijan vallassa olevat kehitys- ja valmistusvaiheeseen liittyvät käytettävyystekijät.

- Järjestelmäoperaattorin kyky ja mahdollisuudet käyttää järjestelmää tarkoituksenmukaisesti, eli järjestelmän ja sen osakomponenttien 'käyttöliittymät', koulutettavuus suhteutettuna koulutettavaan ainekseen ja koulutusresursseihin jne.
- Ulkoisten uhkatekijöiden välitön ja välillinen vaikutus, eli suora (järjestelmäkomponentit) ja epäsuora (esim. käyttöhenkilöstö) asevaikutus taistelukentällä niin suora-ammunta-aseiden, epäsuoran tulen sirpaleiden kuin NBC-aseiden ja elektronisen asevaikutuksenkin osalta.
- Toimintaympäristön ympäristötekijöiden välitön ja välillinen vaikutus.
- Ylläpitojärjestelmän kyky palauttaa järjestelmä käytettäväksi ja järjestelmäteknisen tuen kyky edesauttaa järjestelmän käyttöä.
- Loppukäyttäjän kyky ja mahdollisuudet hyväksikäyttää järjestelmää.



Kuva 17: Sotilasjärjestelmän suorituskyvyn ja käytettävyyden kannalta järjestelmää käyttävillä ihmisillä – komentajilla, johtajilla, operaattoreilla ja taistelijoilla – on keskeinen merkitys. Pelkän teknisen suorituskyvyn tai teknisen käytettävyyden tarkastelu johtaa väärin johtopäätöksiin. [SA kuva]

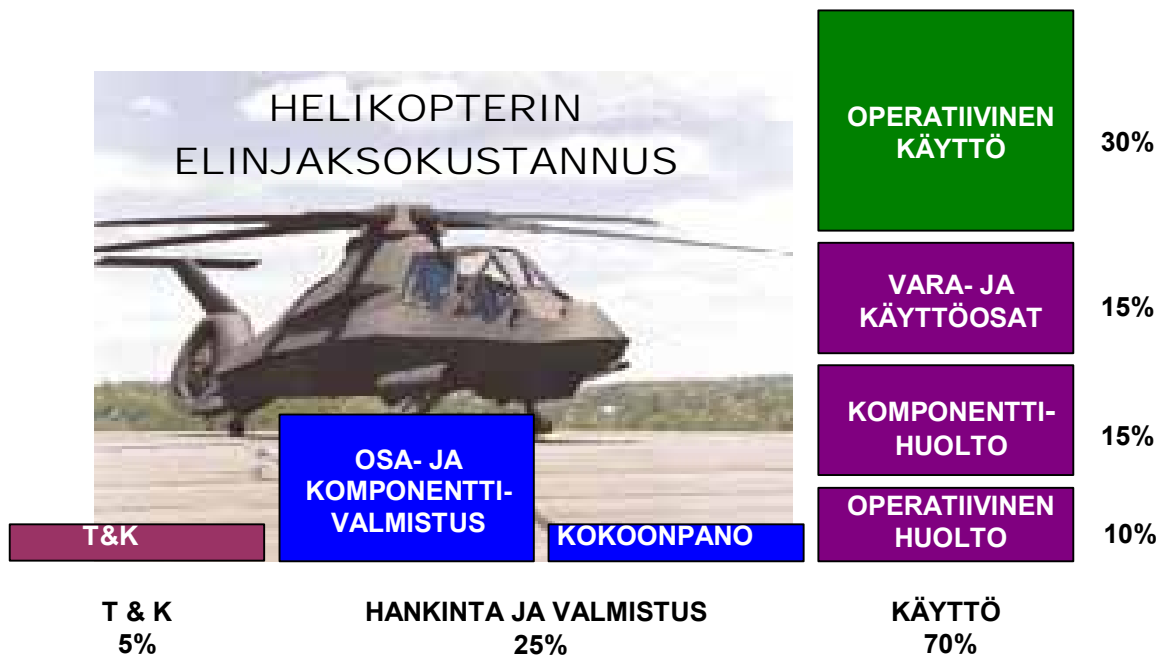
Riippuvuus

Sotilaselektroniikkajärjestelmien riippuvuus toisistaan kasvaa koko ajan. Järjestelmien tehokkuutta arvioitaessa tulisi analysoida myös riippuvuussuhteet ja kaikkien riippuvuusketjujen heikoimmat lenkit. Esimerkiksi tehokkaasta tutkaverkosta ei ole juurikaan hyötyä mikäli havaittuja maalitietoja ei voida lamautetun viestiverkon vuoksi käyttää hyväksi. Tehonsyöttö- ja tiedonsiirtojärjestelmät ovat usein merkittävimmät riippuvuusketjun osajärjestelmistä. Integroidulla digitaalisella taistelukentällä järjestelmät riippuvat merkittävästi toisistaan ja

niitä tukevasta infrastruktuurista, ennen kaikkea logistisesta järjestelmästä ja tietoliikennealustasta. Ilman toimivaa logistista tukea tai vihollisvaikutusta kestävää robustia tietoliikennealustaa järjestelmät eivät kykene muodostamaan maantieteellisesti riittävän kattavaa ja ulottuvaa kokonaisuutta. Järjestelmää vastaan pyritään aina hyökkäämään sen heikoimman lenkin kautta, joten riippuvuustarkastelu on erittäin keskeinen osa järjestelmän kokonaisuunnittelua.

Kustannusvaikutus

Kustannusvaikutusta ei yleensä lasketa järjestelmän tehokkuuteen, koska se ei suoraan nosta tai laske järjestelmän suorituskykyä. Järjestelmien hankintaan ja käyttöön käytettävissä olevien varojen rajallisuuden vuoksi kustannustekijä vaikuttaa kuitenkin merkittävästi järjestelmäkokonaisuuksien tehokkuuteen. Kysymyksen voi tiivistää toteamukseen, että mitä suurempi järjestelmän elinjakokustannus on, sitä vähemmän järjestelmiä saadaan hankittua. Käytännössä kalliskäyttöinen järjestelmä syö varoja muilta käynnistettäviltä hankkeilta ja saattaa heikentää järjestelmien järjestelmän kokonaisuutta, vaikka yksittäisenä järjestelmänä olisikin tehokas.



Kuva 18: Esimerkki järjestelmän elinjakson aikaisten kustannusten jakautumisesta.

Järjestelmän kokonaiskustannusvaikutus jakautuu esimerkiksi seuraaviin kustannuksiin:

- tutkimus ja tuotekehitys
- määrittely ja hankinta
- käyttöönotto
- käyttö ja koulutus
- ylläpito ja päivitykset
- varastointi ja kuljetukset
- hylkäys

Näiden kustannusten on oltava oikeassa suhteessa toisiinsa, jotta järjestelmään sijoitetut varat tuottavat mahdollisimman suuren hyödyn. Teknisesti suorituskykyinen järjestelmä, jonka varastointia ei ole suunniteltu tai jonka ylläpito ei ole kunnossa, on virheinvestointi. Järjestelmä ja sen aiheuttamat kustannukset on siis suunniteltava ja hallittava kokonaisuutena. Tämä on usein vaikeata, koska vastuu järjestelmästä kuuluu sen elinkaaren eri vaiheissa eri organisaatioyksiköille: yksi laatii henkilöstösuunnitelman, toinen tekee teknisen määrittelyn, kolmas suorittaa hankinnan, neljäs käyttää ja viides ylläpitää. Kokonaiskustannukset jäävät tällöin helposti paitsi hallitsematta, myös tiedostamatta. Järjestelmien kokonaiskustannusten ja kustannusvaikutusten hallitseminen mahdollistaa myös eri järjestelmien välisen suhteuttamisen siten, että järjestelmäkokonaisuudesta saavutetaan maksimaalinen hyöty.

JÄRJESTELMÄN SELVIYTYMISKYKY

Järjestelmän tehokkuutta voidaan tarkastella myös sen selviytymiskyvyn kannalta. Selviytymiskyky (survivability) voidaan määritellä *järjestelmän ja sen käyttöhenkilöstön kyvyksi välttää tai sietää ihmisen aikaansaamaa vihamielistä ympäristöä ilman että järjestelmän tehtävä vaarantuu*³. Selviytymiskykyyn liittyy siis kaksi aspektia: fyysinen ja operatiivinen. Fyysinen selviytymiskyky käsittää järjestelmän ja sen käyttöhenkilöstön kyvyn välttää tai vastustaa vihollisen toimenpiteitä järjestelmän tai henkilöstön tuhoamiseksi. Operatiivinen selviytymiskyky puolestaan on järjestelmän kyky välttää tai sietää vihollisen vastatoimia jotka aiheuttaisivat operaation keskeyttämisen. Tällaisia vastatoimia voisivat olla esimerkiksi elektroninen häirintä, datan manipulointi ja harhauttaminen. Vaikka ne eivät vaikuttaisi järjestelmän fyysiseen suorituskykyyn, olisi esimerkiksi häirinnän vuoksi laukaisematta jäänyt tai harhautuksen perusteella väärään maaliin ammuttu ohjus estänyt järjestelmän operatiivisen käytön eikä tällainen järjestelmä olisi selvinnyt operatiivisesti tehtävästään.

Selviytymiskyky muodostuu kahdesta tekijästä: alttiudesta ja haavoittuvuudesta. Alttius (susceptibility) vastatoimille kuvaa sitä missä määrin vihollinen kykenee hyökkäämään järjestelmää vastaan. Alttius voidaan jakaa kolmeen vaiheeseen:

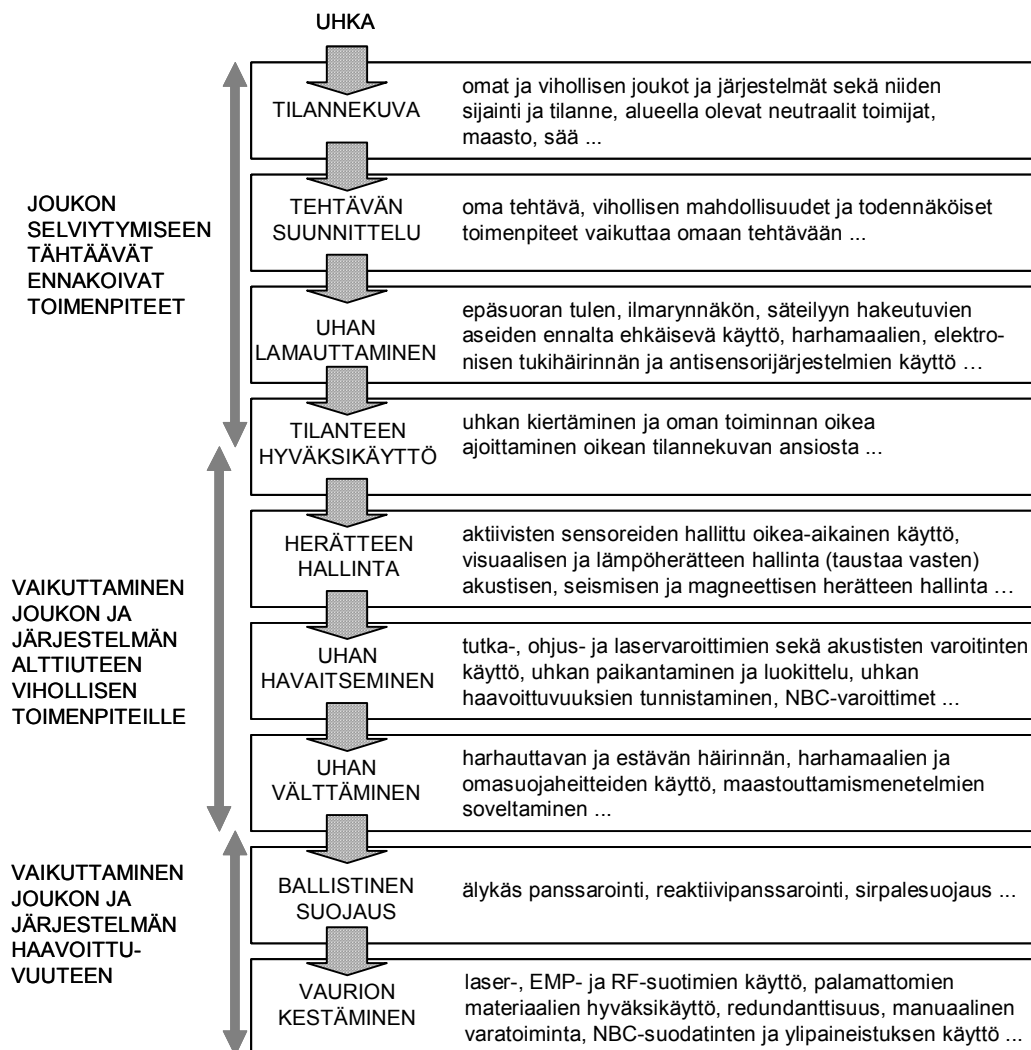
1. järjestelmän havaitseminen, tunnistaminen, paikantaminen ja seuranta
2. ohjuksen tai tykin laukaisu, ohjelmistollisen hyökkäyksen tai elektronisen häirinnän käynnistäminen tai muun hyökkäävän toimenpiteen suorittaminen
3. osuma järjestelmään, taistelukärjen räjäyttämisen sen lähellä, virusinfektio, häirintäsignaalin vaikutus tms. seurannaisvaikutus onnistuneesta hyökkäävästä toimenpiteestä.

Järjestelmän alttiuteen vaikuttaa järjestelmän teknisen suunnittelun (herätetaso, liikehtimiskyky yms.) lisäksi järjestelmän käyttötaktiikka (maaston ja taustaherätteiden hyväksikäyttö, pahimpien uhka-alueiden välttäminen, emissioiden oikea hallinta yms.) ja järjestelmän tai sitä tukevan järjestelmäkokonaisuuden mahdollisuudet lamauttaa tai heikentää uhkaa (omasuojajai taustahäirintä, epäsuora tuli yms.)

Haavoittuvuus (vulnerability) tarkoittaa järjestelmän ominaisuutta, joka aiheuttaa järjestelmälle asetetun tehtävän kannalta olennaisen suorituskyvyn menettämisen tai merkittävän heikkenemisen järjestelmään kohdistuneen vihamielisen vaikuttamisen seurauksena. Haavoittuvuuteen vaikuttaa paitsi järjestelmän kyky sietää vihamielistä vaikuttamista, myös kyky

³ US DoD Regulation 5000.2 15.3.1996: Mandatory Procedures for Major Defense Acquisition Programs

havaita vaikuttaminen, rajata vaikuttamisalue (palo, tietojärjestelmän saastuminen tms.) ja kyky toipua vahinkotapahtumasta.



Kuva 19: Joukon ja järjestelmän selviytymiskyvyn osatekijät ja esimerkkejä keinoista lisätä järjestelmän selviytyvyyttä nykyaikaisella taistelukentällä.

Järjestelmän selviytymiskykyä tarkastellaan lähemmin omasuojajärjestelmiä käsittelevässä luvussa. On kuitenkin huomattava, että suorituskykyyn ja selviytymiseen liittyvä problematiikka on validi kaikissa elektronisen taistelukentän järjestelmissä.

Tässä luvussa käytiin lyhyesti läpi nykyaikaisen sodankäynnin keskeiset elementit sekä taistelukentän järjestelmien käytettävyyden ja tehokkuuden kannalta olennaiset tekijät. Seuraavassa luvussa käsitellään digitaalisen taistelukentän keskeisintä elementtiä, sähkömagneettista spektriä ja sen hyödyntämistä sodankäyntiin.

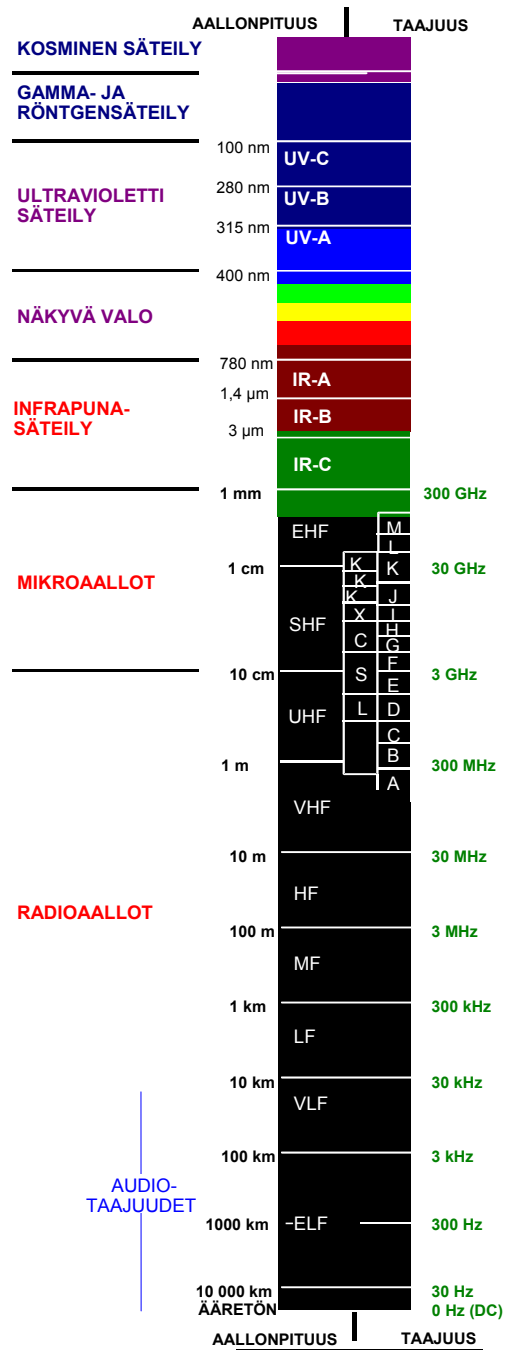
SÄHKÖMAGNEETTINEN SPEKTRI

JOHDANTO

Puhuttaessa sodan siirtymisestä neljanteen ulottuvuuteen tarkoitetaan sähkömagneettisen säteilyn muodostavan olennaisen osan sodankäyntiä. Se joka hallitsee sähkömagneettista spektriä, kykenee itse hyödyntämään valon nopeudella etenevää säteilyä sodankäynnissään ja pystyy samalla estämään tämän vastustajaltaan.

Spektrin osat eroavat toisistaan huomattavasti. Säteilyn ja materian vuorovaikutus riippuu säteilyn aallonpituudesta (ja siten taajuudesta). Tässä kirjassa säteily jaetaan kahteen luokkaan aallonpituuden mukaisesti. Pieni-taajuisista säteilyä, jonka vuorovaikutus materian kanssa on heikkoa, kutsutaan radiotaajuisiksi säteilyiksi tai radioaalloiksi. Suuritaajuisista säteilyä, jonka aallonpituus on pienempi ja energia siten suurempi, kutsutaan optiseksi säteilyksi. Sen vuorovaikutus materian kanssa on merkittävämpää. Infrapunasäteily, valo ja ultraviolettisäteily ovat esimerkkejä tällaisesta.

Pieni- ja suuritaajuisen säteilyn kesken ei yhtäläisyyksiä helposti löydä. Esimerkiksi käytettävät lähetin- ja vastaanotinteknologiat sekä ympäristön vaikutus etenevään säteilyyn muuttuvat siirryttäessä spektrin osalta toiselle. Tämän vuoksi spektrin eri osien ominaisuuksien esittely ja spektrin hyödyntäminen on kirjallisuudessa yleensä käsitelty järjestelmäkohtaisesti. Kuitenkin modernissa sodankäynnissä korostuu spektrin hallitsemista kokonaisuudessaan. Tämän ajatuksen tukemiseksi tässä kirjassa käsitellään kootusti spektrin eri osia sekä tärkeimpiä fysikaalisia ilmiöitä.



Kuva 20: Spektrin osa-alueet.

Tässä luvussa esitellään sähkömagneettisen spektrin osat sekä luodaan lyhyt katsaus spektrin eri osien hyödyntämiseen siviili- ja sotilasjärjestelmissä. Luvussa käydään läpi spektrin ymmärtämisen kannalta tärkeimmät perussuureet ja teoriat sekä tutustutaan sähkömagneetti-

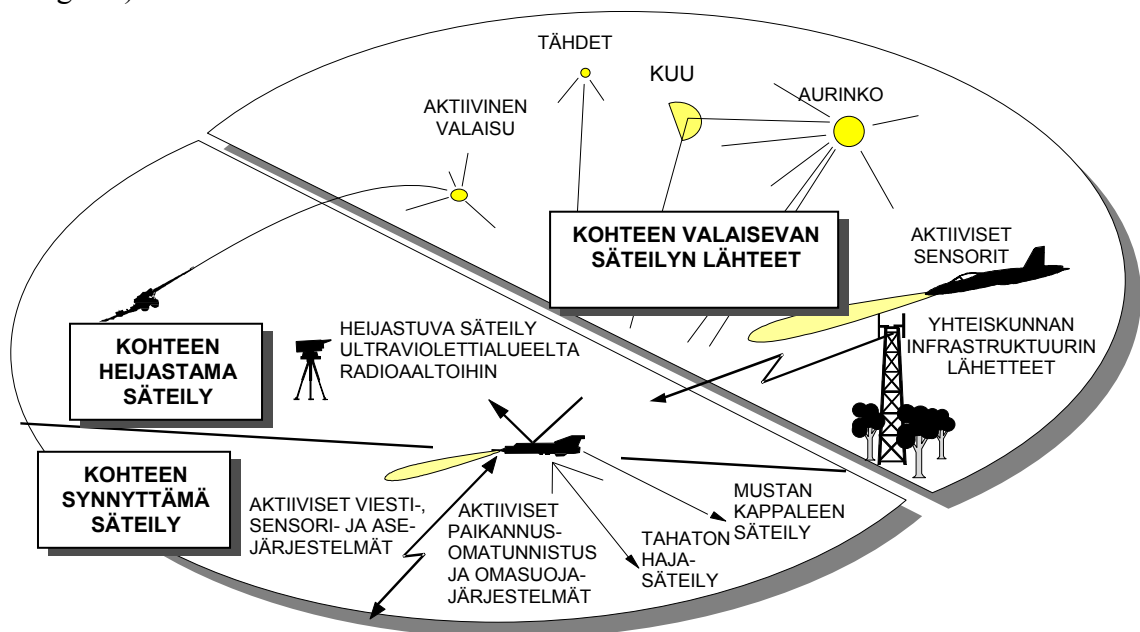
sen säteilyn etenemiseen spektrin eri osa-alueilla. Käsittely on jaettu kahteen osaan: ensiksi käsitellään pienitaajuinen radioaalloista millimetriaaltoihin ja sitten korkeataajuinen säteily infrapuna-alueelta kosmiseen säteilyyn.

SÄHKÖMAGNEETTINEN SÄTEILY

Sähkömagneettisesta säteilystä käytetään eri nimiä eri käyttötarkoituksissa ja eri aallonpituus-alueilla. Käyttötarkoituksen perusteella puhutaan esimerkiksi radio- ja tutka-aalloista ja –säteilystä, aallonpituusalueen mukaan esimerkiksi mikro- ja millimetriaalloista, lämpösäteilystä ja niin edelleen. Kaikissa näissä energian muoto ja etenemismekanismi on kuitenkin sama, sähkömagneettinen säteily.

Sodankäynnissä voidaan hyödyntää sähkömagneettista spektriä sen alusta DC-alueelta (Direct Current, tasasähkö) röntgen- ja gammasäteilyyn. Näiden väliin jäävät niin radio- ja tutka-aallot kuin infrapunasäteily ja näkyvä valo. Spektrin eri osille on annettu eri aikoina ja eri käyttötarkoituksiin erilaisia nimityksiä, joita käytetään yhä päällekkäin. Lisäksi eri tahot ovat jakaneet spektrin osiin toisistaan poikkeavasti. Luonnon fysikaalisten ilmiöiden kannalta spektrin eri osien nimityksillä ei tosin ole merkitystä.

Sähkömagneettista säteilyä esiintyy luonnossa kaikkialla ja koko spektrissä. Osa tästä säteilystä on kappaleiden itsensä tarkoituksellisesti säteilemää (esim. radiolähetykset) tai tahatonta (esim. lämpösäteily) ja osa on kappaleiden heijastamaa säteilyä, joka on lähtöisin muualta (esim. auringosta).



Kuva 21: Sodankäynnissä on hallittava sekä itse synnytetty tai heijastettu säteily että vastustajan synnyttämä tai heijastama säteily koko sähkömagneettisessa spektrissä.

Kaikki luonnossa olevat kappaleet lähettävät ympäristöönsä sähkömagneettista säteilyä, jota kutsutaan mustan kappaleen säteilyksi. Maanpäällisissä olosuhteissa se on suurimmillaan näkyvää valoa vastaavilla ja sitä pidemmillä aallonpituuksilla. Avaruudesta saapuu maapallolle sähkömagneettista säteilyä koko spektrin alueella. Yleisesti tunnetuin on luonnolli-

sesti auringosta tai tähdistä saapuva näkyvä valo. Lisäksi erilaiset ihmisen rakentamat sähköiset järjestelmät lähettävät ympäristöönsä sähkömagneettista säteilyä. Nämä säteilylähteet valaisevat taistelukenttää lähes koko spektrin alueella. Säteily heijastuu ihmisistä ja ihmisten rakentamista laitteista, mutta myös esimerkiksi liikkeen tai linnoittamisen synnyttämistä jäljistä.

Osa teknisten järjestelmien synnyttämästä säteilystä on tahatonta, kuten polttomoottoreiden sytytysjärjestelmien, tai tietokoneiden monitoreiden hajasäteily. Taistelukentällä suurin osa säteilystä on kuitenkin erilaisten tietoliikenne-, kaukokartoitus, sensori-, yleisradio- tms. järjestelmien lähetyksiä, joita vihollinen kykenee hyödyntämään omaan toimintaansa. Neljännen dimension taistelussa on paljolti kyse siitä, kyetäänkö sähkömagneettista spektriä käyttämään omien tarpeiden tyydyttämiseen ja estämään vastustajaa saamasta tietoa näistä järjestelmistä ja niitä käyttävistä joukoista. Samalla on tietysti joko estettävä vastustajalta spektrin hyödyntäminen ja kerättävä tietoja vastustajan joukoista, järjestelmistä ja aikomuksista koko spektrin laajuisella tiedustelulla.

Sähkömagneettisen spektrin hyödyntämisessä on otettava huomioon maapallon kaasukehän ja magneettikentän sekä maapallon ulkopuolisten taivaankappaleiden vaikutus sähkömagneettisten aaltojen etenemiseen ja taustakohinan tasoon. Sodankäynnissä on hallittava sekä omat että vastustajan tarkoitukselliset ja tahattomat läheteet ja heijastukset. Taistelun voittamiseksi on koko spektri hallittava: naamioimisen hyöty menee osin hukkaan, jos jäljet paljastavat naamioidun kohteen tai jos se kyetään havaitsemaan toisella aallonpituudella.

SÄHKÖMAGNEETTISEN SÄTEILYN TEORIAA

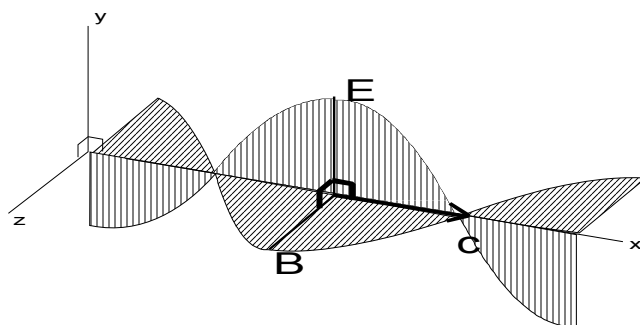
Sähkö- ja magneettikentät

Sähkömagneettinen säteily on ajasta riippuvaa sähkö- ja magneettikentän aaltoliikettä, jota kuvaavat keskeiset suureet ovat amplitudi, taajuus, aallonpituus, vaihe, etenemisnopeus ja koherenttisuus. Säteily perustuu Maxwellin yhtälöiden mukaiseen ilmiöön, jonka mukaan muuttuva sähkökenttä synnyttää ajasta riippuvan magneettikentän ja tämä muuttuva magneettikenttä puolestaan ajasta riippuvan sähkökentän.

Sähkömagneettinen säteily etenee toisiaan ja etenemissuuntaansa nähden kohtisuorassa olevina sähkö- (E) ja magneettikenttänä (H) kuvan 22 mukaisesti. Sähkömagneettisen säteilyn nopeus tyhjiössä saadaan kaavasta:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot \epsilon_0}}$$

mikä vastaa valon nopeutta tyhjiössä, $c_0 = 2,99792458 \cdot 10^8$ m/s. Sähkömagneettinen aalto liikkuu siten 300 metriä mikrosekunnissa tai 30 cm nanosekunnissa.



Kuva 22: Sähkömagneettinen säteilyn edetessä suuntaan x , sähkö- (E) ja magneettikenttä (B) ovat kohtisuorassa toisiaan vastaan.

Sähkömagneettisen aallon sisältämä energia jakautuu tasan sähkö- ja magneetti-komponentteihin, joiden energiat ovat:

$$E_e(t) = \frac{1}{2} \cdot \epsilon_0 \cdot E(t)^2 \quad \text{ja} \quad E_m(t) = \frac{1}{2} \cdot \epsilon_0 \cdot E(t)^2$$

joten aallon kokonaisenergia on:

$$E(t) = E_e(t) + E_m(t), \text{ eli } E(t) = \epsilon_0 \cdot E(t)^2$$

Säteilyn intensiteetti, eli aikayksikössä tietyn pinnan läpi kulkeva energia pinta-alayksikköä kohti on:

$$I(t) = c \cdot \epsilon_0 \cdot E(t)^2$$

Sähkö- ja magneettikenttien komponenttien suhdetta sanotaan aaltoimpedanssiksi Z_0 . Käytännössä aaltoimpedanssi riippuu väliaineen permeabiliteetin (μ) ja permittiivisyyden (ϵ) suhteesta. Tyhjiössä aaltoimpedanssi on vakio:

$$Z_0 = \frac{E}{H} \quad Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \quad Z_0 = 120 \cdot \pi$$

Aallonpituus ja taajuus

Sähkömagneettisen säteilyn aallonpituus saadaan, kun jaetaan aallon etenemisnopeus (tyhjiössä sama kuin valon nopeus $c_0 = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$, eli noin $c_0 = 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$ mitä voidaan käyttää riittävänä approksimaationa myös säteilyn edetessä ilmassa) aallon taajuudella:

$$\lambda_0 = \frac{c}{f}$$

Väliaineessa aalto etenee valon nopeutta hitaammin, joten sen aallonpituus on lyhempi. Radioaallon nopeus ja siten myös sen aallonpituus riippuu väliaineen suhteellisesta permittiivisyydestä ϵ_r suhteellisesta permeabilitetista μ_r :

$$v = \frac{c}{\sqrt{\mu \cdot \epsilon}} \quad \text{jossa } \mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad \text{ja } \epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$$

Käytännössä usein $\mu_r \approx 1$, jolloin aallonpituus väliaineessa saadaan kaavasta:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad \text{jossa } \epsilon_r \geq 1 \quad \text{tällöin etenemisnopeus: } v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

Esimerkiksi koaksiaalikaapelilla eristemateriaalin suhteellinen permittiivisyys on noin 2,3. Tällöin vastaavasti aallon etenemisnopeus on noin 66 % valon nopeudesta (parikymmentä senttimetriä nanosekunnissa).

Yleisen peukalosäännön mukaan aallonpituus metreinä saadaan, kun jaetaan luku 300 aallon taajuudella megahertseinä. Tämä approksimaatio pätee luonnollisesti vain vapaassa tilassa etenevään aaltoon.

$$\lambda_m = \frac{300}{f_{\text{MHz}}}$$

Tyypillisesti radio- ja tutka-aaltojen yhteydessä ensisijaisena määrittävänä tekijänä käytetään taajuutta, vaikka aaltoalueet onkin jaettu osiin aallonpituuden mukaan. Esimerkiksi radioasemasta ilmoitetaan yleensä toimintataajuus, vaikkapa 27 MHz, eikä sitä vastaavaa aallonpituutta 11 metriä. Kuten kaikkiin sääntöihin, tähänkin on olemassa lukuisia poikkeuksia. Infrapuna-alueella ja näkyvän valon aallonpituuksilla taajuudet ovat terahertsiluokkaa (1 THz = 10^{12} Hz = 100 000 000 000 Hz), jolloin tuntuu luonnollisemmalta puhua aallonpituuksista, jotka ovat nano-mikrometriluokkaa.

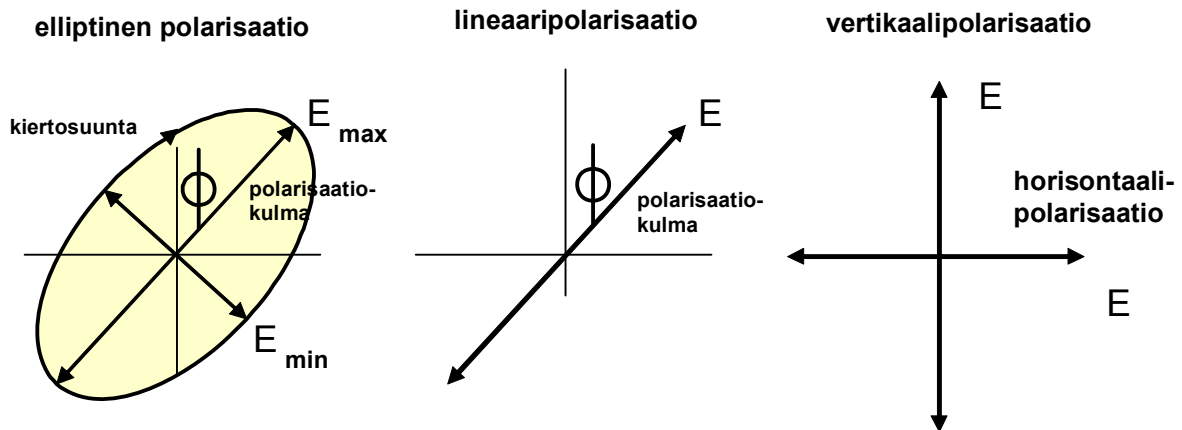
Polarisaatio

Sähkömagneettisen kentän polarisaatio kuvaa sähkökentän suunnan ja amplitudin käyttäytymistä ajan funktiona, eli sitä, millaisen geometrisen uran kenttävektorin kärki piirtää yhden värähtelyjakson aikana. Sähkökentän voidaan ajatella muodostuvan kahdesta toisiaan vastaan kohtisuorassa olevasta komponentista kuvan 23 mukaisesti. X- ja Y-suuntaisten komponenttien summavektori on ellipsi, jota kuvaavat suureet

- polarisaatiosuhde $E_{\text{max}}/E_{\text{min}}$,
- polarisaatiokulma (polarisaation kallistuskulma) ϕ ja
- kiertosuunta

Ympyräpolarisaatiossa E_x - ja E_y -komponentit ovat yhtä suuria ja niiden vaihe-ero on 90° ja polarisaatiosuhde on 1. Mikäli toinen komponenteista on nolla, puhutaan lineaari-polarisaatiosta. Jos kenttä on X-akselin suuntainen, kyse on horisontaalisesta polarisaatiosta ja jos kenttä on Y-akselin suuntainen, kyseessä on vertikaalinen polarisaatio. Puhtaasti horisontaalista tai vertikaalista polarisaatiota on kuitenkin todellisuudessa lähes mahdotonta saavuttaa maastosta ja rakennuksista johtuvien heijastusten sekä ionosfäärin aiheuttaman

vääristymän vuoksi, joten sähkömagneettinen säteily sisältää käytännössä aina hieman molempia polarisaatioita. Tätä asiaa voidaan käyttää hyväksi suunniteltaessa elektronista hyökkäystä havaittuja järjestelmiä vastaan.



Kuva 23: Sähkömagneettisen säteilyn polarisaation määrittelevät suureet.

Lähi- ja kaukokenttä

Antennista lähtevä säteilykenttä on eri tyyppinen eri etäisyyksillä antennista. Säteilykenttä jaetaan kolmeen osaan:

- reaktiivinen lähikenttä
- säteilevä lähikenttä (ns. Fresnellin alue)
- kaukokenttä (ns. Fraunhoferin alue)

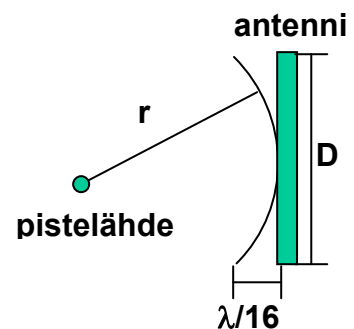
Reaktiivinen lähikenttä ulottuu noin $r = \frac{\lambda}{2 \cdot \pi}$

etäisyydelle antennista. Rajalla reaktiivinen osa on yhtä voimakas kuin säteilevä osa. Säteilevässä lähikentässä sähkö- ja magneettikentät eivät ole kohtisuorassa toisiaan vastaan, niin kuin kaukokentässä, joten sähkökentän komponentista ei voi päätellä magneettikenttää ja toisinpäin.

Vastaanotinantennit on tavallisesti tarkoitettu toimimaan kaukokentässä, jossa niiden kohtaama aalto on likimain tasoaalto. Heijastusten vuoksi täysin tasaista aaltorintamaa ei voida käytännössä saavuttaa, vaan kentän amplitudi ja vaihe vaihtelee jonkin verran antennin alueella.

Kaukokentän rajana pidetään etäisyyttä, jolla vaihevirhe antennin pinnalla on $\lambda/8$ (eli 22,5 astetta, vastaa matkaeroa $\lambda/16$). Jos antennin halkaisuja tai korkeus on D , kaukokenttä alkaa etäisyydeltä:

$$r = \frac{2 \cdot D^2}{\lambda}$$



Kvantin energia

Sähkömagneettinen säteily voidaan ymmärtää myös partikkeliksi, jolla ei ole lepomassaa, mutta jolla on liikemäärämomentti ja energia. Tällaista kappaletta kutsutaan fotoniksi. Säteilykvantin energia riippuu kvantin taajuudesta: mitä korkeampi säteilyn taajuus on, sitä suurempi on säteilykvantin energia ja liikemäärämomentti:

energia: $E = h \cdot f$, jossa h on Planckin vakio $6,626196 \cdot 10^{-34}$ Js.

liikemäärämomentti: $p = \frac{h}{\lambda}$

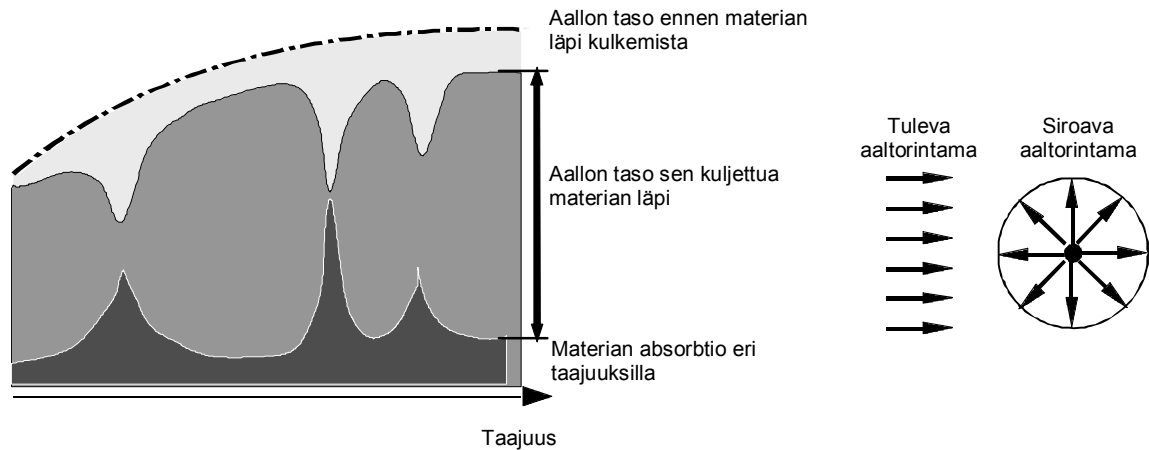
Pientaajuisen säteilyn energia on hyvin pieni; radioaalloilla $0 - 10^{-5}$ eV ja mikroaalloillakin maksimissaan vain noin 10^{-3} eV. Säteilykvantin energia ei riitä ionisoimaan materiaa eikä aiheuttamaan solubiologisia muutoksia lyhytkestoisessa altistuksessa. Tällaisen säteilyn suurin vaikutus materiaan onkin lämmitysefekti. Suurtaajuusella säteilyllä kvantin energia on suuri ja vastaavasti vaikutukset materiaan ovat suuremmat. Tähän aiheeseen palataan myöhemmin suurtaajuisen säteilyn käsittelyn yhteydessä.

Vuorovaikutus materian kanssa

Sähkömagneettinen säteily on luonteeltaan immateriaalista, mutta sen ja materian välisen vuorovaikutuksen ymmärtäminen on keskeistä spektrin käytettävyyden ja käytön rajojen ymmärtämisen kannalta. Sähkömagneettisen aallon kohdatessa materiaa, aallon sähkö- ja magneettikentät ovat vuorovaikutuksessa materian atomien kanssa. Tällöin elektronit värähtelevät sähkömagneettisen kentän tahdissa, mikä kuluttaa aallon energiaa. Aallosta absorboituu energiaa eniten silloin kun aallon taajuus vastaa atomin tai molekyylin luontaista taajuutta. Atomien emissio- ja absorptiospektri vastaavat toisiaan; atomi siis absorboi energiaa samoilla taajuuksilla kuin se itse sitä lähettää. Absorptio on voimakkaimmillaan niillä taajuuksilla, joissa se virittää atomin ytimen tai elektroneja niiden perustilasta, koska suurin osa luonnossa esiintyvistä atomeista on perustilassa. Viritysmekanismi riippuu aallon taajuudesta:

- Gammasäteet vaikuttavat atomiytimeen.
- Röntgensäteet vaikuttavat sisimpiin elektroneihin.
- Ultraviolettisäteily ja näkyvä valo virittävät ulompia elektroneita .
- Infrapunasäteily vaikuttaa molekyylien värähdysliikkeisiin sekä uloimpien elektroneiden viritystilaan.
- Mikroaallot vaikuttavat molekyylien pyörimisliikkeeseen sekä ytimen spiniin.
- Radioaallot vaikuttavat atomiytimen spiniin.

Atomien ja molekyylien energia on kvantisoitunutta, eli sillä voi olla vain tiettyjä arvoja. Sähkömagneettisen säteilyn vuorovaikutus materian kanssa on mahdollista vain jos aallon tai fotonin taajuus vastaa näiden energiatilojen erotusta.

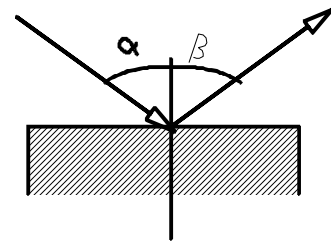


Kuva 24: Aineeseen absorboituva energia poistuu aallosta sen kulkiessa aineen läpi (vasemmalla). Viritystilän purkautuessa aine säteilee joka suuntaan sironnan vuoksi.

Virittyneet atomit ja molekyylit saattavat palata perustilaan, jolloin ne emittoivat säteilyä, jonka aallonpituus riippuu perus- ja viritystilän energiatilojen erotuksesta. Yleensä emissiospektri ja absorptiospektri vastaavat toisiaan, eli atomit ja molekyylit lähettävät perustilaan palatessaan säteilyä, jonka aallonpituus on yhtäläinen sen säteilyn kanssa, joka sai ne virittämään perustilastaan.

Heijastuminen

Heijastuminen tapahtuu, kun sähkömagneettinen aalto kohtaa tasaisen tasopinnan. Se onko pinta käsitettävä tasaisena, riippuu pintaan osuvan säteilyn aallonpituudesta ja pinnan epätasaisuudesta aallonpituuteen nähden.



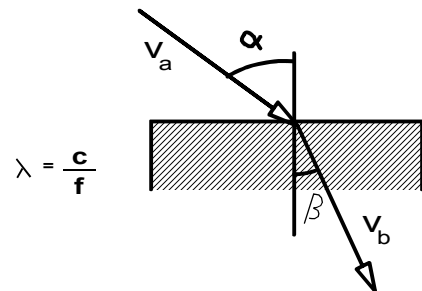
Heijastuksessa säteilyn tulo- ja heijastuskulma on sama, kuvassa $\alpha = \beta$.

Taistuminen (refraktio)

Se osa säteilystä, joka ei heijastu tai siroa, taittuu osuessaan rajapintaan, jossa säteilyn nopeus muuttuu. Taistuminen tapahtuu aina kohti tiheämpää ainetta, eli sitä ainetta, jossa aallon etenemisnopeus on pienempi).

Snellin lain mukaisesti:

$$\frac{\sin(\alpha)}{\sin(\beta)} = \frac{v_a}{v_b}$$



jossa v_a on etenemisnopeus väliaineessa a ja v_b nopeus väliaineessa b. α on tulokulma ja β taitekulma väliaineeseen b.

Sähkömagneettisen säteilyn etenemisnopeus on vakio vain tyhjöissä. Edetessään materiassa sähkömagneettinen säteilyn nopeus riippuu väliaineen sähköisestä permittiivisyydestä ϵ ja magneettisesta permeabiliteetista μ :

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} \quad \text{tai} \quad v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}}$$

Taitekerroin n määritellään aallon nopeuksien suhteena valon nopeuteen

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$$

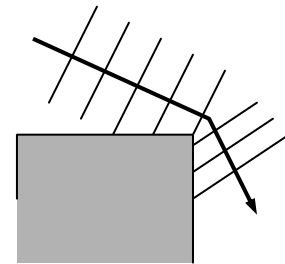
Taitekerroin muuttuu äkillisesti esimerkiksi veden ja ilman välisessä rajapinnassa. Ilman taitekerroin riippuu ilman paineesta, kosteudesta ja lämpötilasta. Se muuttuu siten korkeuden funktiona. Tämän vuoksi ilmassa kulkeva sähkömagneettinen säteily taipuu kohti maanpintaa.

Kun säteily saapuu rajapintaan kulmassa α_c siten, että: $\sin(\alpha_c) = \frac{n_2}{n_1}$

taittumista ei tapahdu, vaan koko aalto heijastuu. Kulmaa, jolla tapahtuu täydellinen heijastus, kutsutaan *kriittiseksi kulmaksi*.

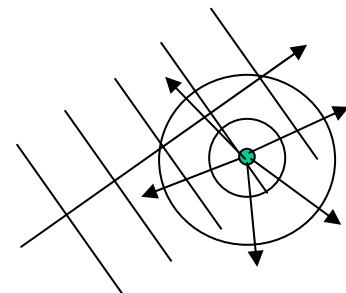
Taipuminen (diffraktio)

Sähkömagneettinen säteily taipuu kohdatessaan reunan, niin kuin mikä tahansa aaltorintama. Tämän vuoksi diffraktio mahdollistaa radioaallon etenemisen suurtenkin kohteiden taakse. Taipuminen riippuu aallonpituudesta: mitä lyhyempi se on, sitä vähemmän aalto taipuu. Radioaallot esimerkiksi taipuvat hyvinkin paljon, mutta näkyvä valo etenee enemmän tai vähemmän 'viivasuoraan'.



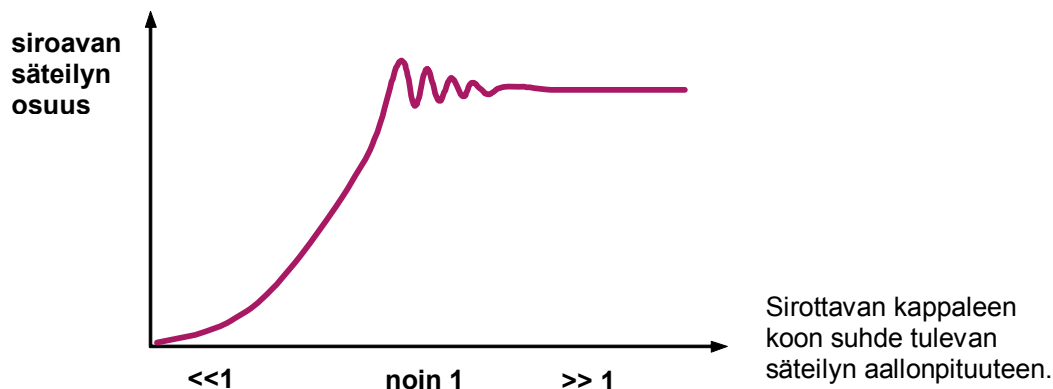
Sironta scattering)

Heijastumisen, taantumisen ja taipumisen yhteydessä materia ei osallistu aktiivisesti aallon etenemiseen, vaan materia "häiritsee" aallon luontaista etenemistä lisäämättä kuitenkaan uusia aaltoja. Sironnassa aineella on aktiivinen rooli. Sironta on prosessi, jossa sähkömagneettinen säteily absorboituu materiaan, joka virittyy korkeampaan energiatilaan. Kun tämä energiatila purkautuu, materia lähettää sähkömagneettista säteilyä joka suuntaan samalla taajuudella kuin se absorboitui. Tällöin osa säteilystä siroaa myös takaisin tulosuuntaan ja osa alkuperäisen säteilyn etenemissuuntaan.



Sironta edellyttää vahvaa vuorovaikutusta materian ja sähkömagneettisen aallon kesken. Yleensä sironta lisääntyy säteilyn aallonpituuden lyhetessä, eli taajuuden kasvaessa, koska tällöin aallonpituuden luokkaa olevia sirottavia kappaleita löytyy enemmän aallon etenemis-

reitillä. Ilmakehän epähomogeenisuudet, kuten ilman pyörteiden aiheuttamat äkilliset muutokset ilman taitekertoimessa (taitekerroin $\eta = \sqrt{\epsilon_r}$) sekä ilmassa olevat hiukkaset aiheuttavat sirontaa. Siroava aaltokomponentti säteilee laajaan avaruuskulmaan vaimentaen suoraan etenevää aaltoa.



Kuva 25: Säteilyn aallonpituuden ja sirottavan kappaleen välisen suhteen vaikutus sirontapoikkipinta-alaan.

Sirontamekanismia käytetään hyväksi erilaisissa sirontajärjestelmissä, joissa pyritään hyödyntämään ilman pyörteistä (troposfäärisirontajärjestelmät), tai ionosfääristä (ionosfäärisirontajärjestelmät) tai meteoreista siroavaa (meteorisirontajärjestelmät) aaltokomponenttia. Lisäksi sirontaa käytetään hyväksi esimerkiksi laservaroitusjärjestelmissä, joissa osa tulevasta aallosta siroaa ilmamolekyyleistä ja ilman epäpuhtauksista ja päättyy varoittimeen, vaikka säteilylähteestä suoraan etenevä säteily ei varoittimeen osuisikaan.

Sirontaan vaikuttavat sirottavan kappaleen koko aallonpituuteen nähden, kappaleen muoto sekä aallon tulosuunta ja polarisaatio.

Hiukkasen sirontapoikkipinta-ala kuvaa siroavan säteilyn suhdetta suoraan etenevään. Sirontapoikkipinta-ala riippuu hiukkasen suhteellisesta koosta säteilyn aallonpituuteen nähden. Aallonpituuteen nähden pienen kappaleen sirontapoikkipinta on verrannollinen taajuuden neljänteen potenssiin (Rayleigh-sironta). Aallonpituuden luokkaa olevan kappaleen sirontapoikkipinta vaihtelee geometrisen poikkipinnan mukaan (Mie-sironta resonanssialueella). Aallonpituuteen nähden suuren kappaleen sirontapoikkipinta vastaa yleensä kappaleen geometristä poikkipinta-alaa.

Tehotiheys

Sähkömagneettisen säteilyn tehotiheys P_d (W/m^2) saadaan joko sähkökentän tai magneettikentän mukaan kaavoista:

$$P_d = \frac{E^2}{Z_0}$$

jossa vapaassa tilassa aaltoimpedanssi on $Z_0 = 120\pi$.

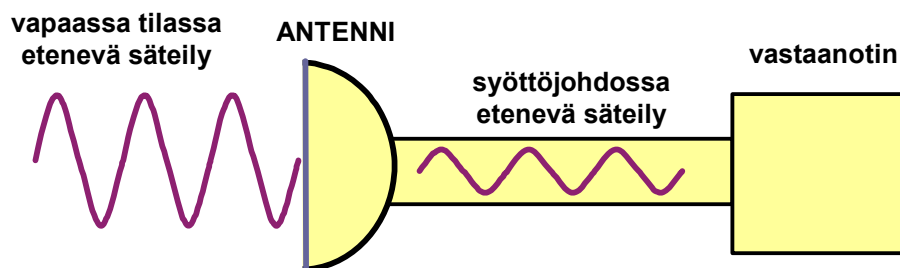
Vapaassa tilassa etenevä isotrooppisesta säteilijästä (säteilijä, joka säteilee joka suuntaan yhtä paljon) lähtevän aallon sähkökentän taso laskee verrannollisena etäisyyteen, minkä vuoksi aallon sisältämä teho laskee verrannollisesti etäisyyden neliöön:

$$\text{teho: } P_d = \frac{P_o}{4\pi d^2} \quad \text{ja kenttä: } E_d = \frac{\sqrt{30 \cdot P_o}}{d}$$

jossa P_o on aallon teho etäisyydellä $d=0$, P_d on aallon teho etäisyydellä d ja E_d on sähkökentän voimakkuus etäisyydellä d .

Antennin ominaisuudet

Antenni on järjestelmän osa, joka kytkee järjestelmän sähkömagneettiseen spektriin sovittamalla aaltojohteessa tms. suljetussa siirtomediassa kulkevan radiotaajuisen signaalin vapaassa tilassa eteneväksi sähkömagneettiseksi aalloksi. Koska antenni on sovituselementti, sen sovitus sekä avaruuteen (säteilyvastus) että syöttöjohtoon on tehon siirtymisen kannalta keskeisen tärkeitä. Epäsovitus johtaa siihen, että osa tehosta heijastuu takaisin eikä etene lähetyksentennistä avaruuteen tai vastaanotinantennista vastaanottimen ilmaisimelle.



Kuva 26: Antenni sovittaa vapaassa tilassa etenevän säteilyn syöttöjohdossa etenevään ja päinvastoin.

Antennit ovat tyypillisesti resiprookkisia piirielementejä, millä tarkoitetaan sitä, että niiden ominaisuudet eivät riipu säteilyn kulkusuunnasta. Siten niiden lähetyks- ja vastaanotto-ominaisuudet ovat samat. Tämä pätee suurimpaan osaan antenneista; merkittävimmän poikkeuksen muodostavat aktiiviset antennit, joissa on epäresiprookkisia komponentteja, kuten ferriittivaiheensiirtimiä. Myös antenniryhmät, jotka sijaitsevat fyysisesti vierekkäin, mutta käyttävät lähetykseen toista ja vastaanottamiseen toista elementtiä eivät ole resiprookkisia.

Antennin suuntaavuus D on suure, joka kuvaa antennin kykyä kohdistaa siitä lähtevä säteily kapealle sektorille. Suuntaavuus määritellään antennin maksimitehotiheyden suhteena keskimääräiseen tehotiheyteen. Jos etäisyydellä r mitattuna maksimitehotiheys on P_{\max} ja keskimääräinen tehotiheys on P_{av} , niin antennin suuntaavuus D on:

$$D = 4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \frac{P_{\max}}{P_{\text{av}}}$$

Suuntaavuus voidaan approksimoida myös antennin keilanleveyden (radiaaneina ϕ_a atsimuutikulmassa ja ϕ_e elevaatiokulmassa) avulla:

$$D = \frac{4\pi}{\phi_a \phi_e}$$

Antennivahvistus on säteilyhyötysuhteen η_r ja suuntaavuuden tulo:

$$G = \eta_r \cdot D$$

Antennin apertuurilla, eli efektiivisellä pinta-alalla, tarkoitetaan antennin vastaanottaman tehotiheyden suhdetta antennia ympäröivään tehotiheyteen:

$$A = \frac{P_r}{P_d}$$

Antennin vahvistuksen G ja on antennin apertuurin A välillä on seuraavanlainen suhde:

$$G = \frac{4\pi \cdot A}{\lambda^2} \quad \Leftrightarrow \quad A = \frac{G \lambda^2}{4\pi}$$

Tällöin lähettimestä, jonka lähetysteho on P_t ja jonka antennin vahvistus on G_t , lähtee avaruuteen isotrooppisesti ekvivalentti teho ERP (Effective Radiated Power) tai EIRP (Effective Isotropically Radiated Power).

$$ERP = P_t \cdot G_t$$

Etäisyydellä d tehotiheys on aiemmin esitetyn mukaisesti:

$$P_d = \frac{P_t \cdot G_t}{4\pi \cdot d^2}$$

Tästä tehotiheydestä vastaanottimeen saadaan siepattua vastaanotin antennin apertuurista (ja siis vahvistuksesta) riippuva teho P_r etäisyydellä d lähettimestä:

$$P_r(d) = P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \frac{\lambda^2}{(4\pi)^2} \cdot \frac{1}{d^2}$$

Edellä olevasta havaitaan, että radioaallon teho vaimenee edetessään verrannollisena etäisyyden neliöön. Aallon sähkökenttä puolestaan vaimenee verrannollisena etäisyyteen. Kentän vaimeneminen ei riipu aallonpituudesta, minkä käsityksen yhtälössä olevasta termistä

$\left(\frac{\lambda}{4\pi \cdot d}\right)^2$ helposti saa. Säteilyn tehotiheys vastaanottimen kohdalla ei riipu aallonpituudesta. Asian ydin on se, että em. yhtälössä vastaanotettava teho on ilmaistu vastaanotin antennin vahvistuksen $G = \frac{4\pi \cdot A}{\lambda^2}$ avulla. Siten kyse on termien antennivahvistus ja vapaan tilan vaimennus määrittelmistä.

Mikäli tehot ja antennivahvistukset ilmaistaan logaritmisina (dBW ja dBi), niin vastaanotettava teho saadaan kaavasta:

$$P_r = P_t + G_t + G_r - \left(32.5 + 20 \cdot \log(R_{\text{km}}) + 20 \cdot \log(f_{\text{MHz}}) \right)$$

jossa etäisyys R_{km} on ilmaistu kilometreinä ja taajuus f_{MHz} megahertseinä.

Antenneja käsitellään tarkemmin kirjan myöhemmissä luvuissa viesti- ja sensorijärjestelmien yhteydessä sekä liitteessä 1.

Dispersio

Koska suhteellinen permeabiliteetti on lähellä yhtä suurimmassa osassa väliaineita, voidaan taitekerroin approksimoida pelkän suhteellisen permittiivisyyden avulla:

$$n = \sqrt{\epsilon_r}$$

Alonso & Finn Fundamental University Physics antaa väliaineen permittiivisyyden tarkaksi määrittämiseksi kaavan:

$$\epsilon_r = 1 + \frac{Ne^2}{m_e \epsilon_0} \sum_i \left(\frac{f_i}{\omega_i^2 - \omega^2} \right)$$

jossa N on elektronien määrä tilavuusyksikköä kohti, e alkeisvaraus, m_e elektronin lepomassa f_i on resonanssitaajuuden ω_i suhteellinen osuus. Olennaista on havaita että permittiivisyys ja siten myös taitekerroin riippuvat kulmataajuudesta ω . Tämän vuoksi aallon eritaajuiset komponentit etenevät väliaineessa erilaisilla nopeuksilla, jolloin signaali vääristyy. Tätä ilmiötä kutsutaan dispersioksi.

Dopplerilmiö

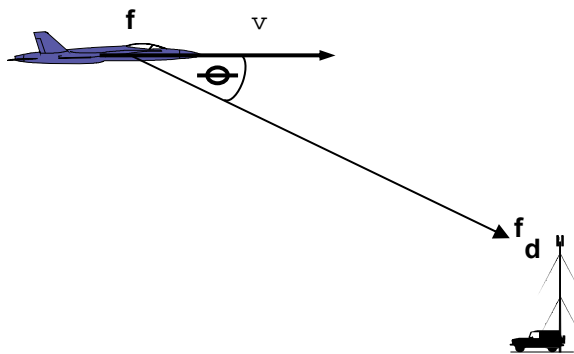
Säteilylähteestä tulevan sähkömagneettisen säteilyn kulmataajuus riippuu säteilylähteen ja vastaanottajan suhteellisesta nopeudesta v :

$$\omega_d = \omega \frac{1 - \frac{v}{c}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \text{ pienillä nopeuksilla nimittäjä } \rightarrow 1, \text{ jolloin: } \omega_d = \omega \left(1 - \frac{v}{c} \right)$$

jossa ω on lähtevän säteilyn kulmataajuus ja ω_d dopplerkulmataajuus. Mikäli kulmataajuuden ja suhteellisen nopeuden sijasta halutaan käyttää taajuutta ja lähteen nopeutta, voidaan yhtälö kirjoittaa muotoon:

$$f_d = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \left(1 - \frac{v}{c} \right) \cdot \cos(\theta)$$

jossa θ on säteilyn etenemissuunnan ja suhteellisen nopeusvektorin välinen kulma.



Kuva 27: Dopplerilmiön vuoksi kohti tulevasta säteilylähteestä havaittava taajuus on korkeampi kuin lähetystaajuus. Vastaavasti loittonevasta maalista havaittava taajuus on matalampi kuin lähetystaajuus.

YMPÄRISTÖN VAIKUTUS

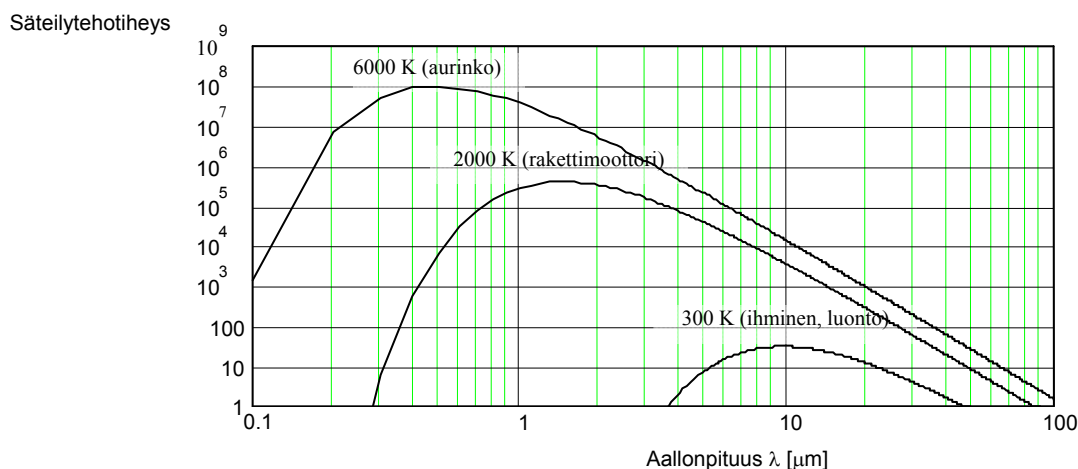
Materia, kuten maapallon kaasukehä, maan pinta yms. vaikuttaa säteilyyn aallon kulkiessa sen läpi. Lisäksi suuri osa havaitsemastamme säteilystä on peräisin auringosta. Tämän vuoksi seuraavassa kappaleessa käsitellään lyhyesti auringon lähettämää säteilyä sekä maapallon pinnan yläpuolista rakennetta. Aluksi kuitenkin tutustutaan *mustan kappaleen säteilyyn*, joka koskee kaikkea luonnossa esiintyvää materiaa ja koko sähkömagneettista spektriä.

Mustan kappaleen säteily

Kaikki absoluuttista nollapistettä lämpimämmät kappaleet lähettävät sähkömagneettista säteilyä. Tätä kutsutaan mustan kappaleen säteilyksi. Planckin lain mukaisesti lämpötilassa T oleva kappale säteilee puoliavaruuteen eri aallonpituusalueilla pinta-alayksikköä kohti tehon W_λ [$W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$]:

$$W_\lambda(T, \lambda) = \frac{C_1}{\lambda^5 \cdot \left(e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T}} - 1 \right)}$$

jossa λ on ilmaistu mikrometreinä ja vakiot $C_1 = 3,74 \cdot 10^8 W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^4$ ja $C_2 = 1,44 \cdot 10^4 \mu m^4 \cdot K$. Kuvassa 28 esitetään mustan kappaleen säteily aallonpituuden (μm) funktiona lämpötiloissa 6000 K (aurinko), 2000 K (rakettimoottori) ja 300 K (ihminen, luonto).



Kuva 28: Mustan kappaleen säteilytehoiteisuus aallonpituuden (mikrometreinä) funktiona.

Kappaleet säteilevät siten kaikilla aallonpituuksilla, vaikka säteilyllä tietyn lämpöinen kappale säteileekin eniten tietyllä aallonpituudella. Säteilyn intensiteettimaksimi saadaan Wienin siirtymälain mukaisesti kaavasta:

$$\lambda_{\max} = \frac{2898}{T} \mu\text{m}$$

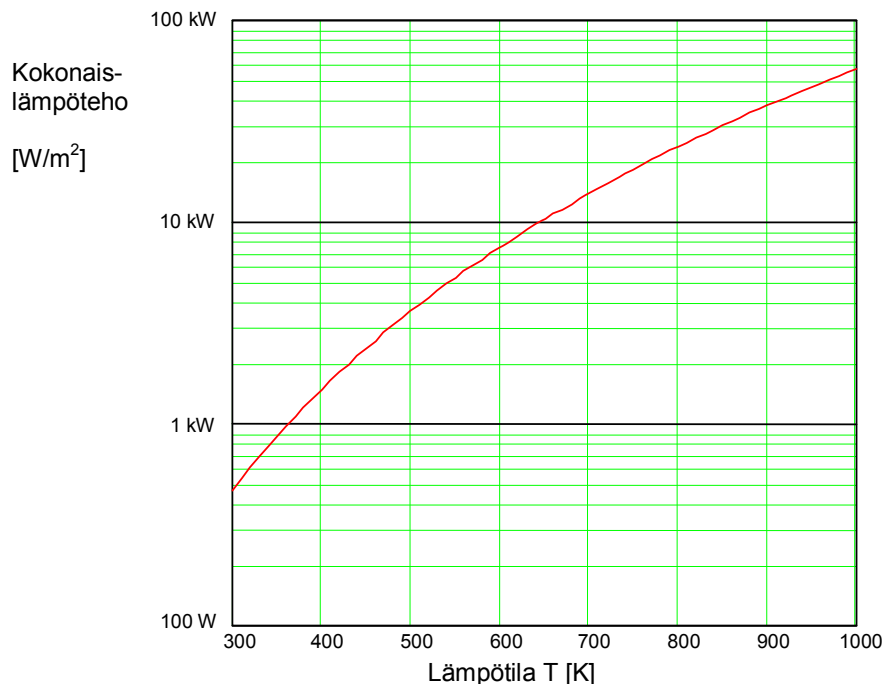
Lukua $2898 \mu\text{m}\cdot\text{K}$ sanotaan Wienin siirtymävakioksi. Kaavan mukaan lähellä maanpäällisen taustaympäristön lämpötilaa olevien esineiden säteilyn intensiteettimaksimi on noin $10 \mu\text{m}$, minkä vuoksi lämpökamerat toimivat tällä alueella. Auringon intensiteettimaksimi on noin 480 nm , mutta maan ilmakehän vaimennuksen vuoksi maan päälle tulevan säteilyn intensiteettimaksimi on keltavihreän valon kohdalla, mihin maanpäällinen elämä on optimoitunut.

Stefan-Boltzmannin lain mukaisesti kappaleen säteilemä kokonaisteho (tehointegraali yli koko aallonpituusalueen) riippuu vain kappaleen lämpötilasta:

$$W_{\Sigma}(T) := \int_0^{\infty} W_{\lambda}(T, \lambda) d\lambda, \text{ mistä saadaan: } W(T) = \sigma \cdot T^4$$

jossa $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} [\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}]$ on Stefan-Boltzmannin vakio.

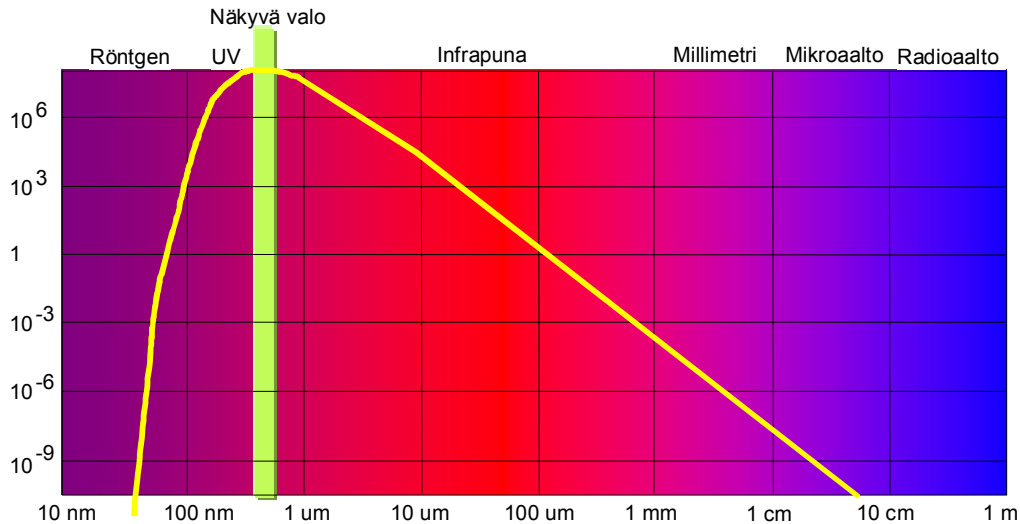
Kuvasta 29 havaitaan, että ihmisen lähettämä kokonaissäteilyteho on pinta-alayksikköä kohti noin 460 W/m^2 . Luonnossa esiintyvät kappaleet eivät noudata mustan kappaleen säteilyä, vaan kappaleiden säteilemä teho tiheys riippuu aallonpituudesta. Tällaisia kappaleita kutsutaan harmaiksi säteilijöiksi erotukseksi teoreettisesta mustasta kappaleesta. Näihin palataan myöhemmin sensorijärjestelmien käsittelyn yhteydessä. Kaikki kappaleen kohtaama säteilyenergia joko heijastuu kappaleen pinnasta, läpäisee kappaleen tai absorboituu siihen. Siten materiaalin absorptio-, läpäisy- ja heijastuskerrointen summa on 1.



Kuva 29: 300 - 1000 Kelvin-astetta lämpimän mustan kappaleen puoliavaruuteen säteilemä kokonaislämpöteho pintalämpötilan (T) funktiona pinta-alayksikköä kohti (W/m^2) Stefan-Boltzmannin lain mukaan.

Aurinko

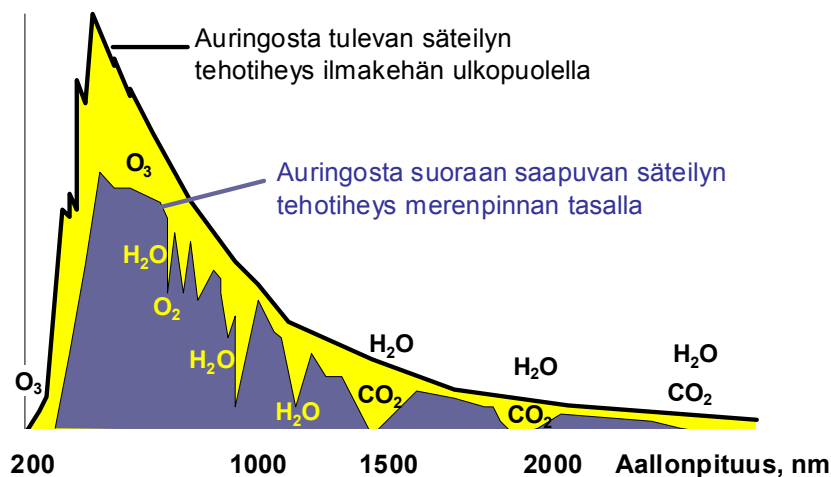
Auringon säteilyteho on maan pinnalla noin 1367 W/m^2 koko spektrillä. Tästä vain alle puolet on näkyvää valoa ja loppu infrapuna- ja ultraviolettisäteilyä. Radioaallot ja röntgen-säteily muodostavat alle 0,1 % auringon säteilystä.



Kuva 30: 6000 K kuuman kappaleen lähettämän säteilyn intensiteettiä on näkyvänä valona tunnetuilla aallonpituuksilla. On huomattava, että osa auringosta lähtevästä säteilystä on luonteeltaan muuta kuin mustan kappaleen säteilyä, esimerkiksi aurinkosoihtujen elektronien kiihdytysprosessissa syntyvä lyhytaaltainen säteily.

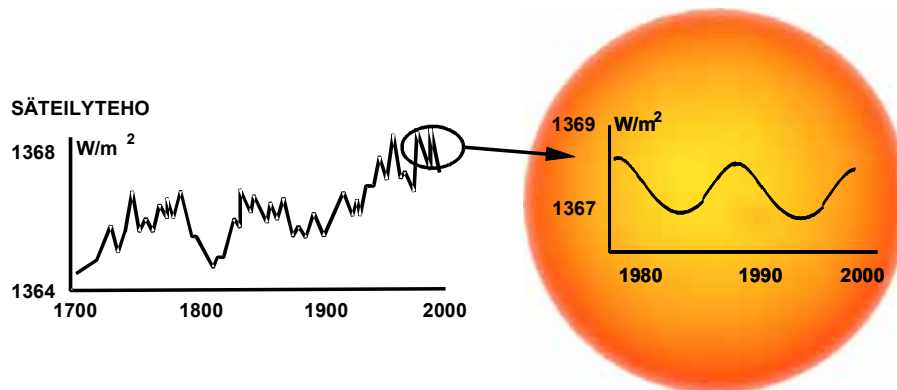
Vain osa auringon säteilystä pääsee maanpinnalle, koska ilmakehä vaimentaa säteilyä kaikilla aallonpituuksilla. Lisäksi ilmakehän kaasujen, ennen kaikkea hapen O_2 ja hiilidioksidin CO_2 sekä vesihöyryn H_2O resonanssitaajuuksilla auringosta tulevan säteilyn tehosiheys laskee huomattavasti.

Tehosiheys, $\text{kW m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$



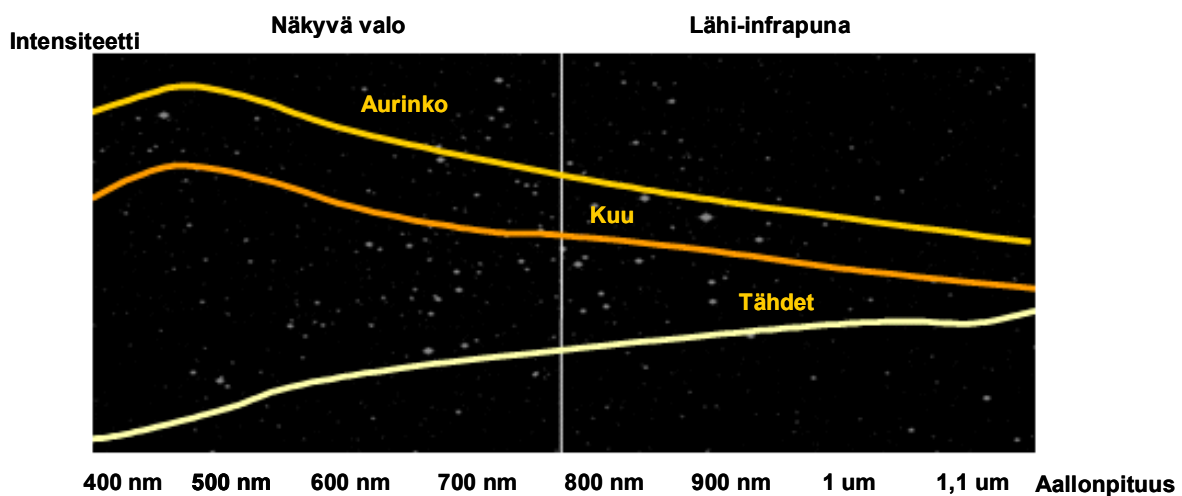
Kuva 31: Ilmakehän kaasumolekyylit vaikuttavat auringon säteilyspektriin maan päällisissä olosuhteissa. Lisäksi on huomattava, ettei aurinkokaan ole teoreettinen musta kappale, vaan senkin säteilyspektriin vaikuttavaa sen koostumus.

Auringon säteilyteho ei ole vakio, vaan muuttuu sekä auringon 27-vuorokautisen pyörähdysajan mukaan että 11-vuotisen syklin mukaan. Tällöin erityisesti auringosta tulevan lyhytaaltoisen (ultravioletti- ja röntgensäteilyn) sekä pitkäaaltoisen (radioaallot) säteilyn intensiteetti muuttuu. Pidempiaaltoisen säteilyn, kuten näkyvän valon ja infrapunasäteilyn intensiteetti ei kuitenkaan muutu mainittavasti. Esimerkiksi 11-vuotisen syklin aikana auringon kokonais-säteilyteho muuttuu vain 0,1 %, mutta ultraviolettialueella muutos vaihtelee aallonpituudesta riippuen useista prosenteista satoihin prosenteihin. Radiohiilimittausten (^{14}C) perusteella auringon säteilyteho muuttuisi myös 88, 210 ja 2300 vuoden välein, vaikka luotettavia mittaustuloksia onkin vasta vain 11-vuotisesta syklistä.



Kuva 32: Auringon säteilytehon muutoksia 300 vuoden aikana. 11-vuoden jakso saavuttaa seuraavan maksiminsa vuonna 2000. Muutokset IR-alueella ovat pieniä, auringonpilkuista johtuva suurin muutos, 0,3 % kestää noin kuukauden. 11-vuoden syklissä tapahtuva muutos on vain 0,1 % luokkaa.

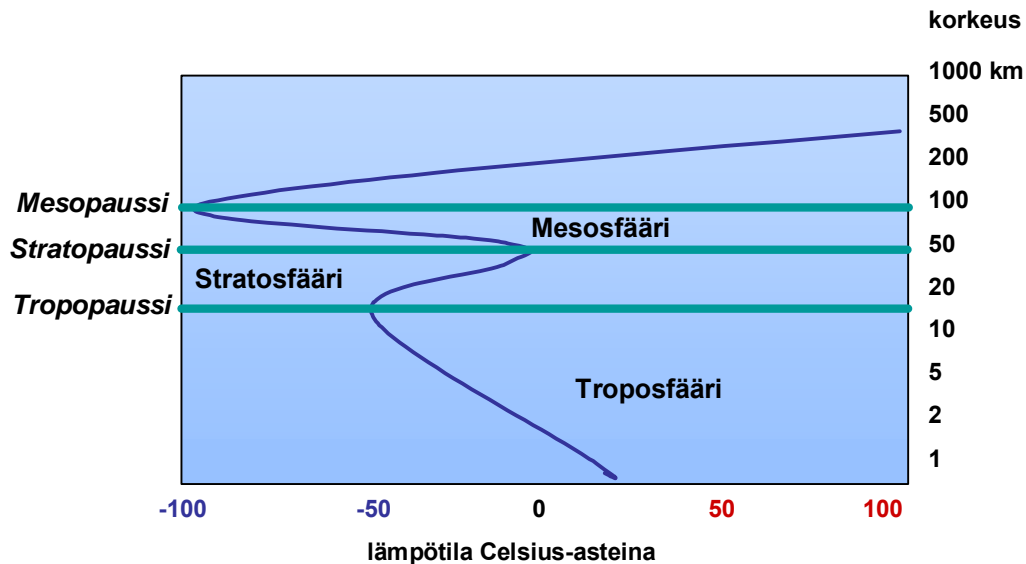
Maapallolle saapuu auringon lisäksi valoa myös kuusta sekä tähdistä. Kuusta saapuvan valon spektri noudattelee luonnollisesti auringon spektriä, onhan kuun valo pääosiltaan auringosta heijastunutta. Tähdistä saapuvan valon spektri puolestaan poikkeaa auringon spektristä sekä tähtien vaihtelevan lämpötilan että punasiirtymän johdosta. Tähtitaivaan maksimi on $1,5 \mu\text{m}$ aallonpituudella.



Kuva 33: Auringon, kuun ja tähtitaivaan valon intensiteetti vaihtelee aallonpituuden mukaan.

Troposfääri

Troposfääri on maapallon ilmakehän osa, jossa ilmakehän sääilmiöt tapahtuvat ja jonka yli korkeintaan vuori ei ylety. Se ulottuu maanpinnalta navoilla 9:n ja päiväntasaajalla noin 17 kilometrin korkeuteen. Troposfääri sisältää 90 % maapallon ilmakehästä ja 99 % ilmakehän vesihöyrystä. Troposfäärin lämpötila laskee korkeuden funktiona noin 6 Celcius-astetta kilometriä kohti ja yläosissa lämpötila on alle $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Kuva 34: Troposfääri muodostaa ilmakehän alimman osan, jossa sääilmiöt tapahtuvat. Sen yläpuolella on stratosfääri ja mesosfääri. Mesosfäärin yläpuolella on ionosfääri. Otsonikerros sijaitsee stratosfäärin yläosassa.

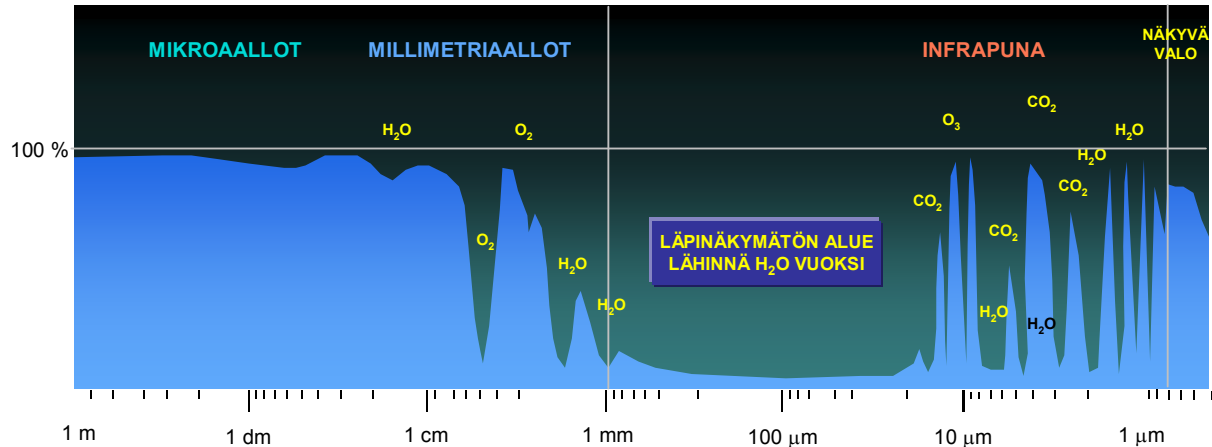
Troposfäärin yleisimmät kaasut ovat typpi N_2 (78,1 %) ja happi O_2 (20,9 %), joiden yhteenlaskettu osuus on 99 %. Muita kaasuja ovat argon Ar (0,934 %), hiilidioksidi CO_2 (0,035 %), vesihöyry H_2O (kosteusprosentista riippuen 0-2 %), neon Ne (0,0018 %), helium HE (0,0005 %) ja krypton Kr (0,0001 %). Muiden kaasujen (Xe, H_2 , CH_4 ja N_2O) osuus on hyvin vähäinen. Luvussa *vuorovaikutus materian kanssa* esitettiin molekyylien värähdysliikkeen olevan yksi infrapuna-aallonpituuksilla vaikuttava absorptio- ja emissiomekanismi. Sen vaikutus on suurin sellaisiin molekyyliin, joilla on dipolimomentti, kuten vesi H_2O , hiilidioksidi CO_2 ja otsoni O_3 . Sen sijaan 99 % ilmakehästä muodostavilla hapella ja tyypellä ei ole dipolimomenttia, joten niiden vaikutus infrapunasäteilyn etenemiseen on olematon. Jos näin ei olisi, ei infrapunasäteily etenisi käytännössä laisinkaan ilmakehässä.

Matalilla taajuuksilla troposfääri ei juurikaan vaikuta säteilyn etenemiseen, mutta vaikutukset kasvavat taajuuden noustessa; 200 nm aallonpituuden jälkeen säteily ei enää etene ilmakehässä. Troposfääri on vesihöyryn aiheuttaman absorptio-voimaksi lähes läpinäkymätön 10 mm aallonpituudelta 15 μm aallonpituudelle asti, erottaen siten pienitaajuisen ja suuritaajuisen säteilyn sovellusalueet selkeästi toisistaan.

Säteilyn etenemiseen troposfäärissä vaikuttavat lämpötila- ja painejakauma, kosteus, sumu ja sade sekä korkeilla taajuuksilla pöly, savu ja muut erittäin pienikokoiset hiukkaset. Nämä kaikki riippuvat

- maantieteellisestä sijainnista (ilmasto)

- vuodenajasta (hetkellisen säätilan esiintymistodennäköisyydet)
- vuorokaudenajasta (valaistusolosuhteiden, udun, sumun, pölyn yms. esiintymistodennäköisyys)
- säätilasta (lämpötila, kosteus, sade, sumu, utu, tuuli, pilvipeite, pilvikorkeus⁴)
- tilanteesta (esimerkiksi taisteluiden alettua savua ja pölyä on enemmän kuin ennen taistelukosketusta)



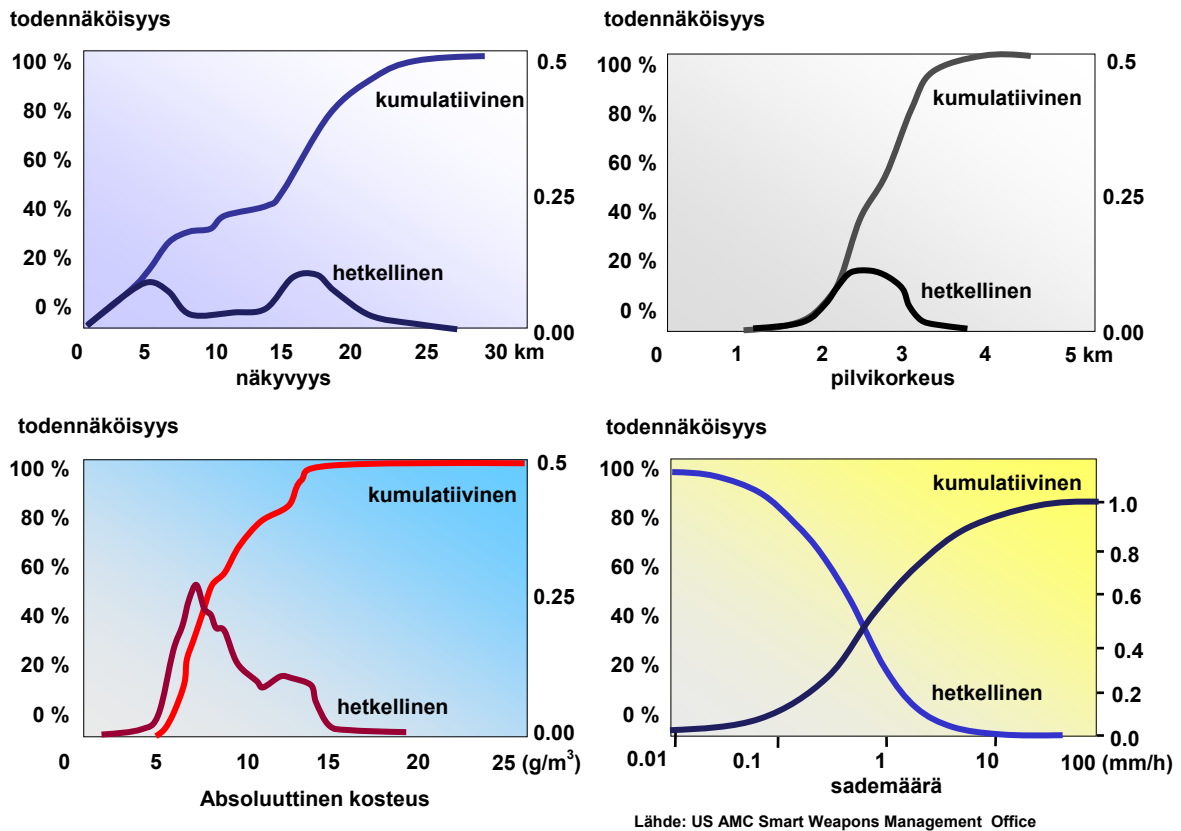
Kuva 35: Troposfäärin läpäisevyys, eli transmittanssi riippuu erittäin voimakkaasti säteilyn aallonpituudesta. Troposfääri on lähes läpinäkyvä millimetriaaltoalueelle asti, minkä jälkeen seuraa voimakkaasti vaimentava spektrin osa, jossa on läpinäkyviä ikkunoita. On huomattava, että otsonia O_3 on lähinnä ilmakehän yläosissa, joten sen vaimentava vaikutus maanpäällä on olematon.

Kuvassa 36 esitetään länsieurooppalaiselle ilmastolle tyypillisiä ominaisuuksia. Vaikka Suomen ilmasto onkin jossain määrin erilainen, antavat nämä viitteitä siitä, minkä tyyppisiä ilmastollisia ominaisuuksia on tilastoitava ja analysoitava erityyppisten sensoreiden käyttökelpoisuutta ja käyttömahdollisuuksia arvioitaessa.

Ilmasto- ja sääolot vaihtelevat suuresti eri osissa Eurooppaa. Ilmastojen luokittelussa on käytössä useita toisistaan hieman poikkeavia tapoja. Tunnetuin on Köppenin ilmastoaluejako, joka nojautuu pääasiallisesti lämpötilan kuukausikeskiarvoihin, vuotuisiin sademääriin ja sateiden vuodenaikaisiin vaihteluihin. Atlantin läheisyys vaikuttaa etenkin Euroopan länsi- ja lounaisosissa, ja siellä vallitsee meri-ilma, jolle on tyypillistä viileät kesät ja leudot talvet. Alueella sateet jakautuvat varsin tasaisesti eri vuodenaajoille. Keski-Euroopassa vallitsee vastaavasti väli-ilma, jossa on kosteanlauhkean meri-ilmaston sekä kylmemmän mannerilmaston piirteitä. Itäisessä Euroopassa vallitsee mannerilmasto, jossa talvet ovat kylmiä ja kesät verraten lämpimiä. Runsaimmat sateet ovat kesällä. Pohjois-Euroopassa vallitsee kylmä tundrailmasto. Suomi luokitellaan kuuluvaksi lumi- ja metsäilmaston kostea- ja kylmätalvis-teen alueeseen. Lämpötila on Suomessa kuitenkin korkeampi kuin vastaavilla leveysasteilla, sillä Fennoskandinavian pohjoisosissa Golfvirran lämmittävä vaikutus on voimakas. Itäiset ilmavirtaukset tuovat mukanaan talvella kylmempää ja kesällä lämpimämpää mannerilmaa. Vuotuinen sademäärä vaihtelee 450-750 mm:n välillä eri puolilla maata. Sateisin aika on

⁴ Sumu tarkoittaa kosteaan ilmaan sameutta, jossa näkyvyys on alle 1 km. Utu tarkoittaa kosteaan ilmaan sameutta, jossa ilman suhteellinen kosteus on yli 90% ja näkyvyys 1-10 km. Auer puolestaan tarkoittaa kuivaa sameutta, jossa ilman suhteellinen kosteus on alle 70% ja näkyvyys alle 10 km.

kesän loppupuolella ja syksyllä. Suomen koon ja pitkien rannikoiden vuoksi paikallinen ilmasto vaihtelee huomattavastikin keskimääräisestä.



Kuva 36: Sää on troposfäärin ilmiö. Keskeiset sään parametrit spektrin hyödyntämisen kannalta ovat visuaalinen näkyvyys, pilvikorkeus, ilman vesihöyrypitoisuus ja sademäärä. Yllä olevat esimerkit ovat Länsi-Euroopasta, joka kuuluu Suomea lämpimämpään ilmastovyöhykkeeseen.

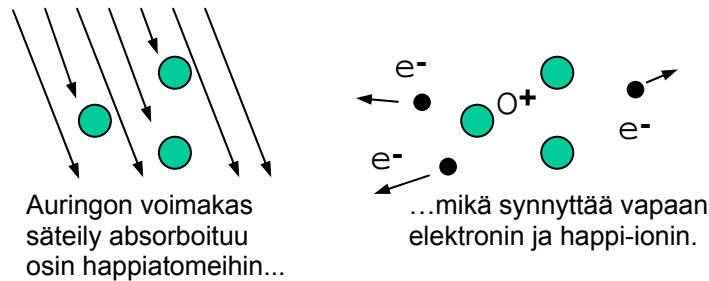
Ionosfääri

Troposfäärin yläpuolella on ohut otsonikerros nimeltään tropopaussi ja sen jälkeen stratosfääri, jossa ilmakehän tiheys on niin pieni että auringon säteily kykenee ionisoimaan kaasumolekyylejä. Stratosfäärin jälkeiset ilmakehän kerrokset ovat mesosfääri, termosfääri ja exosfääri, joissa viimeistä lukuun ottamatta on auringon säteilyn ionisoimaa kaasua ja plasmata. Stratosfääristä termosfääriin ulottuvaa ionisaatioaluetta kutsutaan kollektiivisesti ionosfääriksi.

Ionosfääri koostuu auringon ultraviolettisäteilyn ja auringon hiukkaspommituksen ionisoinnista plasmasta. Ionosfääri ulottuu vuorokaudenajasta ja auringon aktiivisuudesta (aurion-pilkkujen määrästä) riippuen noin 60 kilometristä 1000 kilometriin saakka. Sen elektronitiheys riippuu ionisointi- ja rekombinointiprosessien välisestä tasapainotilasta⁵, joihin

⁵ Ionisoituminen on prosessi, jossa elektroni tai elektroneja irtoaa atomista tai useampien atomien muodostamasta molekyylistä. Rekombinaatiossa puolestaan elektroni sitoutuu positiivisesti varautuneeseen ioniin (atomi tai molekyyli) ja muodostaa neutraalin atomin tai molekyylin. Irrallisten elektronien pilveä kutsutaan plasmaksi.

vaikuttavat auringon säteilyteho eri aallonpituuksilla sekä ilmanpaine. Alle 60 km korkeudella ilmakehä absorboi ionisoivaa säteilyä tehokkaasti ja plasma rekombinoituu varauksettomiksi molekyyleiksi. Yli 1 000 km korkeudella maan kaasukehän tiheys on niin pieni, ettei ionisoituneilla molekyyleillä ole merkitystä radioaallon etenemiselle.



Kuva 37: Ionosfääri syntyy auringon säteilyn irrottaessa happiatomeista elektroneja.

Alle sadan kilometrin korkeudella ilmakehän kaasumolekyylit ovat varsin tasaisesti sekoittuneita, mutta tätä ylempänä eri aineiden suhteellinen osuus vaihtelee korkeuden mukaan. Tällä on vaikutusta myös plasman tiheyteen. Yli 200 km korkeuksilla vallitsevana aineena on happi, joten hapen ionisoituminen on keskeinen tekijä varautuneen ionosfäärin syntymisessä.

Kun radioaalto tunkeutuu plasmaan, sen sähkökenttä saa aikaan varautuneisiin ioneihin kohdistuvan voiman. Tämä voima liikuttaa sekä positiivisia ioneja, että niitä noin 1000 kertaa kevyempiä elektroneita saaden aikaan sähkövirran, joka värähtelee radioaallon tahdissa.

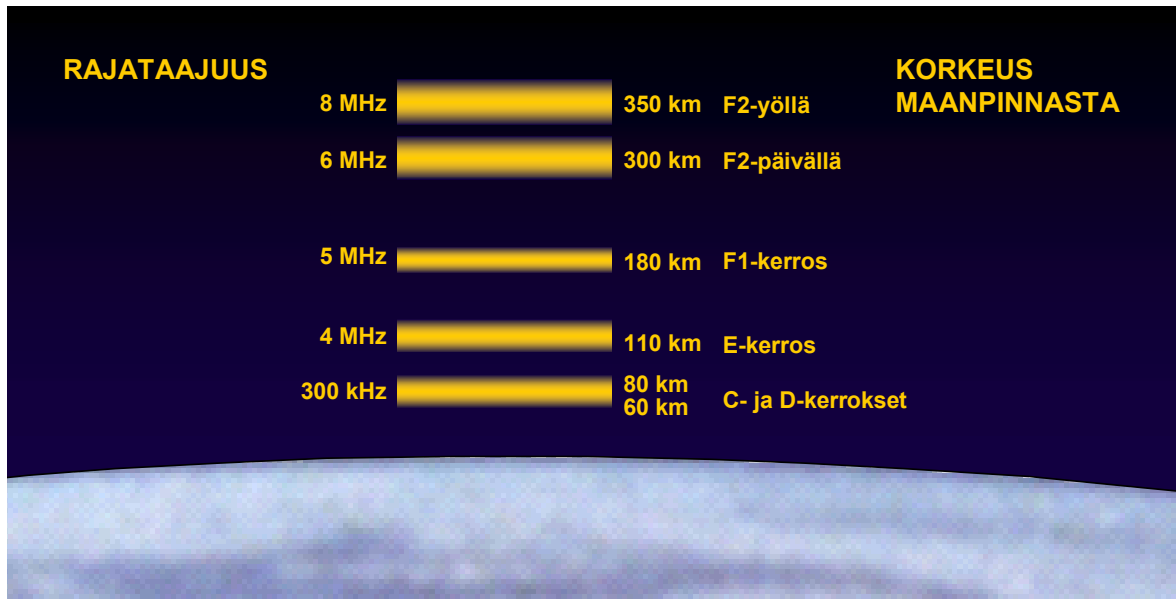
Plasma on luonteeltaan anisotrooppista väliainetta. Maan magneettikenttä kiertää plasman läpi kulkevaa radioaaltoa aallon suunnasta riippuen eri suuntaan. Tämä aiheuttaa polarisaatioon ns. Faradayn kiertymistä. Tämän vuoksi esimerkiksi satelliittitietoliikenteessä käytetään ympyräpolarisaatiota, koska siinä polarisaatiokulman muuttuminen ei häiritse antennin toimintaa.

Radioaalto ei läpäise ionosfääriä tietyn, tilanteen mukaan vaihtelevan, rajataajuuden (noin 10 MHz) alapuolella. Jos taajuus on rajataajuutta suurempi, ionosfääri ei juurikaan vaikuta aallon etenemiseen. Rajataajuus f_N riippuu ionosfäärin elektronitiheydestä N :

$$f_N = 9 \cdot \sqrt{N}$$

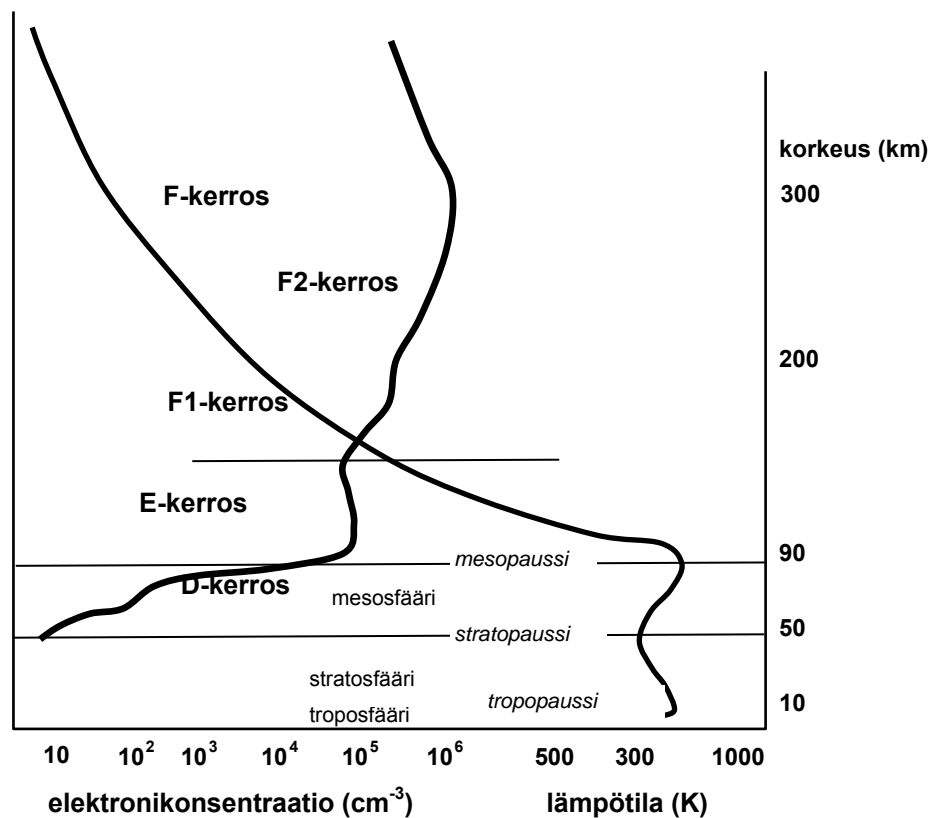
Ionosfäärin elektronitiheys riippuu auringon aktiivisuudesta, vuorokaudenajasta, vuodenaajasta sekä maantieteellisestä sijainnista. Suurimmillaan (10^{12} kpl/m³) se on noin 250-400 km korkeudella päivisin.

Ionosfääri jaetaan C-, D-, E- ja F-kerroksiin. C- ja D-kerrokset sijaitsevat noin 60-80 km korkeudessa. Ne synnyttää auringosta tuleva säteily, jonka aallonpituus on yli 100 nm. Koska nämä kerrokset sijaitsevat matalalla, on plasman rekombinaationopeus suuri, minkä vuoksi kerrokset katoavat yöllä kokonaan. Kerros heijastaa noin 3-300 kHz taajuisia radioaaltoja. Ionosfäärin aiheuttama vaimennus aiheutuu pääosin D-kerroksesta.



Kuva 38: Ionosfäärin yksinkertaistettu kerrosmainen rakenne.

D-kerroksen yläpuolella oleva E-kerros sijaitsee noin 110 km korkeudella. Sen synnyttää auringosta tuleva röntgen- (alle 15 nm) ja UV-säteily (80 - 100 nm). E-kerros muodostuu pääosin plasmasta ja O_2^+ -ioneista. Sen rajataajuus on noin 4 MHz. E-kerroksesta tapahtuvaa heijastusta hyväksikäyttävissä yhteyksissä suurin yhdellä hypyllä saavutettavissa oleva yhteysväli on noin 2 300 km.



Kuva 39: Ionosfäärin elektronitiheys ja lämpötila korkeuden funktiona.

F-kerroksen ionisaation synnyttää auringosta tuleva 15-80 nm aallonpituisen säteily, joka ei juurikaan etene alle 140 km korkeudelle. F-kerros jakautuu päivisin F₁- ja F₂-kerroksiin. F₁ sijaitsee noin 180 kilometrin korkeudella. F-kerroksen alaosaan muodostaa NO⁺-ionit ja yläosan O⁺-ionit. Sen rajataajuus on noin 5 MHz. Ionosfäriheijastusta hyödyntävien järjestelmien kannalta tärkeä F₂-kerros sijaitsee päivällä noin 300 km korkeudella ja yöllä noin 350 km korkeudella. Päivällä rajataajuus on noin 8 MHz ja yöaikaan noin 6 MHz. F₁-kerroksesta heijastuvilla aalloilla voidaan yhdellä hypyllä saavuttaa noin 3000 km yhteyksiä ja F₂-kerroksesta heijastuvilla aalloilla päivisin 3500 km ja yöaikaan jopa yli 4100 km yhteyksiä.

F-kerroksen yläpuolella positiivisten O⁺ ionien konsentraatio on hyvin pieni ja H⁺ sekä He⁺ ionit dominoivat. Tällä alueella kaasun tiheys on kuitenkin jo niin pieni, ettei ionisaatiolla ole juurikaan merkitystä esimerkiksi radioaaltojen etenemiselle.

Ionosfäärin elektronitiheys vaihtelee suuresti ajan ja paikan mukaan. Aurinkosoihtujen röntgensäteilyn aikaansaama ionosfäärin alaosaan voimakas ionisoituminen lisää ionosfäärin vaimennusta aiheuttaen signaalien häipymistä tai jopa yhteyden täydellisen katkeamisen. Myös ydinräjähdysten synnyttämä sähkömagneettinen pulssi (EMP, Electromagnetic Pulse) lisää ionisaatiota, jolloin ionosfäärin alimpien kerrosten vaimennus kasvaisi voimakkaasti estäen pitkät radioyhteydet.

RADIOTAAJUINEN SÄTEILY

Edellä on käsitelty säteilyn perusominaisuuksia sekä ympäröivän luonnon vaikutusta säteilyn etenemiseen. Seuraavaksi siirrytään tarkastelemaan sähkömagneettisen spektrin käyttöä ja käytettävyyttä eri taajuuksilla ja aallonpituuksilla.

Radioaallot

Spektrin alapäässä (taajuus hyvin pieni, eli aallonpituus hyvin suuri) sijaitsevat radioaallot. Ne jaetaan seuraaviin alueisiin:

ELF	(Extremely Low Frequency)	30 – 3000 Hz
VLF	(Very Low Frequency)	3 – 30 kHz
LF	(Low Frequency)	30 – 300 kHz
MF	(Medium Frequency)	0,3 – 3 MHz
HF	(High Frequency)	3 – 30 MHz
VHF	(Very High Frequency)	30 – 300 MHz
UHF	(Ultra-High Frequency)	0,3 – 3 GHz

Aaltoalueita on nimetty ajan mittaan sitä mukaa kuin sovelluksia uusille alueille on kehitetty. Tämä näkyy ääritaaajuusalueiden hieman keinotekoiselta kuulostavassa nimeämisessä.

ELF- (30 Hz - 3 kHz) ja VLF-alueet (3 - 30 kHz)

ELF- ja VLF-alueita käytetään lähinnä radionavigointiin sekä meriviestiliikenteeseen signaalien luotettavan etenemisen ja pienen yhteysvälivaimennuksen vuoksi. Suuren aallonpituuden (10 000 – 1 000 km) vuoksi vaadittavat antennirakenteet ovat hyvin suuria.

Aaltojen polarisaatio on yleensä vertikaalinen ja ne etenevät maanpinnan ja ionosfäärin D- ja E-alueiden välisessä noin 50 - 90 km korkeassa aaltojohdossa. Etenemisvaimennus tällä alueella on hyvin pieni (alle 50 Hz taajuuksilla alle 1 dB/1000 km ja 20 kHz taajuudella luokkaa 5 - 15 dB/1000 km). Nämä matalataajuiset aallot etenevät jonkin verran myös meriveteen, minkä vuoksi suurvallat käyttävät VLF-alueutta maa-asemien ja sukellusveneiden väliseen kommunikointiin. Meriveden hyvän johtavuuden vuoksi VLF-alueutta korkeammat taajuudet vaimenevat hyvin voimakkaasti eivätkä aallot kykene tunkeutumaan pinnan alle. LF alueella merivesi käyttäytyy kuin johde, mutta VLF-alueella kuin häviöllinen dielektrinen väliaine.

LF (30 - 300 kHz)

LF-alueutta käytetään radionavigointiin sekä meriviestiliikenteeseen. DECCA-navigointijärjestelmä toimii 70 - 129 kHz alueella ja LORAN-C 100 kHz alueella. NDB-radiomajakat (Non-Directional Beacon) käyttävät 190 ja 535 kHz välistä aluetta. Pitkäaalto radiolähetykset käyttävät aluetta 148,5 kHz - 283,5 kHz.

LF-aallot etenevät maanpinta-aaltoina (ground waves) heijastumalla ionosfääristä (sky waves) tai suoraan näköyhteysreittiä pitkin (space waves) mahdollistaen pitkiä yhteyksiä.

MF (300 kHz - 3 MHz)

MF-alueutta käytetään radionavigoinnissa, liikkuvissa (meri- ja ilma-) ja kiinteissä viestiliikennejärjestelmissä sekä horisontin taakse katsovissa tutkajärjestelmissä. Lisäksi aluetta käytetään yleisradiolähetyksiin (keskiaaltoradiolähetykset 526,5 kHz - 1606,5 kHz) ja radioamatööritarpeisiin.

MF-aallot etenevät päiväsaikaan maanpinta-aaltoina. Yöllä ionosfäärin D-kerros ei vaimenna ionosfäärissä kulkevia aaltoja, minkä vuoksi MF-aallot heijastuvat E-kerroksesta aiheuttaen häiriötä kaukana olevissa järjestelmissä. Yöllä toteutettavissa olevat yhteyvälit ovat pidempiä, mutta yhteydet ovat samalla häiriöllisempiä.

HF (3 - 30 MHz)

Maanpinta-aalto vaimenee nopeasti HF-taajuuksilla, minkä vuoksi ionosfääristä tapahtuva heijastuminen on primäärinen etenemismuoto. Pinta-aallon maksimikantaman ja ionosfäriheijastuksen minimietäisyyden väliin noin 30 - 60 km etäisyydelle lähetimestä saattaa jäädä kuollut alue, johon ei saada radioyhteyttä⁶. HF-alueutta käytetään muun muassa pitkän kantaman maa-, meri- ja lentoliikenteen viestiliikennetarpeisiin, radioamatöörikäyttöön, radioastronomiaan sekä yleisradiolähetyksiin (lyhytaaltolähetykset). Pitkän kantaman vuoksi HF-alueella on runsaasti sotilas- ja diplomaattiviestiliikennettä. HF-alue on hyvin ruuhkainen, osin sen vuoksi, että kaukanakin toisistaan sijaitsevat lähetykset häiritsevät toisiaan. HF-alueutta hyödynnetään myös horisontin taakse katsovissa yksi- ja monipaikka- ja takaisin-sirontatutkissa (OTH, Over The Horizon), joiden kantama on 900 - 3200 km.

F₂-kerroksessa tapahtuva heijastus on ensisijainen mekanismi yöaikaan. Päiväsaikaan heijastus tapahtuu lisäksi F₁- ja E-kerroksista. Paras yhteydellä käytettävä taajuus riippuu monista

⁶ NVIS-järjestelmässä (Near Vertical Incident Skywave) HF-aalto lähetetään lähes suoraan ylöspäin, jolloin osa siitä heijastuu lähes suoraan alaspäin. Tämä mahdollistaa yhteydet noin 300 km etäisyyksille HF-asemasta, mutta edellyttää omia erityisratkaisuitaan, sillä suoraan etenevä aalto interferoi heijastuneen kanssa, mikä aiheuttaa syviä häipyymiä signaaliin.

tekijöistä, kuten vuorokauden ja vuoden ajasta, yhteysvälin pituudesta, haluttavasta heijastuskorkeudesta sekä auringon aktiivisuudesta. Tyypillisesti korkeammat taajuudet ovat parhaita päivällä ja matalimmat yöaikaan.

VHF (30 - 300 MHz)

Merkittävin etenemismekanismi VHF-alueella on näköyhteysreitti, mutta VHF-aallot voivat myös heijastua ionosfäärin E-kerroksesta (Rundown Sporadic E) tai siroutua meteorien jättämistä ionisaatiovanoista aiheuttaen järjestelmien keskinäisiä häiriöitä. Kasvillisuus ja maanpinnan peitteisyys lisäävät vaimennusta merkittävästi VHF-alueen yläpäässä, minkä vuoksi maanpäälliseen pitkän matkan (kymmeniä kilometrejä) viestiliikenteeseen ja yleisradiolähetyksiin käytetään pääasiassa VHF-alueen alapäätä.

VHF-aluetta käytetään pääsääntöisesti kiinteän ja liikkuvan tietoliikenteen tarpeisiin. Lisäksi kaistaa hyödynnetään radioastronomiassa, radionavigoinnissa sekä tutkakäytössä. Venäläisillä ja ranskalaisilla on VHF-alueella toimivia pitkän kantaman ennakkovaroitustutkia, joiden kantama voi olla 1000 km luokkaa. Siirtyvä maaradioliikenne, mm. taksit, elinkeinoelämä ja energiahuolto käyttävät alueen alapäätä (75,2 - 87,5 MHz) pienen etenemisvaimennuksen vuoksi. Samasta syystä VHF-kenttäradiot toimivat tyypillisesti 30 ja 88 MHz välisellä kaistalla. Yleisradiolähetyksiin on varattu kolme aluetta:

VHF I	47-68 MHz	TV-kanavat 2-4
VHF II	87,5-108 MHz	yleisradiolähetykset
VHF III	174-230 MHz	TV-kanavat 5-12

Ilmailuliikenteessä käytetään ylempää VHF-kaistaa viestiliikenteeseen (117,975 - 144 MHz), radionavigointiin (108 - 117,975 MHz) ja laskeutumisjärjestelmiin (esimerkiksi VOR 108 - 118 MHz, ILS 108 - 112 MHz). Kaukohakujärjestelmässä (KAUHA) käytetään 146 - 174 MHz. Aluetta 230 - 308 MHz käytetään sotilaskäytössä.

UHF (300 MHz - 3 GHz)

UHF-alueella radioaalto etenee lähes pelkästään näköyhteysreittiä pitkin ja yhteydet rajautuvat lähettimen ja vastaanottimen antennien korkeuksista riippuvaan radiohorisonttiin. Esteet näköyhteysreitillä vaimentavat signaalia voimakkaasti.

UHF-alue on lähes täynnä, eli lähestulkoon kaikki taajuudet on allokoitu ja käytössä eri sovelluksissa. Aluetta käytetään kiinteiden ja siirrettävien radiolinkkien tarpeisiin (Alueella 308 - 320 MHz on paikallis- ja yleisradioiden ääniohjelmansiirtoon tarkoitettuja yksisuuntaisia kiinteitä ja siirrettäviä linkkejä ja useita allokoiteja 335,4 ja 2690 MHz välisellä alueella; myös NATO:n taktiset radiolinkit toimivat tällä alueella: I-kaista 225 - 400 MHz, II-kaista 610 - 960 MHz ja III-kaista 1350 - 1850 MHz, televisiolähetyksiin (470 - 790 MHz, TV-kanavat 21 - 60 (alue IV ja V) sekä digitaaliset TV-lähetykset) sekä satelliittilinkkeihin (1,4 ja 1,6 GHz INMARSAT, Iridium, Globalstar). UHF-aluetta käyttävät myös terrestriaalisolukoverkot, kuten NMT450 ja NTM900, GSM (890 - 960 MHz), DECT (1,88 - 1,90 GHz), DCS-1800. Lisäksi alueella toimivat GPS- (1,575 - 1,228 GHz) ja GLONASS-satelliitti-paikannusjärjestelmät (1240 - 1260 MHz).

Viranomaisviestiliikennekäyttöön tarkoitettu TETRA-järjestelmä toimii alueilla 380 - 385 ja 390 - 395 MHz. Alueella on myös reguloimattomia taajuuksia, esim. johdottomat puhelimet

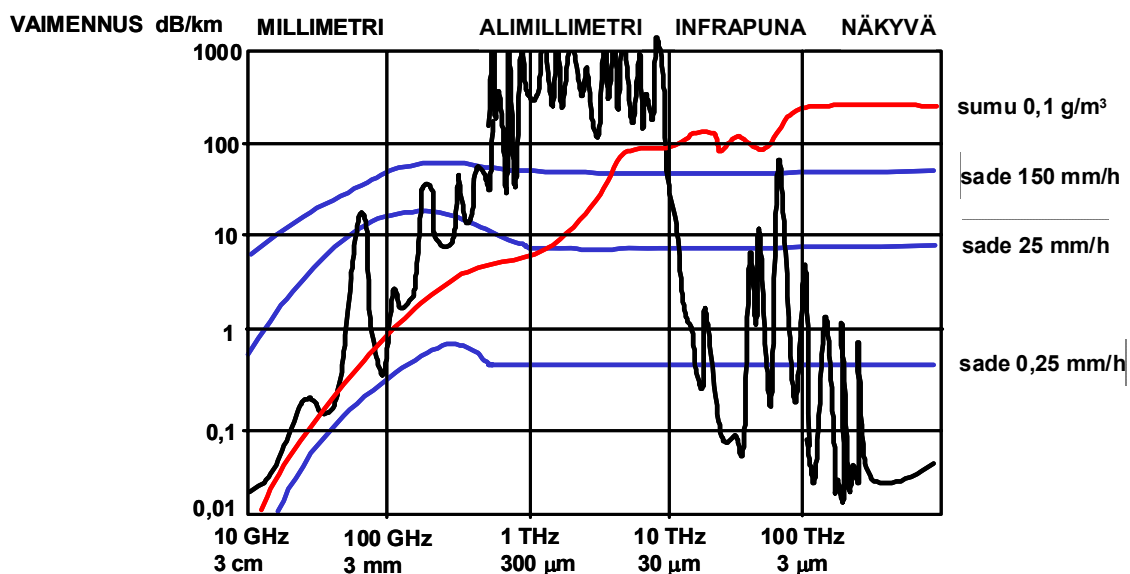
ja mikrofonit. 2,4 GHz ISM-kaistaa voidaan käyttää vapaasti lyhyen kantaman sovelluksiin. Langattomat lähiverkot käyttävät alueita 2,4 GHz (IEEE 802-11).

VHF- ja UHF-alueella toimivat tutkat ovat yleensä ennakkovaroitustutkia. Esimerkkinä mainittakoon E-2C Hawkeye (400 MHz alueella) sekä Pave Paws mannertenvälisten ohjusten ennakkovaroitustutka (420 - 450 MHz). 1-3 GHz välinen aluetta käytetään valvontatutkissa, koska sillä on saavutettavissa tähän tarkoitukseen optimaalinen kompromissi lähetystehon, antennin koon sekä saavutettavan erottelukyvyn kesken.

Vaikka VHF-alueella voidaankin saavuttaa pidempiä yhteysvälejä ja havaitsemisetaisyyksiä kuin korkeammilla taajuuksilla, joudutaan järjestelmät rakentamaan suurikokoisiksi pitkän aallonpituuden vuoksi. Tämän vuoksi suuri osa nykyisistä liikkuvista tutkista on siirtynyt SHF-alueelle. Häiveteknologian käyttö lentokoneissa ja laivoissa on tosin johtanut kiinnostuksen heräämiseen uudelleen VHF- ja UHF-alueen tutkiin.

Mikroaallot

SHF- (Super-High Frequency) ja EHF-alueiden (Extremely-High Frequency) yhteydessä puhutaan yleensä **mikroaalloista**. EHF-alue ulottuu 300 GHz:iin, jossa aallonpituus on millimetrin. Tästä eteenpäin nimeämisen tukena käytetään lähes poikkeuksetta aallonpituutta, sillä yli terahertsin (THz) luokkaa olevat taajuudet olisivat turhan hankalia mieltää. Samoin energian siirtomekanismin yleisin nimitys vaihtuu aalloista säteilyyn (vrt. radio- ja mikroaallot, mutta infrapuna- ja ultraviolettisäteily), vaikka kyse on samasta ilmiöstä.



Kuva 40: Kirkkaan ilmakehän kaasujen absorptiosta johtuva vaimennus sekä kosteuden (sade ja sumu) aiheuttama lisävaimennus kasvaa voimakkaasti EHF-alueelta alkaen.

SHF (3 - 30 GHz)

SHF-aluetta käytetään kiinteiden televerkkojen radiolinkeissä (myös taktisissa radiolinkkijärjestelmissä), radionavigointijärjestelmissä (mm. MLS laskeutumisyjärjestelmä 5 GHz tietämillä) sekä satelliittilinkeissä. Tulevaisuudessa aluetta tullaan käyttämään myös lyhyen kantaman langattomissa tietokonesovelluksissa, kuten HIPERLAN:ssa (5 GHz alueella). Radio-

aallon eteneminen perustuu puhtaasti näköyhteysreittiin, missä ilmakehän ja sääilmiöiden aiheuttama vaimennus on otettava huomioon (yleensä 10 GHz alkaen). SHF-alueella aallonpituus on niin pieni, että maanpintaa ei voida katsoa tasaiseksi heijastavaksi pinnaksi. Tällöin radioaalto ei heijastu, vaan siroaa osuessaan pinnan epätasaisuuksiin ja heijastuskertoimen arvo on alle yhden. Tämän vuoksi maanpinnan heijastuksista johtuvat interferenssiongelmien ovat vähäisempiä kuin UHF- ja VHF-alueilla. On tosin huomattava, että toimittaessa veden yllä heijastukset ovat merkittävä interferenssiongelmien lähde.

Useimmat hyvää erottelukykyä tarvitsevat pienikokoiset tutkat, kuten lentokoneiden valvonta- ja monitoimitutkat, ilmatorjunnan seurantatutkat, maastonvalvontatutkat, vastatykistö- tutkat sekä säätutkat toimivat SHF-alueella.

EHF (30 - 300 GHz)

EHF-alueella aallonpituus on millimetrituokkaa, minkä vuoksi alueesta käytetään myös nimitystä millimetriaaltoalue. Hyvin lyhyen aallonpituuden vuoksi tutkajärjestelmien komponentit, erityisesti antennit, ovat pienikokoisia, minkä vuoksi millimetriaaltotutkia käytetään hyväksi ohjuksissa ja maaliin hakeutuviin ammuksissa. EHF-taajuuksilla ilmakehän vaimennus on suuri, mikä pakottaa järjestelmät toimimaan ilmakehän vaimennusikkunoissa, esimerkiksi 94 GHz alueella.

Nykyisillä lähetinkomponenteilla saavutettavissa oleva teho laskee taajuuden noustessa, EHF-alueella tehon lasku on verrannollinen taajuuden neliöön. Pienehkö käytettävissä oleva teho ja suuri etenemisvaimennus rajaavat millimetriaaltotutkien kantaman lyhyeksi.

Millimetriaaltoalueelta alkaen ilmakehän vaimennus kasvaa suureksi, minkä vuoksi millimetri- ja infrapuna-alueiden välissä ei juuri ole teknisiä sovelluksia. Ilmakehässä on millimetriaaltoalueella neljä kapeaa ikkunaa 8600, 3200, 2100 ja 1400 μm aallonpituuksilla (34, 94, 142 ja 214 GHz taajuuksilla), jotka mahdollistavat lyhyen kantaman tiedonsiirto- tai sensorijärjestelmien käyttämisen näillä taajuuksilla.

Tutkataajuuskaistat

Tutkasovellusten kehittyessä toisen maailmansodan aikana nimettiin tutkatekniikan käyttöä varten omia taajuuskaistoja. Kaistojen jako- ja nimeämiskäytäntöjä on kaksi. Toinen on toisen maailmansodan sodan voittaneiden länsiliittoutuneiden käyttämä jako, jossa kaistat nimettiin salailusyistä mielivaltaisilla kirjaimilla:

<u>nimi</u>	<u>taajuusalue</u>	<u>tyypillisiä esimerkkejä käyttötarkoituksista</u>
P	230 MHz – 1 GHz	pitkän kantaman (vanhat, mutta antihäive-)tutkat, kasvillisuutta, jäätä ja maata läpäisevät tutkat
L	1 – 2 GHz	ilma- ja merivalvontatutkat, 2D-valvontatutkat
S	2 – 4 GHz	kohdevalvontatutkat, 3D-valvontatutkat, AWACS
C	4 – 8 GHz	vastatykistötutkat, meteorologiset tutkat
X	8 – 12 GHz	hävittäjä- ja ilmatorjuntajärjestelmien tulenjohtotutkat, maastonvalvontatutkat
Ku	12 – 18 GHz	maastonvalvontatutkat, tulenjohtotutkat ja
K	18 – 26.5 GHz	täsmäaseiden millimetrihakupäät
Ka	26.5 – 40 GHz	täsmäaseiden millimetrihakupäät

Toinen jako- ja nimeämisperuste on NATO:n käyttämä:

A	0 – 250 MHz
B	250 – 500 MHz
C	500 MHz – 1 GHz
D	1 – 2 GHz
E	2 – 3 GHz
F	3 – 4 GHz
G	4 – 6 GHz
H	6 – 8 GHz
I	8 – 10 GHz
J	10 – 20 GHz
K	20 – 40 GHz
L	40 – 60 GHz
M	60 – 100 GHz

Maapallo on jaettu kolmeen vyöhykkeeseen, joille ITU jakaa taajuuksia eri käyttötarkoituksiin. Siten esimerkiksi D-alueella toimiva tutkajärjestelmä ei – ainakaan rauhan aikana – voi hyödyntää koko D-kaistaa, vaan alueesta riippuen esimerkiksi 1,2 - 1,4 GHz välistä osaa D-kaistalta.

Radiotaajuuden säteilyn etenemiseen vaikuttavat seikat

Sähkömagneettisen säteilyn etenemiseen vaikuttavat ilmakehän troposfäärin, ionosfäärin ja maaston ominaisuudet. Tällöin radioaallon amplitudi, vaihe ja polarisaatio saattavat muuttua. Vaikutukset etenevään säteilyyn voidaan jaotella vaimenemiseen, diffraktioon, heijastumiseen ja siroamiseen.

Ilmakehän epähomogeenisuuksista, ionosfääristä tai maastosta taittavat, heijastuvat tai siroavat aallot aiheuttavat signaalin tasoon satunnaista nopeata vaihtelua (skintillaatio) ja häyymistä (fading).

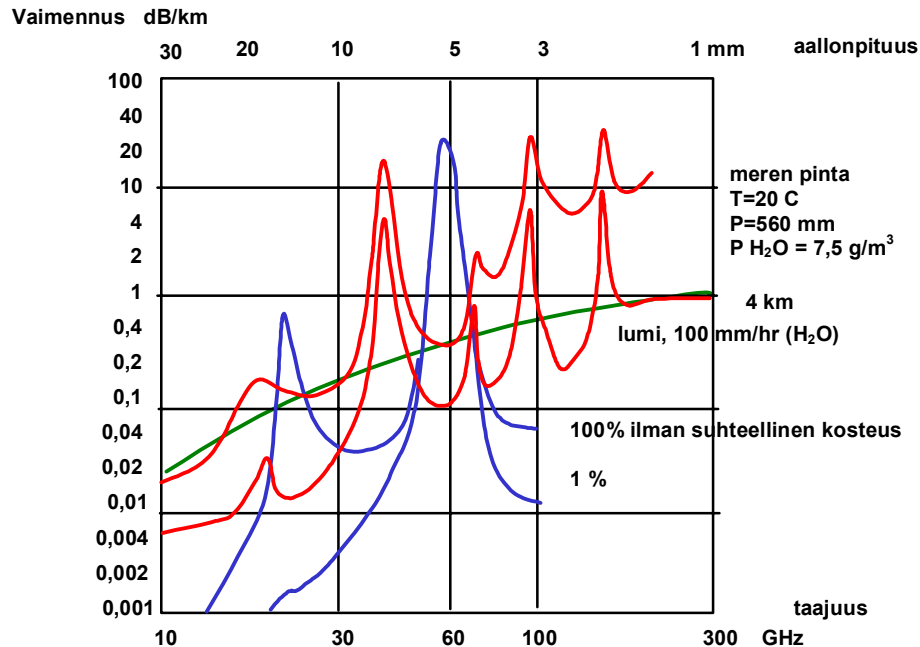
Absorptio

Ilmakehä koostuu pääosin typestä (78 %) ja hapestä (21 %). Kolmanneksi yleisimmän kaasun, hiilidioksidin osuus on vain 0,03 %. Lisäksi ilmakehässä on vaihteleva määrä vesihöyryä, sekä pölyä ja erilaisia savuja. Vesi on voimakkaasti polaarinen molekyyli, jossa happiatomi on paljon vetyatomeja painavampi. Tämän vuoksi veden resonanssispektri on laaja ja absorptio voimakasta laajalla aallonpituusalueella.

Ilmakehän absorptio ja sironta aiheuttavat vaimenemista, joka riippuu voimakkaasti sääolosuhteista. Kirkkaassa ilmakehässä merkittävimmät ilmiöt ovat veden ja hapen aiheuttama radioaaltojen absorptio, joka on suurimmillaan H₂O- ja O₂-molekyylien resonanssitaajuuksilla (rotaatioabsorptio). Hapen määrä ilmakehässä on lähes vakio, mutta vesihöyryn määrä riippuu tunnetusti sääolosuhteista. Tyypillisesti lauhkeassa ilmastossa vettä on noin 1 % merenpinnan tasossa.

Hapen (60 ja 119 GHz) sekä vesihöyryn (22, 183 ja 325 GHz) resonanssitaajuudet aiheuttavat vaimennuspiikkejä ilmakehässä. Vaimennuspiikkien väliin jää niin sanottuja ikkunoita, joissa

vaimennus on ympäristöään alhaisempi. Sotilasovelluksissa vaimennuspiikkejä käytetään hyväksi LPI-järjestelmissä (Low Probability of Intercept), sillä voimakkaan vaimennuksen vuoksi näillä taajuuksilla toimivien järjestelmien havaitseminen, paikallistaminen tai häirintä on hyvin vaikeata, usein käytännössä mahdotonta.



Kuva 41: Ilmakehän aiheuttama vaimennus riippuvuus aallonpituudesta (punainen kirkkaassa ilmakehässä), ilmankosteudesta (sininen) ja sademäärästä.

Sateen, sumun ja pilvien aiheuttama vaimennus on useimmiten suoraan verrannollinen vesihöyryn tai veden määrään. Sateen aiheuttama vaimennus johtuu absorptiosta ja sironnasta. Absorptiossa osa radioaallon energiasta absorboituu vesipisaroiden muodostamaan dielektriseen väliaineeseen.

Sade on merkittävä radioaallon vaimentaja noin 10 GHz taajuuksista alkaen. Sadepisarat ovat muodoltaan litistyneitä, jolloin vertikaalisesti polarisoitunut aalto vaimenee vähemmän kuin horisontaalisesti polarisoitunut. Tämä muuttaa radioaallon polarisaatiota. Vesipisaroiden koko vaihtelee millimetrin osista kymmeneen millimetreihin, joten radio- ja mikroaaltojen sironta noudattaa Rayleigh-sirontaa (vaimennus $\propto \lambda^4$).

Kansanomaisten nimitysten ja satavan vesimäärän suhdetta voidaan kuvata seuraavalla taulukolla:

tihkusade	0,2 – 1 mm/h
sadekuuro	2 – 5 mm/h
rankkasade	16 mm/h (maksimissaan Suomessa 25-50 mm/h lyhytkestoissa sadekuuroissa)

Sateen aiheuttama vaimennus saadaan kaavasta:

$$A = a \cdot R^b$$

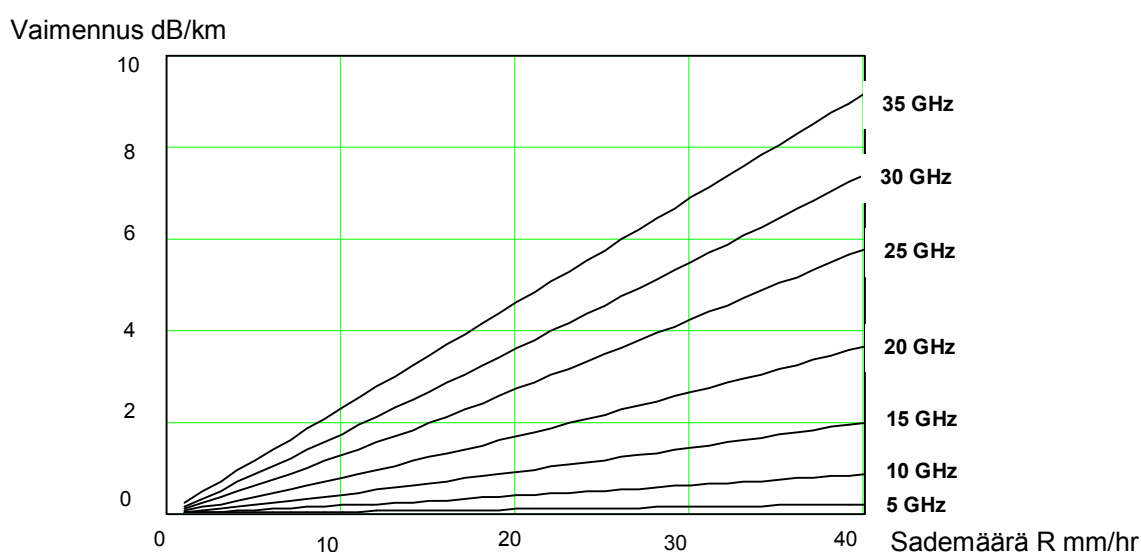
jossa R on sademäärä (mm/h) ja

$$a = G_a \cdot f_{\text{GHz}}^{E_a} \quad b = G_b \cdot f_{\text{GHz}}^{E_b}$$

Taajuus f_{GHz} on esitetty gigahertseinä. Kaavojen vakiot saadaan taulukosta:

f_{GHz}	G_a	E_a	f_{GHz}	G_b	E_b
$f < 2,9$	$6,39 \cdot 10^{-5}$	2,03	$f < 8,5$	0,851	0,158
$2,9 < f < 54$	$4,21 \cdot 10^{-5}$	2,42	$8,5 < f < 25$	1,41	-0,0779
$54 < f < 180$	$4,09 \cdot 10^{-2}$	0,699	$25 < f < 164$	2,63	-0,272

Edellä olevasta kuvasta nähdään, että sateen merkitys on erittäin pitkän kantaman sovelluksia lukuun ottamatta otettava huomioon vasta 10 - 15 GHz taajuuksista alkaen.

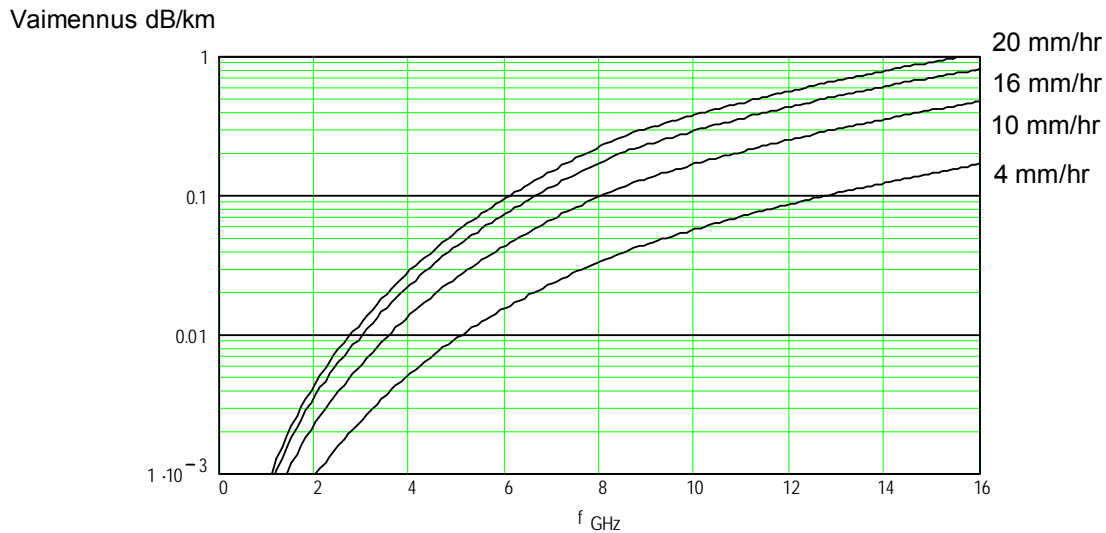


Kuva 42: Radioaallon vaimennus (dB/km) sademäärän R (mm/h) funktiona eri taajuuksilla.

Sumu koostuu 10 - 50 μm kokoisista vesipartikkeleista, joita saattaa olla enimmillään noin 1 g/m^3 . Alle 300 GHz taajuudella sumun aiheuttama vaimennus on suoraan verrannollinen veden määrään. Sumun vesimäärän ja näkyvyyden välistä suhdetta kuvaa taulukko:

vesimäärä	näkyvyys
0.032 g/m^3	2000 jalkaa (670 m)
0.32 g/m^3	400 jalkaa (130 mm)

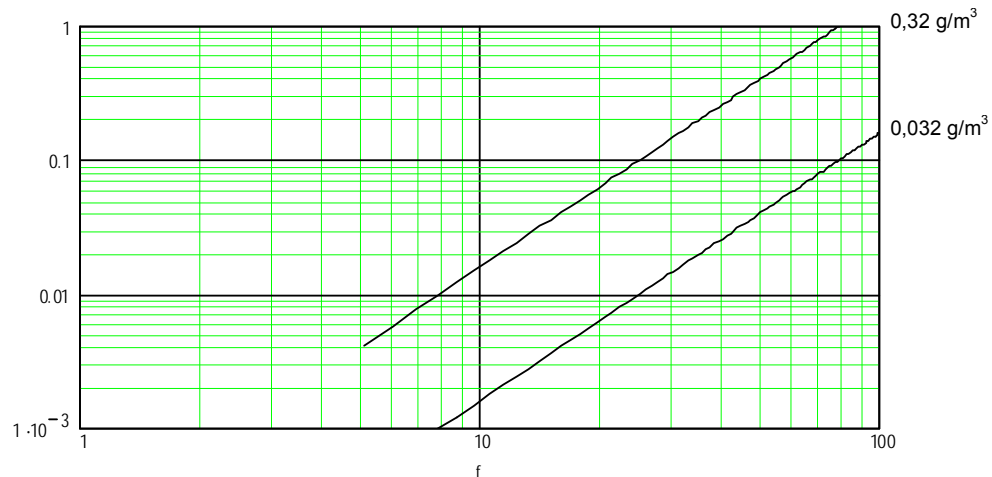
Kuvassa 44 on esitetty sumun aiheuttama vaimennus taajuuden funktiona.



Kuva 43: Radioaallon vaimennus (dB/km) taajuuden funktiona eri sademäärillä (ylimpänä 20 mm/h ja alimpana 4 mm/h).

Jään ja kuivan lumen dielektrisyysvakio on niin pieni, etteivät ne juurikaan vaimenna radioaallon etenemistä. Sen sijaan märkä lumi ja räntä sisältävät lumihiutaleiden joukossa myös vesihöyryä, jolloin ne aiheuttavat suoraan vesimäärään verrannollisen vaimennuksen. Lumisateessa veden määrä on tyypillisesti 1 – 3 mm/h. Millimetrialueella märän lumen vaimennus saattaa olla jopa enemmän kuin sen vesimäärään nähden pitäisi olla. Ilmakehän kaasujen aiheuttama absorptio aiheuttama vaimennus on sovelluksesta riippuen otettava huomioon 3-10 GHz alkaen.

Sumun aiheuttama vaimennus dB/km



Kuva 44: Sumun aiheuttama vaimennus taajuuden funktiona. Ylempi kuvaaja esittää sumua, jossa vesipitoisuus on 0.32 g/m^3 ja alempi sumua, jossa vettä on 0.032 g/m^3 .

Sironta

Sironta kuluttaa etenevästä aaltorintamasta energiaa ja levittää sitä sirottavasta kappaleesta joka suuntaan. Avaruuskulmaan 4π sironnut teho saadaan kertomalla aallon tehoteiheyden P kokonaissirontapoikkipinta-alalla σ_{Σ} . Suurella kappaleella kokonaissirontapoikkipinta-ala on kaksinkertainen geometriseen poikkipinta-alaan nähden ($\sigma_S = 2 \cdot \sigma_g$). Tilavuudesta V siroava teho saadaan kaavasta:

$$P_s = P_i \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi \cdot R^4} \int \sigma_d dV$$

jossa P_i on tulevan sähkömagneettisen säteilyn tehoitiheys, tehopoikkipintatiheys $\sigma_d = \rho \cdot \sigma_s$ ja ρ on sirottavien kappaleiden määrä kuutiometrissä (kpl/m^3).

Kun sironta tapahtuu etäisyydellä R_t lähettimestä, on sirontapisteeseen saapuva tehoitiheys P_i :

$$P_i = P_t \cdot G_t \cdot \frac{1}{4\pi \cdot R_t^2}$$

Mikäli kokonaissirontapoikkipinta-ala on σ_s , siroaa tulevasta tehoitiheydestä P_i teho P_s :

$$P_s = P_i \cdot \sigma_s$$

Tällöin etäisyydellä R_r sirontapaikasta olevaan vastaanottimeen saadaan teho P_r :

$$P_r = P_s \cdot \frac{1}{4\pi \cdot R_r^2} \cdot G_r \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi}$$

tai

$$P_r = \frac{P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \sigma_s \cdot \lambda^2}{(4\pi)^3 \cdot R_t^2 \cdot R_r^2}$$

Yhtälöä voidaan käyttää sekä tapauksissa, joissa lähetin ja vastaanotin sijaitsevat eri paikoissa (erilaiset sirontajärjestelmät, kaksipaikkatutkat, varoittimet) että tapauksissa, joissa lähetin ja vastaanotin ovat samassa pisteessä (tavallinen tutka). Jälkimmäisessä tapauksessa lähetykseen ja vastaanottoon käytetään samaa antennia ($G_t = G_r$) ja yhtälö supistuu **tutkayhtälöksi**:

$$P_r = P_t \cdot G^2 \cdot \frac{\sigma_s}{R^4} \cdot \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3}$$

Tutkayhtälöön sen eri muodoissaan tutustutaan tarkemmin sensorijärjestelmien yhteydessä.

Heijastuminen

Mikäli vastaanottimeen saapuu signaalikomponentteja sekä suoraan että heijastuneena, puhutaan monitie-etenemisestä. Radioaalto voi heijastua maanpinnasta, rakennuksista, vuorista ja muista maanpinnan piirteistä sekä ionosfääristä ja joissakin tapauksissa troposfääristä. Heijastuminen maanpinnasta riippuu maan permittiivisyydestä (ϵ) ja johtavuudesta (σ), jotka puolestaan riippuvat maaperän tyypistä ja olosuhteista, kuten kosteudesta. Heijastuva aalto E_r saadaan maanpintaan osuvasta radioaallostaa E_i heijastuskertoimen ρ avulla:

$$E_r = \rho \cdot E_i$$

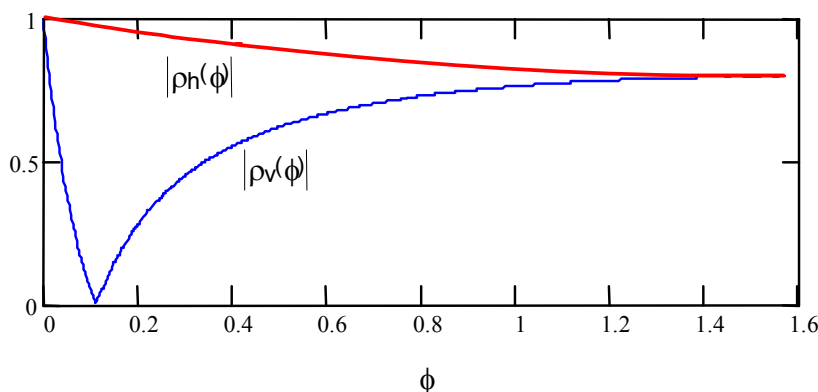
Heijastuskerroin ρ on erilainen vertikaaliselle ja horisontaaliselle polarisaatiolle:

$$\rho_V(\theta) = \frac{\frac{\epsilon_e}{\epsilon_o} \cdot \sin(\theta) - \sqrt{\frac{\epsilon_e}{\epsilon_o} - \cos^2(\theta)}}{\frac{\epsilon_e}{\epsilon_o} \cdot \sin(\theta) + \sqrt{\frac{\epsilon_e}{\epsilon_o} - \cos^2(\theta)}} \quad \rho_H(\theta) = \frac{\sin(\theta) - \sqrt{\frac{\epsilon_e}{\epsilon_o} - \cos^2(\theta)}}{\sin(\theta) + \sqrt{\frac{\epsilon_e}{\epsilon_o} - \cos^2(\theta)}}$$

Heijastuskertoimen riippuu maan sähköisistä ominaisuuksista. Heijastuskertoimeen vaikuttava kompleksinen permittiivisyys riippuu maanpinnan suhteellisesta permittiivisyydestä ϵ_r , maan johtavuudesta σ ja radioaallon kulmataajuudesta ω :

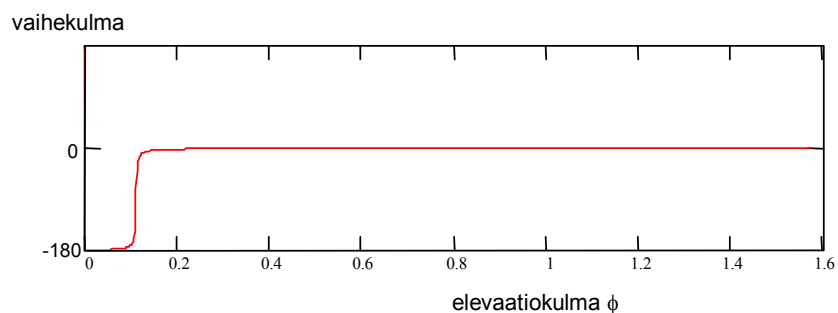
$$\epsilon_e = \epsilon_o \cdot \epsilon_r + \frac{\sigma}{i \cdot \omega}$$

Merivedessä tyypillisesti $\epsilon_r \approx 80$ ja $\sigma \approx 5 \cdot 10^{-3}$, määssä maassa $\epsilon_r \approx 15-30$ ja $\sigma \approx 0,005 - 0,01$, ja kuivassa maassa $\epsilon_r \approx 4$ ja $\sigma \approx 0,001 - 0,01$. Kuvassa 45 on esitetty heijastuskertoimen itseisarvo aallon heijastuessa merenpinnasta. Horisontaalisesti polarisoituneen aallon heijastuskertoimen ei juuri riipu kohtaamiskulmasta, mutta vertikaalisesti polarisoituneen aallon heijastus vaihtelee voimakkaasti kohtaamiskulman mukaan. Tietyllä kulmalla vertikaalisesti polarisoitu aalto ei heijastu ($\rho_V = 0$). Tätä kulmaa kutsutaan Brewsterin kulmaksi.



Kuva 45: Esimerkki vertikaalisen (ρ_V) ja horisontaalisen (ρ_H) polarisaation kohtaamasta merenpinnassa kohtaamasta heijastuskertoimesta. \odot on aallon kohtaamiskulma merenpintaan.

Horisontaalisen polarisaation heijastuskertoimen vaihekulma on lähellä -180 astetta. Vertikaalisen polarisaation vaihekulma riippuu aallon kohtaamiskulmasta. Erittäin pienillä kohtaamiskulman arvoilla $|\rho| = 1$ ja $\phi = -180^\circ$.



Kuva 46: Vertikaalisen aallon heijastuskertoimen vaihekulma. Pienillä tulokulman arvoilla aalto kokee -180° vaiheensiirron, mutta suurilla tulokulman arvoilla vaiheensiirtoa ei tapahdu.

Suoraan vastaanottimeen etenevä aalto ja pinnasta heijastunut aalto muodostavat interferenssikuvion, jossa aaltokomponentit vuoroin vahvistavat ja vuoroin heikentävät toisiaan. Tämä saa aikaan vastaanotettavassa signaalissa nopeita tasonvaihteluita vastaanottimen tai lähettimen liikkuessa toisiinsa nähden. Mikäli tapahtuu vain yksi heijastus maanpinnasta, saadaan interferenssinä syntyvä kenttä vastaanottimessa seuraavasti:

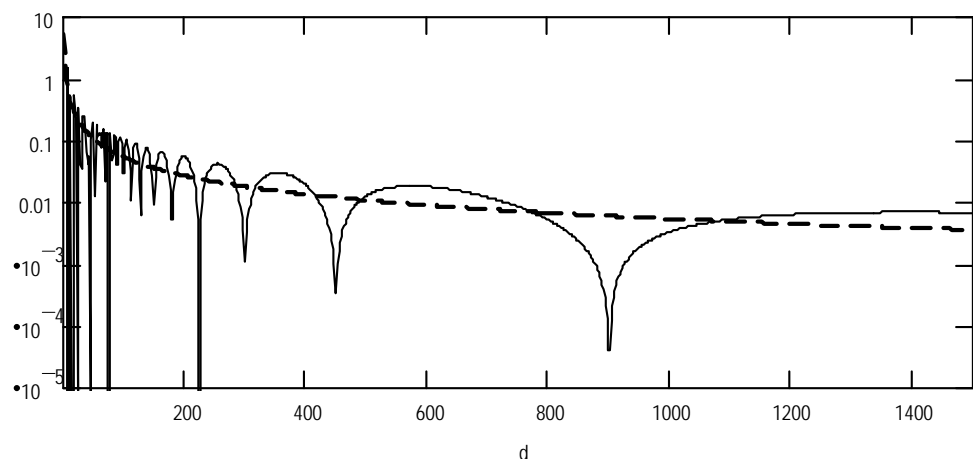
$$E(r) = 2E_d(r) \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot h_t \cdot h_r}{\lambda \cdot r}\right)$$

Tämä interferenssikuvio voidaan nähdä kuvassa 47, jossa on katkoviivalla on esitetty suoraan etenevän aallon taso ja yhtenäisellä viivalla interferenssikuvio.

Edellä on oletettu, että heijastuminen tapahtuu tasaiselta pinnalta. Pintaa voidaan pitää tasaisena, mikäli

$$\Delta h < \frac{\lambda}{32 \cdot \sin(\alpha)}$$

jossa Δh on epätasaisuuden tehollisarvo, λ aallonpituus ja α on aallon tulokulma. Jos pinta on epätasainen, suuri osa aallosta siroaa pinnasta laajaan avaruuskulmaan.



Kuva 47: Suoraan edenneen ja maanpinnasta heijastuneen säteilyn muodostama interferenssikuvio, kun lähtetin on 30 metrin, vastaanotin 5 metrin korkeudella ja toimintataajuus 900 MHz (aallonpituus 33 cm).

Radiotaajuuden säteilyn etenemistavat

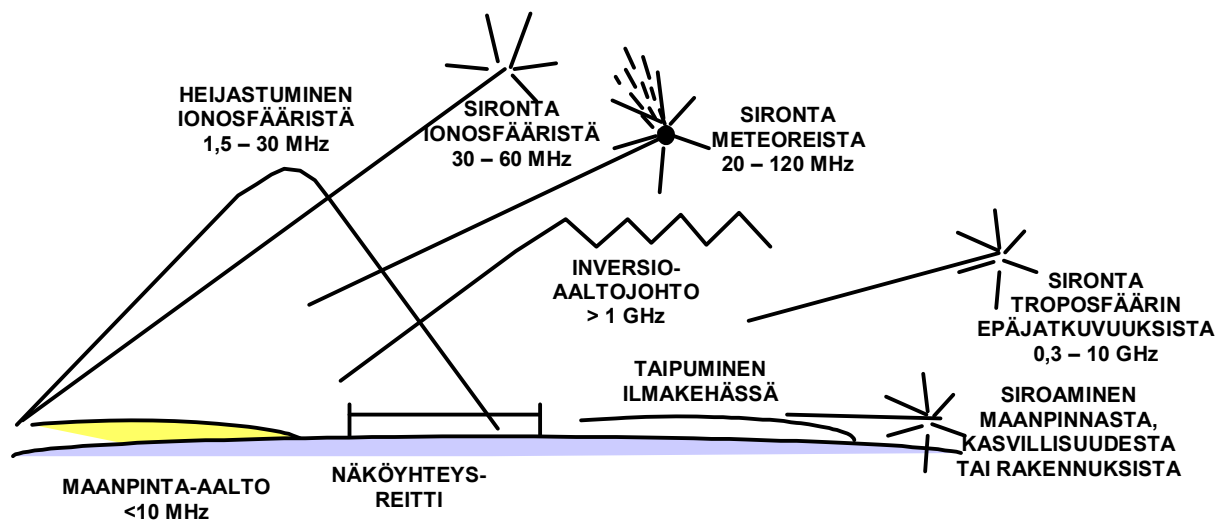
Pienitaajuuden säteilyn, kuten radio- ja mikroaaltojen eteneminen on monimutkainen prosessi, joka riippuu radioaallon taajuudesta, polarisaatiosta, maan pinnan, troposfäärin ja ionosfäärin ominaisuuksista sekä aallon kulmasta niihin nähden yms. lähteestä ja aallon kohtaamasta väliaineesta riippuvasta seikoista. Seuraavassa esitetään radioaaltojen etenemismekanismeja taajuuden mukaan nousevassa järjestyksessä.

Maanpinta-aallot

Aalto etenee maanpinnan läheisyyteen sitoutuneena maanpinta-aaltona, mikäli antennikorkeudet ovat pieniä aallonpituuteen nähden. Käytännössä tämä tarkoittaa alle 10 MHz yhteyk-

siä. Diffraktio taivuttaa radioaaltoa sitä enemmän, mitä pidempi aallonpituus on. Siten aallon vaimennus kasvaa voimakkaasti taajuuden noustessa, minkä vuoksi maanpinta-aalloilla on merkittävä rooli vain noin 1500 kHz asti eivätkä aallot juurikaan etene yli 20 MHz taajuuksilla. Maanpinta-aalto on pitkillä yhteyksillä dominoiva noin 150 kHz asti, minkä jälkeen ionosfääristä heijastunut aaltokomponentti on voimakkaampi. Maanpinta-aalto on aina vertikaalisesti polarisoitunut, sillä horisontaalisesti polarisoitu aalto ei kykene etenemään johtavan maan yllä (sähkökenttä $E=0$ johteessa). Aalto saattaa tunkeutua metrien syvyyteen maanpinnan sisään. Tunkeutumissyvyys riippuu maan johtavuudesta ja radioaallon aallonpituudesta.

Maanpinta-aallolla voidaan saavuttaa jopa tuhansien kilometrien yhteyksiä, varsinkin sähköä suhteellisen hyvin johtavan merenpinnan päällä. Yhteyksiä vaivaa kuitenkin suuri luontaisen ja ihmisen aikaansaaman kohinan taso.



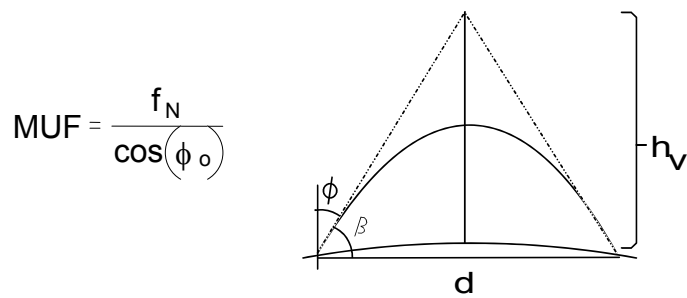
Kuva 48: Radioaallon erilaisia etenemismekanismeja. Esitetyt taajuusalueet ovat viitteellisiä. Käytännössä aalto etenee samaan aikaan useilla eri mekanismeilla ja taajuudesta sekä etäisyydestä riippuu se, mikä mekanismi kulloinkin on dominoiva.

Heijastuminen ionosfääristä

Ionosfääristä tapahtuvan heijastumisen avulla voidaan saavuttaa koko maapallon kattavia yhteyksiä. Ionosfääriin tuleva aalto taipuu Snellin lain mukaisesti ja kulkee kaareutuvaa rataa. Aalto saattaa kulkea ionosfäärissä maanpinnan suuntaisesti pitkiäkin matkoja ennen kuin lopulta heijastuu takaisin maanpinnalle. Kulmassa ϕ_0 tulevan aallon heijastus tapahtuu korkeudelta, jolla

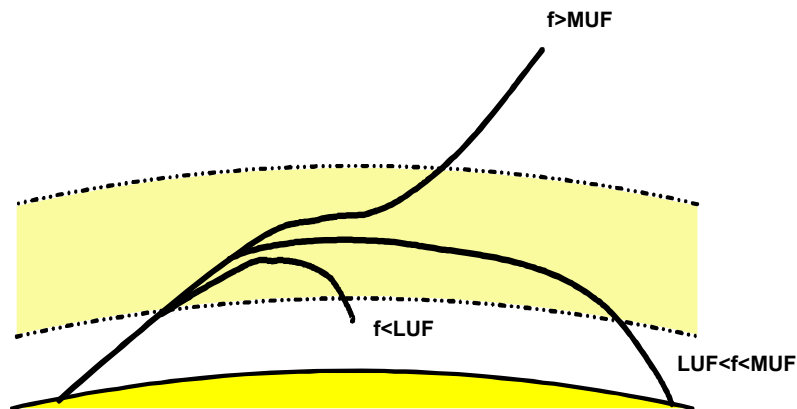
$$f_N = f \cdot \cos(\phi_0) \quad , \text{ jossa } f \text{ on aallon taajuus ja } f_N \text{ on plasman rajataajuus.}$$

Aallon tulokulma ja ionosfäärin tilasta riippuva rajataajuus määrittävät suurimman käytettävissä olevan heijastuvan taajuuden (MUF, Maximum Usable Frequency):



Tätä ylemmät taajuudet eivät heijastu, vaan etenevät ionosfääriin läpi tai absorboituvat siihen. MUF riippuu vuoden- ja vuorokaudenajasta sekä haluttavasta yhteysväistä. Kesäisin MUF on matalampi kuin talvella.

Kun aallon taajuus laskee, aalto heijastuu matalammalta, jolloin heijastusvaimennus kasvaa. Pienin heijastuskorkeus ja sen vaimennus asettaa käytettävissä olevan taajuuden alarajan (LUF, Lowest Usable Frequency).

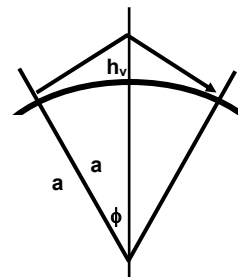


Kuva 49: MUF:a ylemmät taajuudet läpäisevät ionosfääriin ja LUF:a alemmat puolestaan heijastuvat liian matalalta ja vaimenevat voimakkaasti.

Ionosfäärin alaosien vaimennus riippuu voimakkaasti ($\propto 1/f^2$) radioaallon taajuudesta. Siten mahdollisimman korkea toimintataajuus olisi toivottava. Kuitenkin lähellä MUF:a vaaraksi muodostuu se, että pienetkin ionosfäärin epähomogeenisuudet saavat aallon karkaamaan avaruuteen. Sopivimmaksi toimintataajuudeksi esitetään usein $f=0,85 \cdot \text{MUF}$, mikä ei perustu niinkään teoriaan, vaan hyväksi havaittuun käytäntöön.

Suurin yhdellä ionosfääriheijastuksella saavutettavissa oleva yhteysväli riippuu virtuaalikorkeudesta:

$$d_{\max} = 2 \cdot a \cdot \cos\left(\frac{a}{a + h_v}\right)$$



Tätä pidempiä yhteyksiä voidaan toteuttaa usealla hypyllä, millä tarkoitetaan sitä, että ionosfääristä heijastunut radioaalto heijastuu maanpinnasta takaisin ionosfääriin päin heijastukseen myöhemmin takaisin maanpinnalle. Virtuaalikorkeus voidaan arvioida tai määrittää ionosondilla.

Ionosfäärisironta

Edellä kuvattu heijastusmekanismi edellyttää, että ionosfäärin taitekerroin muuttuu tasaisesti, jolloin radioaalto kaartuu takaisin maanpintaa kohti. Ionosfäärissä olevat epähomogeenisuudet, esimerkiksi nopeat muutokset plasman elektronitiheydessä, aiheuttavat sirontaa, jossa osa tulevasta radioaallostaa siroaa laajaan avaruuskulmaan. Ionosfäärisirontayhteyksien ongelmaksi muodostuu taajuusselektiivinen häipyminen.

Heijastuminen troposfääristä

Heijastuminen troposfääristä johtuu ilman taitekertoimen muuttumisesta korkeuden funktiona muuttuvan lämpötilan ja paineen vuoksi. Mekanismi on epäluotettava eikä sitä käytetä yhteyksien muodostamiseen. Sen sijaan se saattaa aiheuttaa yllättäviä häiriöitä muiden mekaniismien avulla muodostetuille yhteyksille.

Troposfäärisironta

Radioaalto siroaa osuessaan ilmakehän epähomogeenisuuksiin. Epähomogeenisuuksia ovat nopeat muutokset ilman taitekertoimessa sekä erilaiset ilmakehässä olevat partikkelit. Mekanismi on merkittävä noin 300 MHz - 5 GHz välisellä alueella. Matalammilla taajuuksilla ongelmaksi muodostuu riittävän kookkaiden antennien rakentaminen ja ylemmillä taajuuksilla puolestaan kasvava vaimennus. Suuren yhteysvälivaimennuksen (190 – 240 dB) vuoksi tarvitaan suuria antennivahvistuksia, joten antennien on oltava aallonpituuteensa nähden suurikokoisia. Käytännössä useimmat järjestelmät toimivat 1,7 – 4,5 GHz alueella ja antennivahvistus on 35 dB luokkaa, eli antennin keilanleveys on noin 3 astetta.

Sironta tapahtuu yleensä maksimissaan noin 10 km korkeudelta, mikä rajaa suurimman troposfäärisironnalla muodostettavissa olevan yhteysvälin noin 650 kilometriin. Vastaanotetussa signaalissa on hyvin syviä häipyymiä, mitä kompensoidaan antennidiversiteetillä, eli vastaanottamalla signaalia 2 – 4 paikasta.

Näköyhteysreitti

Eteneminen näköyhteysreittiä (LOS, Line-of-Sight) vastaa likimäärin vapaan tilan etenemistä, mutta radioaalto ei etene täysin suoraan, vaan taipuu jonkin verran maanpinnan suuntaisesti. Ilmiö johtuu maan ilmakehän taitekertoimen ($N=\sqrt{\epsilon_r}$) muuttumisesta ilmanpaineen, lämpötilan ja kosteuden muutoksen myötä korkeuden funktiona.

Kaartumisen vuoksi radiohorisontti on geometristä horisonttia kauempana. Tämä otetaan yleensä laskuissa huomioon kertomalla maapallon säde ($R_E=6370$ km) luvulla $K=4/3$, jolloin radioaallon voidaan ajatella etenevän suoraviivaisesti $K \cdot R_E$ -säteisen maapallon yllä. Tällöin radiohorisontti on etäisyydellä

$$R = \sqrt{2 \cdot K \cdot R_E \cdot h_t}$$

jossa h_t on radioantennin korkeus maanpinnasta.

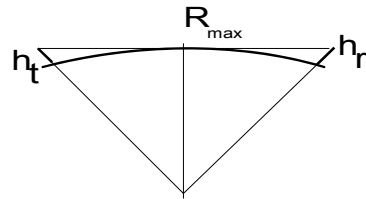
Yhtälö supistuu muotoon:

$$R = 130 \cdot \sqrt{h_t}$$

tai mikäli halutaan ilmaista maksimi yhteysväli lähetin- ja vastaanotinantennien korkeuden avulla:

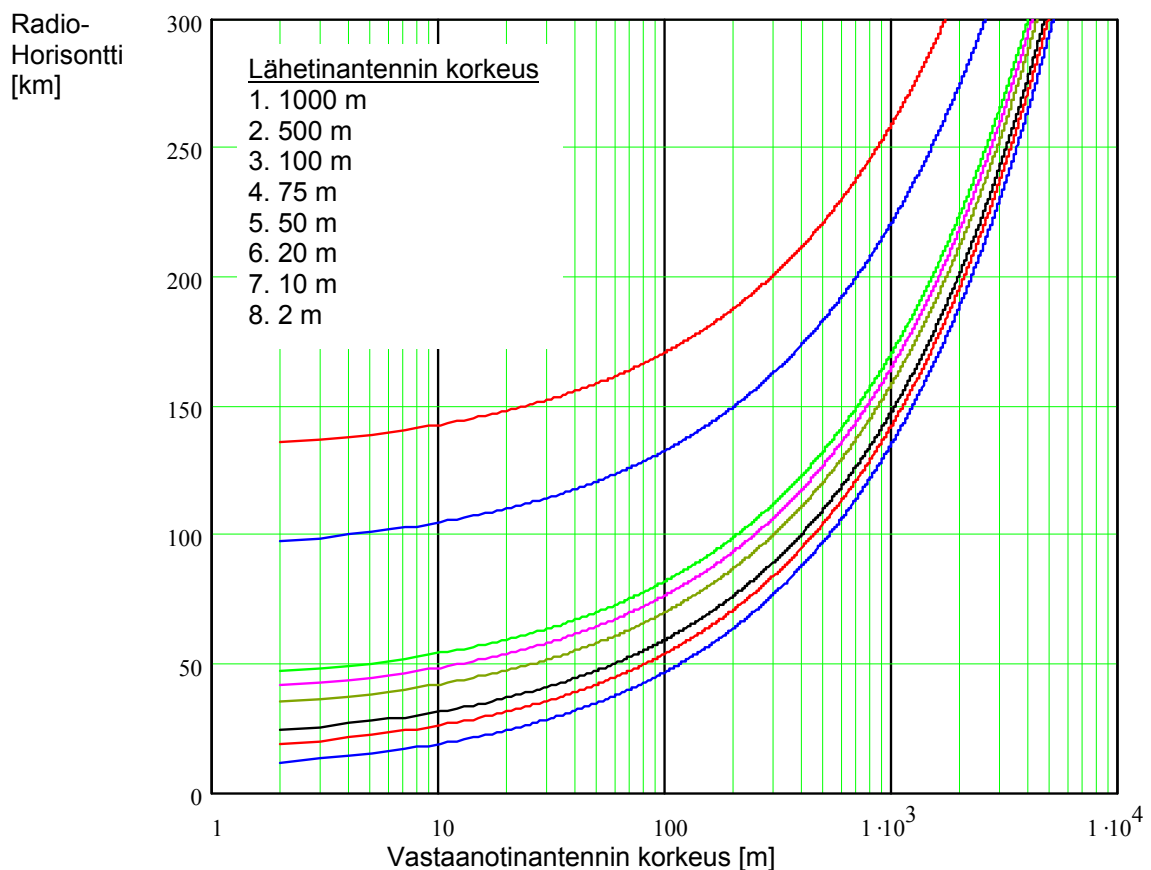
$$R_{\text{km}} = \sqrt{17 \cdot h_t} + \sqrt{17 \cdot h_r}$$

$$= 4.12 \cdot \left(\sqrt{h_t} + \sqrt{h_r} \right)$$



jossa h_t ja h_r ovat lähetin- ja vastaanotinantennien korkeudet metreinä ja R_{max} on kilometreinä suurin lähettimen ja vastaanottimen välinen etäisyys, jolla säde on radiohorisontin yläpuolella.

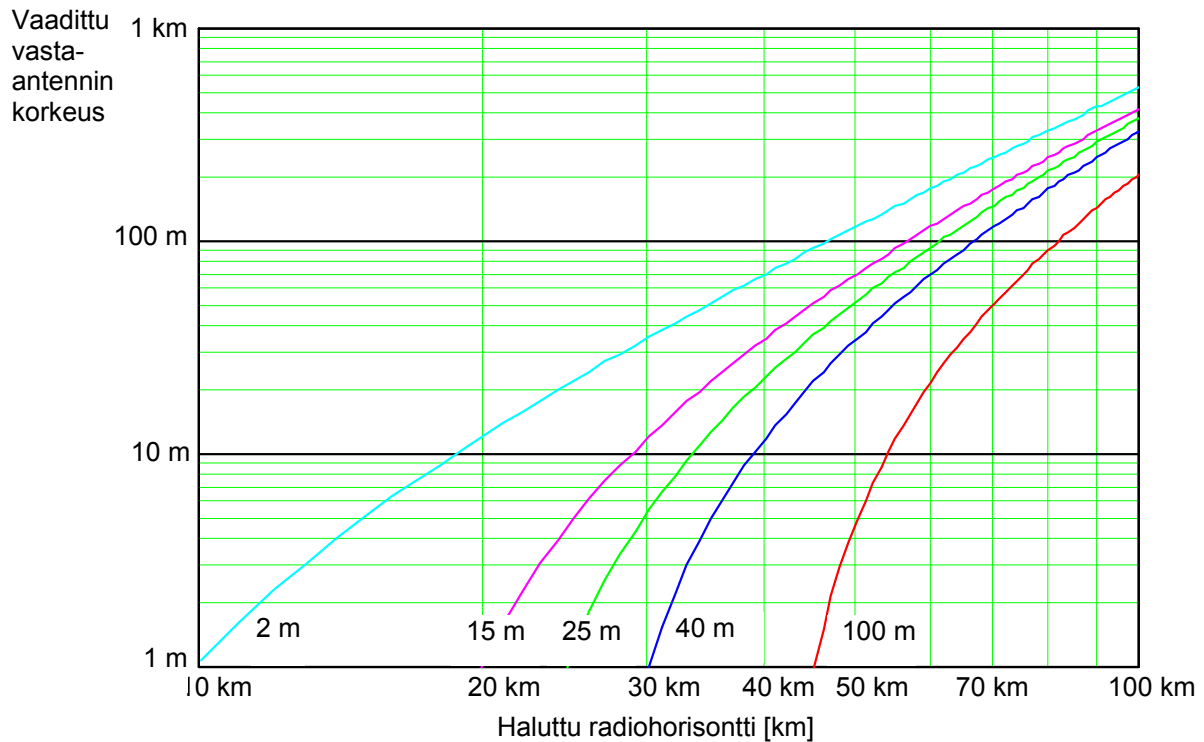
Käytännössä usein eteen tuleva kysymys on, mikä pitäisi esimerkiksi tiedusteluvastaanottimen antennikorkeuden olla, jotta tiedusteltava järjestelmä olisi radiohorisontin sisäpuolella, tai mikä häirintäjärjestelmän antennikorkeuden tulisi olla, jotta sen maali olisi radiohorisontin sisäpuolella. Kuvassa 50 on esitetty tarvittava antennikorkeus halutun radiohorisontin etäisyyden funktiona, kun toinen antennikorkeus on asetettu.



Kuva 50: Radiohorisontin etäisyys kilometreinä vastaanotinantennin korkeuden funktiona eri lähetysantennin korkeuksilla.

Eteneminen näköyhteysreittiä pitkin on tärkein etenemismekanismi UHF-alueelta alkaen. Tällöin vain niin sanotun *ensimmäisen Fresnellin vyöhykkeen* sisäpuolella olevat esteet

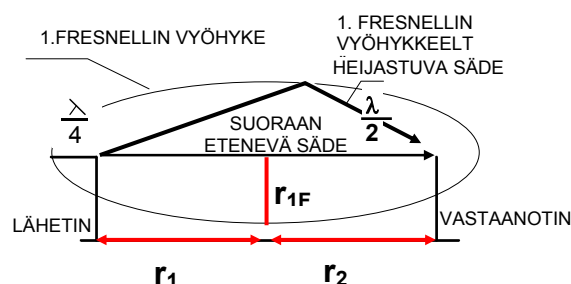
aiheuttavat vaimennusta. Ensimmäinen Fresnellin vyöhyke kuvaa ellipsiä, jolla lähettimestä edenneet aallot ovat edenneet puolen aallonpituuden verran enemmän kuin suoraan lähettimestä vastaanottiin tulevat aallot. Kaikki tämän ellipsin sisältä heijastuneet ja vastaanottimelle saapuvat säteet vahvistavat suoraan lähettimeltä tulevaa aaltoa. Ellipsin ulkopuolelta tulevat heijastukset saattavat vahvistaa tai vaimentaa suoraa aaltoa riippuen säteiden kulkemasta matkasta; toisella vyöhykkeellä säteet ovat kulkeneet yhden aallonpituuden, kolmannella vyöhykkeellä 1.5 aallonpituutta ja niin edelleen. Parittomat vyöhykkeet lisäävät tehoa ja parilliset vähentävät.



Kuva 51: Vaadittu vasta-antennin korkeus halutun radiohorisontin etäisyyden funktiona eri kohdeantennin korkeuksilla.

Ensimmäinen Fresnellin vyöhyke on merkittävä, koska suurin osa kokonaisenergiasta on tämän vyöhykkeen sisäpuolella. 1. Fresnellin vyöhykkeen säde (ns. Fresnellin ellipsoidi) saadaan yhtälöstä:

$$r_{1F} = \sqrt{\frac{\lambda \cdot r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2}}$$



Kuva 52: 1. Fresnellin vyöhykkeen rajalta heijastuvat säteet ovat viivästyneet puolen aallonpituuden verran, jolloin ne vielä vahvistavat. Vastaanotettua signaalia.

Kun toimintataajuus on f_c MHz, on R km pitkän yhteyden puolivälissä 1. Fresnellin vyöhykkeen säde $r_{1F,max}$ metriä:

$$r_{1F,max} = 274 \cdot \sqrt{\frac{R}{f_c}}$$

Mikäli Fresnellin ellipsoidin sisällä ei ole esineitä tai kohteita, radioaallon eteneminen voidaan approksimoida vapaan tilan etenemisenä. Jos ellipsoidin sisällä on esteitä, täytyy niiden vaikutus ottaa huomioon etenemisen laskennassa.

Vyöhykkeen sisäpuolella oleva este aiheuttaa lisävaimennusta. Kuvassa 53 on esitetty teräväreunaisen esteen aiheuttama lisävaimennus. Näkölinjalla olevan ($h/h_f=0$) esteen aiheuttama lisävaimennus on 6 dB. Luonnossa olevat esteet ovat harvoin teräväreunaisia ja ne aiheuttavat yleensä em. teoriaa enemmän vaimennusta.

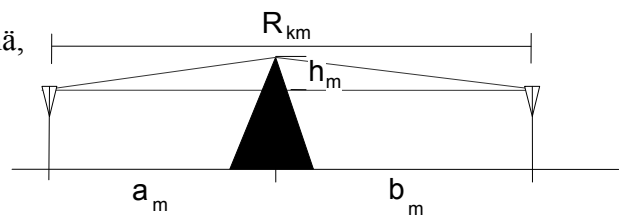
Teräväreunaisen esteen aiheuttamaa diffraktiovaimennusta voidaan approksimoida kaavalla:

$$L_D(v) := 6.9 + 20 \cdot \log \left[\sqrt{(v - 0.1)^2 + v - 0.1} \right]$$

jossa v on ns. Fresnelin parametri $v := h \cdot \sqrt{\frac{2}{\lambda} \cdot \left(\frac{1}{a_m} + \frac{1}{b_m} \right)}$

Jos taajuus ilmaistaan megahertseinä, Fresnelin parametri saadaan kaavasta:

$$v(a, b, h) = h \cdot \sqrt{\frac{f}{150} \cdot \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right)}$$



Kuva 53: Kuva: Teräväreunaisen esteen aiheuttama lisävaimennus näköyhteysreitillä, kun h_m on esteen korkeus h metreinä.

Kanavoituminen

Ilmakehän taiteluku riippuu ilmanpaineesta, vesihöyryn osapaineesta ja ilman lämpötilasta.. Nämä riippuvat sääilmiöistä ja korkeudesta. Ilmakehän taitekerroin ilmaistaan ns. N-luvun avulla:

$$N = (n - 1) \cdot 10^6$$

missä n in ilmakehän taitekerroin $n = 1 + 300 \cdot 10^{-6}$

Ilman taiteluku korkeuden funktiona on keskimäärin

$$N(h) = N_A \cdot e^{-b \cdot h}$$

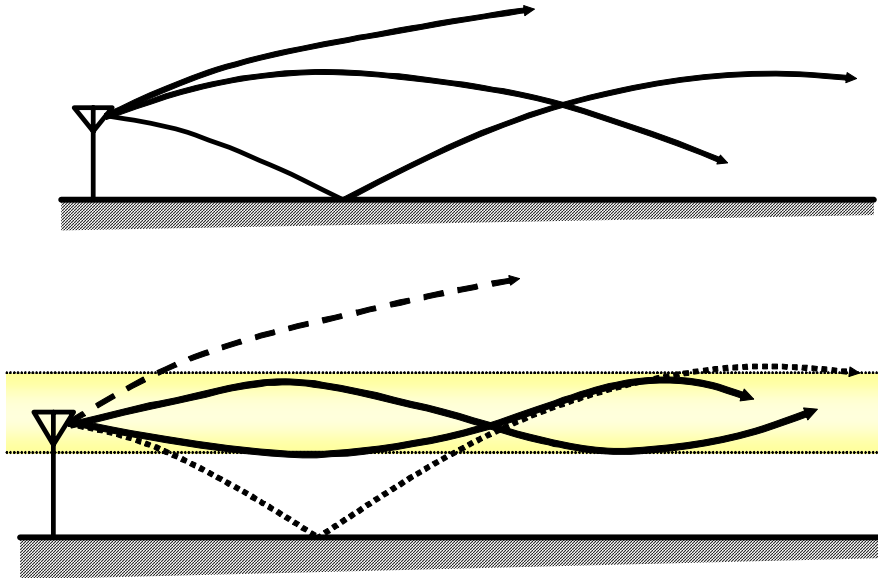
jossa $N_A = 315$ ja $b = 0,136 \text{ km}^{-1}$. Merenpinnan tasolla etenevän aallon kaarevuus on keskimäärin

$$\frac{d}{ds} \phi = 10^{-6} \cdot N_A \cdot b \quad \frac{d}{ds} \phi = -43 \cdot 10^{-6} \cdot \text{km}^{-1}$$

N-luku voidaan laskea kaavasta [Parsons]:

$$N = \frac{77.6}{T} \cdot \left(P + \frac{4810 \cdot e}{T} \right)$$

missä P = ilmanpaine millibaareina
e = vesihöyryn paine millibaareina
T = lämpötila



Kuva 54: Kanava voi muodostua maanpinnan päälle, jolloin heijastava maanpinta toimii kanavan alareunana, tai ilmaan lämpötilainversion seurauksena.

Normaalisti edellä mainitut parametrit muuttuvat korkeuden kasvaessa siten, että aalto kaartuu kohti maanpintaa. Joskus kuitenkin sääilmiöiden vuoksi syntyy tilanne, jossa lämpötila kasvaa sääilmiöiden vuoksi nopeasti korkeuden myötä. Tällöin taitekerroin ei pienene korkeuden kasvaessa ja alaspäin kaartuva säde kaartuuikin inversiokerroksessa takaisin ylöspäin. Näin syntyy muodostuu inversiokerros, joka kanavoi radioaallon. Aalto vaimenee vähemmän kuin vapaassa tilassa edetessään, koska kanavoituminen estää tehon säteilyn suureen avaruuskulmaan. Kanavan koko on tyypillisesti muutamista metreistä muutamaan sataan metriin, mikä rajaa siinä kulkevan aallonpituudet. Ilmiö on siksi merkittävä yli 1 GHz taajuuksilla. Kanavoituminen riippuu ilmakehän ominaisuuksista ja on ilmiönä epäluotettava. Se saattaa kasvattaa yhteysväliä huomattavasti ja aiheuttaa samalla yllättäviä häiriöitä.

OPTINEN SÄTEILY

Infrapunasäteily

Edellä käsiteltyjen ”pientaajuisien” mikroaaltojen ja ”suurtaajuisen” infrapunasäteilyn välinen raja on epämääräinen. Yleisen jaon mukaisesti **infrapuna-alue** ulottuu millimetrin aallonpituudesta aina näkyvän valon aallonpituudelle asti. Mikro- ja millimetrialueella ilmakehän aiheuttama vaimennus kasvaa taajuuden funktiona vaihdellen vaimennuspiikkien maksimista väliin jäävien ikkunoiden minimeihin. Tämä suunta jatkuu muutamasta gigahertsistä noin sataan terahertsiiin (vastaa 30 μm aallonpituutta), minkä jälkeen ilmakehän

kaasujen aiheuttama vaimennus pienenee joillakin taajuuksilla hyvinkin pieneksi. Tästä alkaa varsinainen infrapuna-alue, joka jaetaan kolmeen osaan aallonpituuden mukaisesti:

IR-A	780-1400 nm
IR-B	1,4 – 3,0 μm
IR-C	3 μm – 1 mm

On olemassa muitakin tapoja jakaa infrapuna-alue osiin:

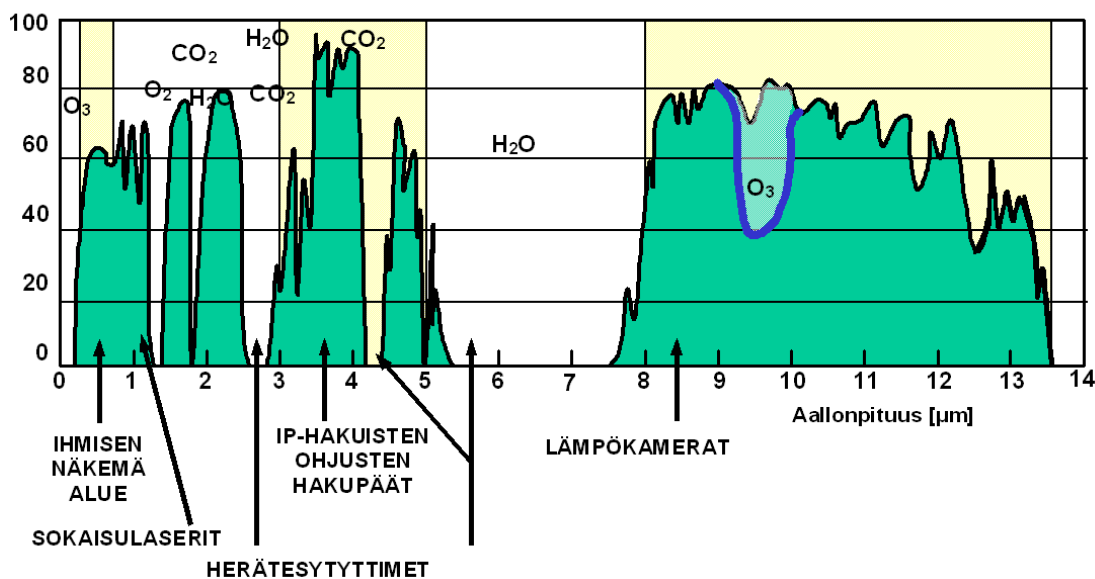
NIR, Near Infra-Red	Lähi-infrapuna	780 nm – 3 μm
MIR, Middle Infra-Red	Keski –”–	3 – 6 μm
FIR, Far Infra-Red	Kauko –”–	6 – 15 μm
XIR, eXtreme Infra-Red	Ääri –”–	15 – 1000 μm

NIR, Near Infrared	Lähi-infrapuna	0,7 – 1,1 μm
SWIR, Short-Wavelength IR	Lyhytaalto-IP	1,1 – 3,0 μm
MWIR, Medium-Wave IR	Keskiaalto-IP	3,0 – 5,0 μm
LWIR, Long-Wavelength IR	Pitkäaalto-IP	5,0 – 20 μm

Neljäs jakoperuste pohjautuu siihen, että maapallolla taustansa lämpöisen (n. 300 K) kohteen mustan kappaleen säteilyn intensiteettihiippu on noin 10 μm aallonpituudella ja auringosta (pintalämpötila n. 6000 K) tulevan säteilyn intensiteetti on noin 0,5 μm aallonpituudella. Siten lyhyillä aallonpituuksilla kohteesta tuleva säteily on pääsääntöisesti lähtöisin auringosta ja pitkillä aallonpituuksilla kohteesta itsestään. Tämän mukaisesti lyhytaaltoista infrapuna-säteilyä kutsutaan heijastuvaksi ja pitkäaaltoista termiseksi infrapunaksi. Rajana on yleensä pidetty 3,0 μm aallonpituutta.

Infrapuna-alueella säteilykvantin energia on näkyvän valon rajalla noin 1,6 eV ja pienimmillään pisimmillä aallonpituuksilla noin 10^{-3} eV.

Suhteellinen läpäisykerroin [%]



Kuva 55: VIS-, NIR-, MIR- JA FIR-alueen läpäisyikkunat.

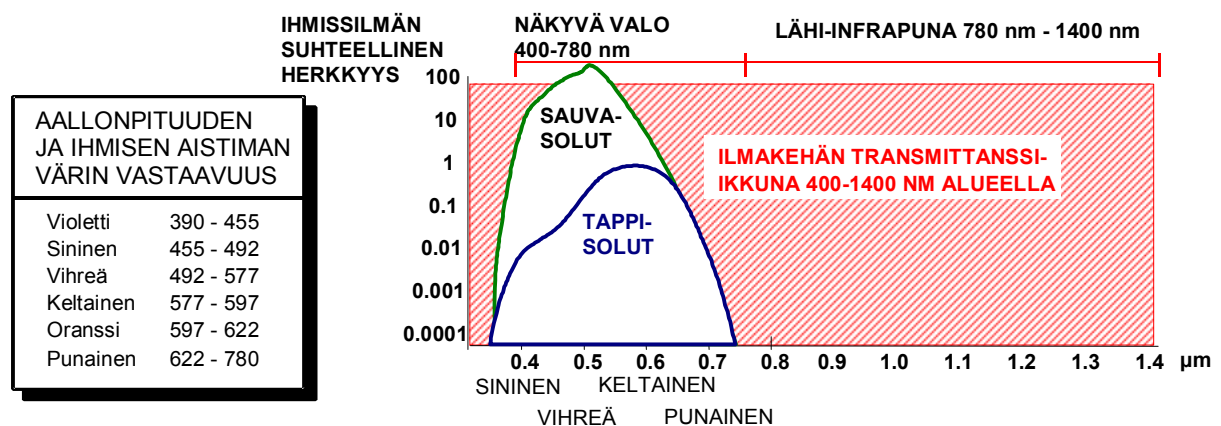
Infrapunäsäteilyä käytetään hyväksi aktiivisissa ja passiivisissa sensorijärjestelmissä, jotka käyttävät hyväksi joko kohteesta heijastuvaa tai kohteen itsensä synnyttämään lämpösäteilyä. Wienin siirtymälain mukaisesti kappaleiden lähettämä säteilyintensiteetti riippuu kappaleen lämpötilasta. Lähellä taustaympäristönsä lämpötilaa olevien kohteiden lähettämä säteily on luonnossa 10 μm luokkaa, mikä sattuu yhteen ilmakehän 8-14 μm ikkunan kanssa. Tämän vuoksi kaukoinfrapuna-alueella käytetään passiivisissa lämpötähtäimissä ja valvontakameroissa. Keski-infrapuna-alueella olevan 3 - 5 μm ikkuna puolestaan vastaa 600 - 1000 asteista lämpölähdettä, minkä vuoksi tätä aluetta käytetään erityisesti suihkumoottorin säteilemään lämpöön hakeutuvien ohjusten hakupaissa.

Ikkunoiden ulkopuolella säteily vaimenee voimakkaasti eikä voi siten edetä pitkiä matkoja. Vastaanottimeen tulevan säteilyn lähteen on tällöin oltava lähellä. Tätä käytetään hyödyksi herätesyöttimissä, jotka on tarkoitettu räjähtämään maalinsa lähellä. Tällöin suuresta vaimennuksesta ei ole haittaa, vaan päinvastoin etua, sillä sen vuoksi herätesyöttimen häirintä ja havaitseminen kaukaa on vaikeata.

Koska infrapunäsäteet läpäisevät näkyvää valoa paremmin taistelukentän savuja ja pölyä eikä niitä voi nähdä ihmissilmän, niitä käytetään myös maalinvalaisu- ja etäisyydenmittausjärjestelmissä, esimerkkinä hiilidioksidilaser ($\lambda=10,6 \mu\text{m}$).

Näkyvä valo ja lähi-infrapuna

Nimityksellä **valo** tarkoitetaan *ihmisen silmälle näkyvää* säteilyä 400 - 780 nm alueella. Eräät eläimet kykenevät näkemään ihmissilmää laajemmalla spektrillä, esimerkiksi mehiläinen näkee ultraviolettivaloa. Näkyvän valon aallonpituudella fotonin energia vaihtelee 1,6 – 3,2 eV:n välillä.



Kuva 56: Ihmisen näkökyky on keskittynyt noin 400-1400 nm alueella olevan ilmakehän läpäisyikkunan alaosaan, jossa auringon säteilyn intensiteetti on maksimissaan.

Maapallon elämä on paljolti keskittynyt näkyvän valon alueelle. Itse asiassa koko elämä sellaisena kuin me sen tunnemme, riippuu auringosta tulevasta säteilystä, jonka intensiteetti-huippu on spektrissä keltavihreän valon ($\lambda=550 \text{ nm}$) kohdalla. Vaikka näkyvän valon spektri onkin jatkuva, ihminen aistii sen kolmena värinä (sininen, punainen ja vihreä), jotka aivot tulkitsevat tuntemiksemme väreiksi. lisäksi ihminen ”näkee” lisäksi mustaa ja valkoista, jotka eivät fyysikaalisesti kuitenkaan ole värejä, vaan intensiteettiarvoja suhteessa muuhun silmän näkemään.

Ihmissilmä on herkimmillään kirkkaassa valossa 555 nm aallonpituudella (tappisolut) ja hämärässä 520 nm aallonpituudella (sauvasolut). Ihminen ei aisti yli 780 nm säteilyä, vaikka sarveiskalvo läpäiseekin säteilyä 1400 nm asti. Tämän vuoksi lähi-infrapuna-alueella toimivat laserjärjestelmät ovat ihmiselle vaarallisia: niiden säteily tunkeutuu silmään, mutta ihminen ei havaitse sitä eikä osaa varoa kirkasta sädettä. Yli 1400 nm säteily vaimenee sarveiskalvossa ja silmänesteissä ja yli 1900 nm säteily ei tunkeudu sarveiskalvon pintaa syvemmälle.

Sinivihreä valo (460 nm) tunkeutuu jonkin verran meriveteen (vaimennus noin 0,01 dB metrillä), minkä vuoksi tällä aallonpituusalueella toimivia laserjärjestelmiä voidaan käyttää kommunikointiin meren alla ja ilmasta tai satelliiteista sukellusveneisiin – jopa jään läpi. Lisäksi 460 nm laserilla voidaan kartoittaa merenpohjaa ja etsiä sukellusveneitä ilmasta tai avaruudesta käsin.

Ultraviolettisäteily

Ultraviolettialue alkaa näkyvän valon jälkeen. Ultraviolettisäteily jaetaan kolmeen alueeseen:

UV-A 315 – 400 nm

UV-B 280 – 315 nm

UV-C 100 – 280 nm

Tällä alueella fotonien energia on noin 3 – 2000 eV, siis huomattavasti suurempi kuin näkyvän valon alueella. Kvanttien suuri energia riittää ionisoimaan kudoksia, minkä vuoksi ultraviolettisäteily aiheuttaa muutoksia solurakenteessa ja on siten elämälle haitallista. Tämän ominaisuutensa vuoksi ultraviolettisäteilyä käytetään sterilisointiin, koska se kykenee tappamaan mikro-organismeja.

Stratosfäärin otsoni vaimentaa avaruudesta tulevaa ultraviolettisäteilyä, minkä vuoksi esimerkiksi C-alueen säteilyä ei juuri esiinny maapallon ilmakehän alaosissa. 230 - 280 nm välisellä alueella on niin sanottu *solar blind region*, jossa auringosta peräisin olevaa säteilyä ei esiinny. Toisaalta ilmakehän alaosissa ei ole juurikaan otsonia ja UV-C säteily pääsee etenemään. Rakettimootoreiden korkea toimintalämpötila (yli 2000 K) synnyttää jonkin verran myös UV-C-säteilyä, joka erottuu 230 - 280 nm alueella tyhjää taustaa vasten varsin hyvin. Tätä ilmiötä käytetään passiivisissa UV-alueella toimivissa ohjusvaroittimissa (MAW, Missile Approach Warner).

Röntgen- ja gammasäteily

Röntgensäteilyn aallonpituus vaihtelee nanometrissä (10^{-9} m) 0,1 Ångströmiin ($1 \text{ Å} = 10^{-10}$). Röntgensäteilyä käytetään lääketieteellisessä tarkoituksessa sekä ihmisen läpivalaisuun että syöpäkudosten tuhoamiseen. Taistelukentällä röntgensäteilyä ilmenee lääketieteellisen käytön lisäksi lähinnä ydinräjähdysten seurannaisvaikutuksena. Röntgen- ja gammasäteilyn taajuus on niin suuri, että maan ilmakehä käytännössä estää avaruudesta tulevan säteilyn pääsyn maan pinnalle. Suuri etenemisvaimennus estää säteilyn käytön sotilaallisiin tarkoituksiin maan päällä (paitsi tietysti neutronipommeissa yms.). Gammasäteilyä (aallonpituus 10^{-10} – 10^{-14} m) syntyy radioaktiivisissa atomiytimissä. Säteilyn energia on hyvin suuri, joten sillä on hyvin suuria vaikutuksia absorboitueessaan materiaan.

Kosminen säteily

Avaruudesta tulevan kosmisen säteilyn aallonpituus on lyhyempi ja taajuus suurempi kuin gammasäteilyn. Sen pääasiallisena lähteenä uskotaan olevan supernovien räjähdysten kiihdyttämien elektronien synnyttämän säteilyn. Säteilykvantin energia on näin lyhyillä aallonpituuksilla hyvin suuri, mutta säteilyn intensiteetti puolestaan pieni. Kosminen säteily se ei läpäise maan ilmakehää.

Optisen säteilyn eteneminen

Absorptio ja transmissioikkunat

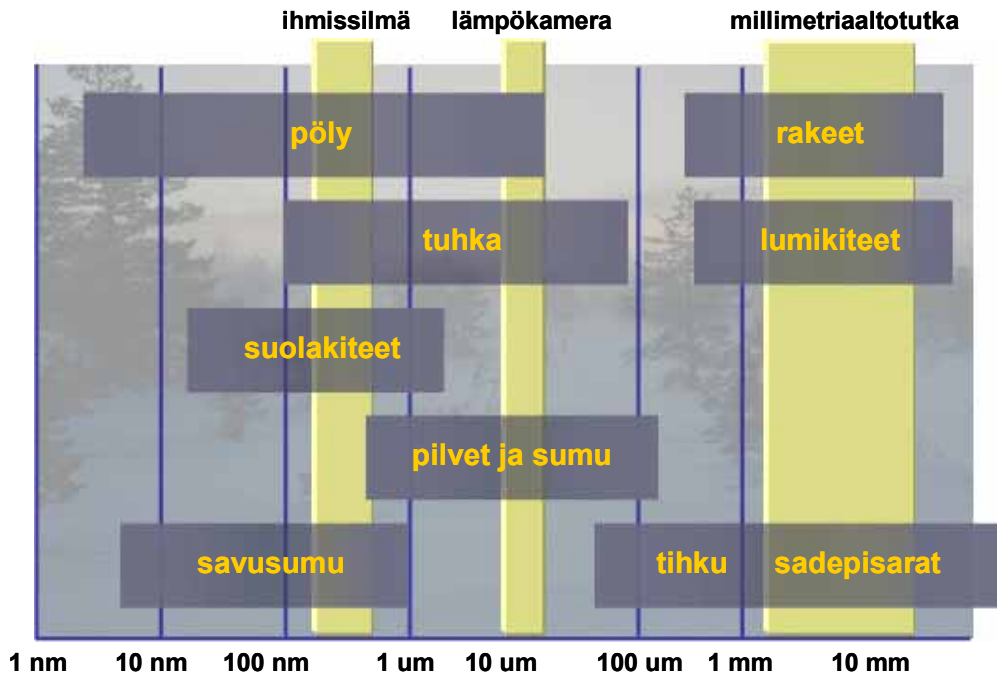
Sähkömagneettinen säteily vaimenee huomattavasti maan ilmakehän hapen, hiilidioksidin ja vesihöyryn resonanssitaajuuksilla, joiden väliin jää ikkunoita, joissa vaimennus on pieni. Infrapuna-alueella absorptio johtuu pääsääntöisesti molekyylien rotaatio- ja vibraatioabsorptiosta, kun taas ultravioletialueella mekanismina on hapen O_2 ja otsonin O_3 elektronien virittyminen korkeampaan energiatilaan kaasumolekyylien sisällä. Ilmakehän muilla kaasuilla, kuten hapella ja typellä on hyvin pieni vaikutus näkyvän valon etenemiseen. Ne kuitenkin vaimentavat näkyvää valoa pidempiaaltoista säteilyä, samoin kuin hiilidioksidi ja otsonikin. Vesihöyry vaimentaa säteilyn etenemistä kaikilla aallonpituuksilla SHF-alueelta alkaen.

Ihminen kykenee näkemään vain noin 400 - 780 nm kaistalla, vaikka ikkuna on tätä laajempi. IR-A-alue ulottuu ihmissilmälle näkymättömästä 780 nm aallonpituudesta tämän ikkunan loppuun noin 1400 nm. Näkyvän valon aallonpituuden jälkeen alkavaa aluetta kutsutaan myös lähi-infrapuna-alueeksi, joka kuitenkin jatkuu myös yli seuraavien ilmakehän transmissioikkunoiden. Lähi-infrapuna-alueella eniten käytetty ikkuna on 3 ja 5 μm välissä. Kaukoinfrapuna-alueella on leveä 8 - 12 μm ikkuna.

Sironta

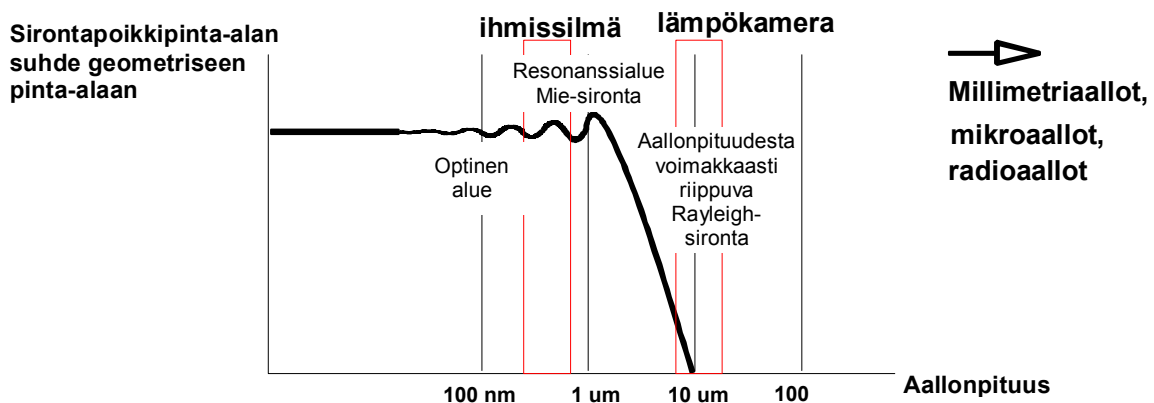
Ilmakehä sisältää kaasujen lisäksi erilaisia kiinteitä ja nestemäisiä partikkeleita pölyä, savuja, vesipisaroita, rakeita ja lumikiteitä. Näiden koko vaihtelee muutamista nanometreistä kymmeneen millimetriin. Esimerkiksi savujen partikkelikoko vaihtelee palaneesta aineesta ja palamisprosessista riippuen 10 - 1000 nm välillä, ja vesipisaroiden koko voi vaihdella pilvien ja sumun 1 - 100 μm partikkeleista näitä yli sata kertaa suurempiin sadepisaroihin.

Erityyppisten aerosolien määrä ja kokojakauma vaihtelee sekä paikan että korkeuden, sään ja vuodenajan mukaan. Ilmakehässä olevat partikkelit toimivat myös tiivistyskeskuksina vesihöyrylle synnyttäen ilmakehään vaihtelevan määrän vesipisaroita ja jääkiteitä. Aerosolien määrä ilmassa on tyypillisesti niin pieni, etteivät ne juurikaan vaimenna säteilyn etenemistä. Tietysti poikkeuksiakin on, esimerkiksi tiheät pöly- tai savupilvet. Tällöin säteilyn etenemiseen vaikuttaa ensisijaisesti sironta. Kuten radioaaltojen yhteydessä todettiin, kappaleen sirontapoikkipinta-ala riippuu sen suhteellisesta koosta aallonpituuteen verrattuna. Aallonpituuteen nähden pienet (läpimitta alle $0,1\lambda$) kappaleet eivät juurikaan vaikuta säteilyn etenemiseen. Tällä ns. Rayleigh-alueella sirontapoikkipinta-ala on verrannollinen aallonpituuden neljänteen potenssiin, minkä vuoksi ilmakehä, pöly ja useat savut näyttävät sinisiltä (sirottavat lyhytaaltoista sinistä valoa enemmän kuin pidempiaaltoista valoa).



Kuva 57: Ilmakehässä on vaihteleva määrä aerosoleja, joiden sirontapinta-ala on muutamasta nanometristä useisiin millimetreihin.

Suurten kappaleiden sirontapoikkipinta puolestaan on lähellä niiden geometrinen poikkipinta-alaa. Tällöin sironavan säteilyn määrä riippuu partikkeleiden määrästä, muttei säteilyn aallonpituudesta. Kuvassa 58 on esitetty mikrometrin luokkaa olevan partikkelin (esimerkiksi pöly, erilaiset savut ja lentävä tuhkka) sirontapoikkipinta-alan suhde partikkelin geometriseen pinta-alaan aallonpituuden funktiona. Kuvasta nähdään että mikrometriluokkaa olevista partikkeleista koostuva pöly tai savu muodostaa läpinäkymättömän esteen ihmissilmälle, mutta ei lämpökameroille tai tutka- ja viestijärjestelmille.

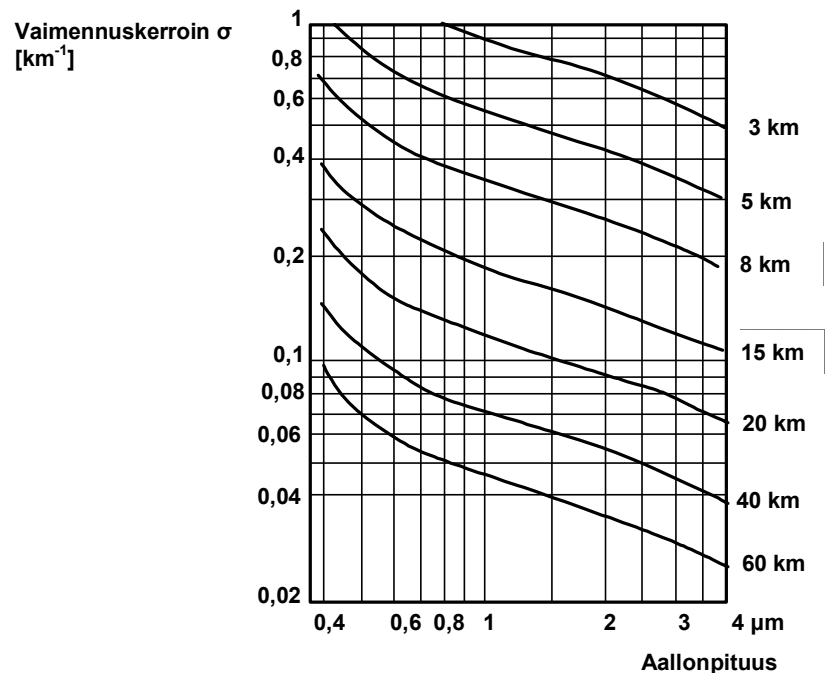


Kuva 58: Sirontapoikkipinnan suhde kappaleen geometriseen poikkipinta-alaan aallonpituuden funktiona, kun kappale on mikrometrin luokkaa.

Partikkelikoko 10 mm vastaa 30 GHz taajuutta, joten millimetriaallot läpäisevät hyvin pölyä, tuhkaa ja sumua, mutta huonommin esimerkiksi sadetta. 10 μm alueella toimivat lämpökamerat näkevät pölyn ja savun läpi, mutta sumu sekä sade vaimentavat säteilyä voimakkaasti. Ihmissilmä puolestaan näkee sellaisen pölyn ja savun läpi, jota ultraviolettivalo ei läpäise. Suurista aallonpituuksista on siis hyötyä, koska ne läpäisevät ilman epäpuhtauksia paremmin

kuin lyhyet aallonpituudet. Lämpökamera näkee siten paremmin epäpuhtauksien läpi kuin ihmissilmä ja tutka puolestaan läpäisee epäpuhtauksia paremmin kuin lämpökamera. Jotkut valonvahvistimet toimivat näkyvää valoa laajemmalla kaistalla ja näkevät siten myös jonkin verran lähi-infrapuna-alueelle. Tällöin valonvahvistimella kyetään näkemään jonkin verran paremmin sellaisen savun läpi, jota näkyvä valo ei läpäise.

Ilmakehän sironta näkyvän valon alueella ja lähi-infrapuna-aallonpituuksilla sekä visuaalinen näkyvyys liittyvät kuvan 59 esittämällä tavalla toisiinsa. Tätä pidemmällä aallonpituuksilla visuaalisesta näkyvyydestä ei voida suoraan päätellä vaimennuskerrointa.

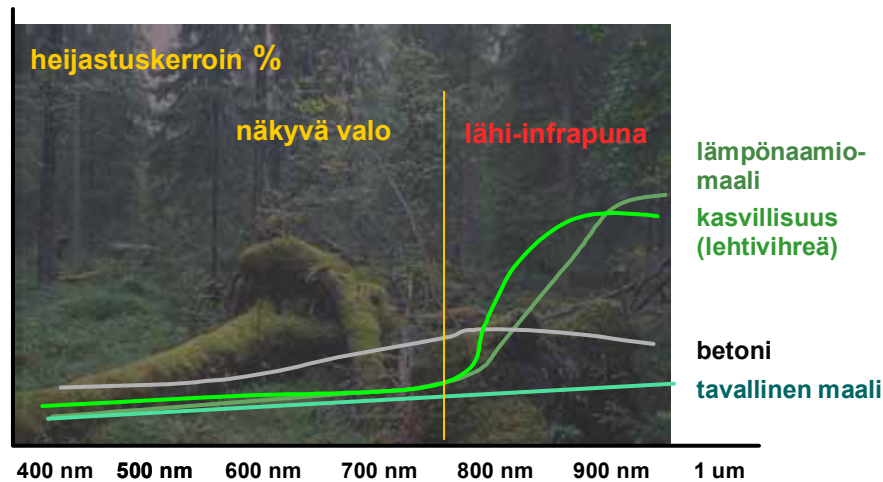


Kuva 59: Visuaalisen näkyvyyden vaikutus ilmakehän vaimennuskertoimeen näkyvän valon ja lähi-infrapuna-alueella.

Heijastuminen

Luonnossa olevat kappaleet heijastavat tyypillisesti 10 - 20 % niihin osuvasta näkyvästä valosta. Kasvien lehtivihreä heijastaa kuitenkin voimakkaasti yli 800 nm aallonpituista säteilyä, minkä vuoksi kasvillisuus näyttää kirkkaalta katsottaessa sitä sensorilla, jonka vaste ulottuu tälle aallonpituusalueelle. Useat ihmisen valmistamat keinotekoiset rakenteet heijastavat suhteellisen tasaisesti eri aallonpituuksilla. Tämän vuoksi ne näyttävät taustalla olevaa kasvillisuutta tummemmilta ja erottuvat hyvin taustaansa vasten, jos niitä katsotaan lähi-infrapuna-alueelle ulottuvalla sensorilla.

Sotilastarkoituksiin kehitetyissä maaleissa ja naamiointijärjestelmissä on pyritty noudattamaan kasvillisuuden heijastusta eri aallonpituuksilla. Toisaalta tällaisella maalilla maalattu ajoneuvo erottuu esimerkiksi asutuskeskuksissa betonitaustaa vasten taustaansa huomattavasti kirkkaampana. Maastoon sovitettu naamiointi muuttuikin tällöin paljastavaksi toisenlaisessa ympäristössä. Tästä havaitaan helposti syy siihen, miksi erityyppisiin ympäristöihin tulisi kehittää erilaisia naamiointi-, maastoutus- ja harhauttamisvälineitä ja miksi taustahäätteen tunteminen on olennaisen tärkeää kohteiden naamiointien ja suojaamisen kannalta.



Kuva 60: Eri materiaalien heijastuvuus aallonpituuden funktiona. Lehtivihreän heijastuskerroin kasvaa voimakkaasti lähi-infrapuna-alueella. Lämpönaamiomalilla pyritään jäljittelemään taustamateriaalien heijastuskerrointa, joten metsäkäyttöön tarkoitettujen naamiomaalien heijastuskertoimen on kasvettava NIR-alueella.

SPEKTRIN HYÖDYNTÄMISEN REUNAEHDOT

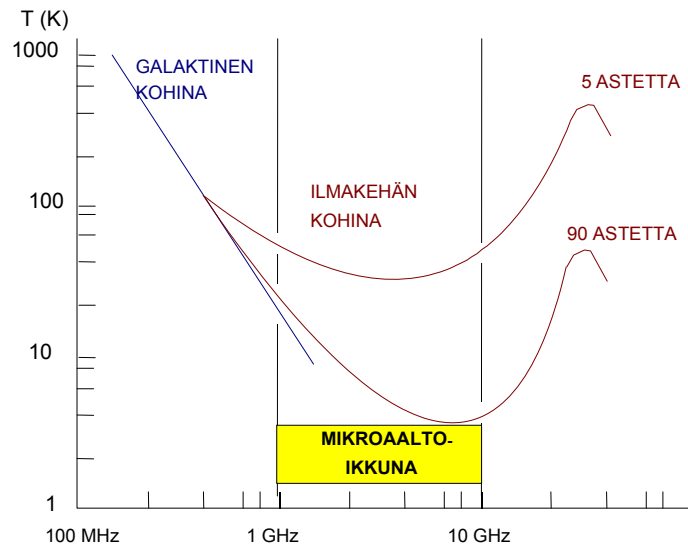
Sähkömagneettisen spektrin käytettävyyttä rajoittaa perustavaa laatua oleva luonnonilmiö, kohina, ja maanpäällisessä käytössä pienillä (RF-) taajuuksilla monitie-etenemisen mukanaan tuomat oheisvaikutukset. Lisäksi samaa spektrin aluetta käyttävät elektroniset järjestelmät saattavat häiritä toisiaan. Järjestelmien suuri määrä on johtanut sanontaan 'spektri on rajallinen luonnonvara'. Tällä tarkoitetaan sitä, että tietyllä alueella kuhunkin sovellukseen ja käytettävissä olevien taajuuksien (kanavien) määrä on rajallinen.

Kohina

Kohinalla tarkoitetaan kulloinkin tarkasteltavan järjestelmän kannalta haitallista sähköenergiaa, joka häittää hyötysignaalien vastaanottoa. Kohina summautuu hyötysignaaliin ja mikäli signaali on riittävän pieni, se peittää sen niin, ettei vastaanotin kykene tulkitsemaan signaalia oikein. Ilman kohinaa sähkömagneettista spektriä voitaisiin hyödyntää rajattomasti: riippumatta siitä kuinka pitkä esimerkiksi viestijärjestelmän yhteysväli, tai lämpösensorin etäisyys maalista olisi, vastaanottimeen saataisiin aina puhdas signaali (vaikkakin hyvin pieni), jonka olemassaolo voitaisiin aina havaita.

Kohinan summautuessa hyötysignaaliin olennaiseksi tulee pelkän hyötysignaalin tason sijasta *signaali-kohinasuhde* (Signal-to-Noise Ratio, SNR), jolla tarkoitetaan hyötysignaalin ja siihen summautuneen kohinan suhdetta:

$$\text{SNR} = \frac{S}{N} \quad \text{mikä on desibeleinä:} \quad \text{SNR}_{\text{dB}} = 10 \cdot \log(S) - 10 \cdot \log(N)$$



Kuva 61: Galaktinen kohina muodostaa merkittävän kohinan lähteen matalilla taajuuksilla. Ilmakehän aiheuttama kohina riippuu antennin elevaatiokulmasta. Kohina on pienimmillään niin sanotussa mikroaaltoikkunassa 1-10 GHz alueella.

Kohina voidaan jakaa

- luonnolliseen ja ihmisen synnyttämään kohinaan tai
- ulkoiseen ja sisäiseen kohinaan

Luonnollinen kohina käsittää sähköisten piirien ja komponenttien lämpökohinan (sisäinen kohina), ilmakehän kohinan sekä maapallon ulkopuolisen kohinan. Näistä ilmakehän kohina dominoi matalilla alle 2 MHz taajuuksilla ja sen energia on pääosin 30 MHz alapuolella. Ilmakehän kohinan ensisijainen lähde ovat maapallon eri puolilla iskevät salamot, joiden aiheuttamat häiriöt etenevät matalilla taajuuksilla ympäri maapallon. Maapallon ulkopuolisen kohinan lähteitä ovat aurinko ja aurinkokuntamme ulkopuolelta tuleva galaktinen kohina.

Ihmisen aikaansaama kohina on merkittävin kohinan lähde asutuilla seuduilla. HF- ja VHF-alueella se syntyy muiden radio- ja tutkalähettiläiden aiheuttamista häiriöistä, joista käytetään nimitystä interferenssi (interference). Korkeammilla taajuuksilla polttomoottoreiden sytytysjärjestelmät aiheuttavat häiriöitä. Mikroaalloilta alkaen suurin kohinan lähde on yleensä vastaanottimen sisäinen lämpökohina.

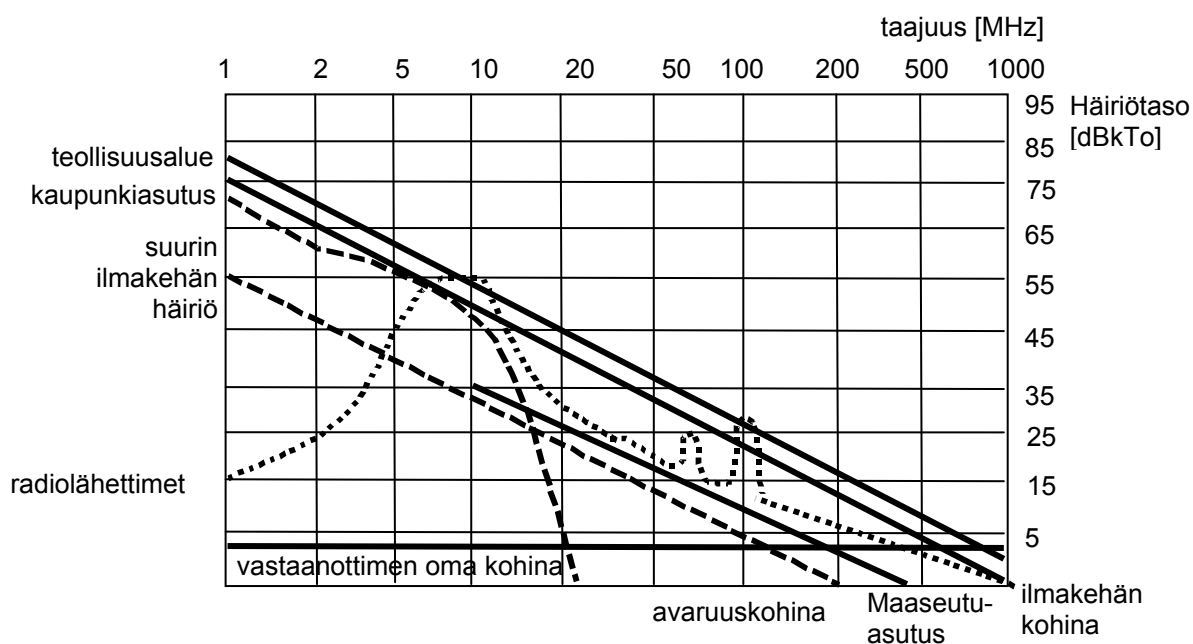
Interferenssin lähteinä voi olla saman järjestelmän tahalliset tai tahattomat häiriöt (intra-system interference) tai eri järjestelmien väliset tahattomat häiriöt (inter-system interference) tai tahallinen häirintä (jamming). Järjestelmän kannalta häiriösignaali on haitallinen riippumatta siitä onko se tahaton vai tahallinen. Viesti- ja sensorijärjestelmissä interferenssi ja kohina lyhentävät toimintaetäisyyksiä.

Paikallinen kohinataso riippuu monista seikoista, kuten

- Sijainnista: teollisuusalue, kaupunkiasutus, esikaupunkialue tai maaseutu. Ihmisen aktiiviteetit lisäävät taustahäirintätasoa taajamissa 10-15 dB verrattuna maaseutuun.
- Lähellä olevista häiritsevistä järjestelmistä, kuten yleisradiolähtetimestä ja muista radiolähtetimestä, tutka-asemista, elektronisten laitteiden hakkuriteholähteistä, sähkövoima-

koneiden ja ajoneuvojen sytytysjärjestelmistä yms. Matalilla taajuuksilla häiriöt etenevät pitkiäkin matkoja, mutta taajuuden kasvaessa vain lähellä toimivat järjestelmät aiheuttavat häiriöitä.

- Ajankohdasta, joka vaikuttaa lähinnä sen kautta, mitä järjestelmiä ihmiset mihinkin vuorokaudenaikaan käyttävät. Myös vuodenaika ja auringon aktiivisuus vaikuttavat häiriötasoon. Yli 300 MHz taajuuksilla vuorokaudenajalla ei enää ole käytännössä merkitystä.



Kuva 62: Esimerkki kohinatason taajuusriippuvuudesta. Häiriötaso, joka on kuvassa esitetty desibeleinä yli termisen pohjakohinatason, laskee taajuuden kasvaessa. Teollisuusalueen ja hiljaisen maaseudun välinen ero pohjakohinatasossa voi olla yli kymmenkertainen. [Lähde: Rauno Kuusisto]

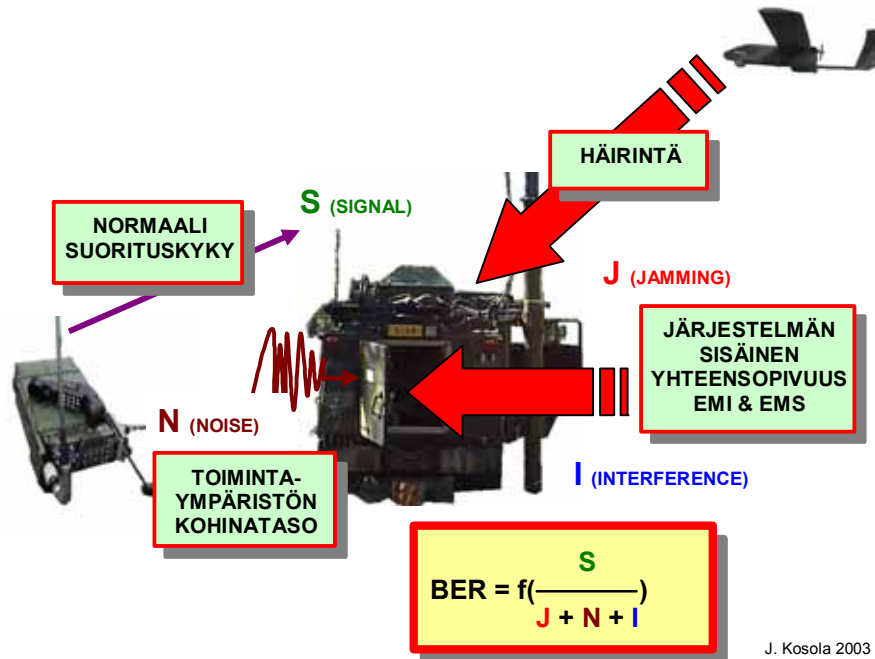
Kohinan vaikutusta voidaan vähentää sekä rakenteellisin keinoin (kaapeleiden ja laitteiden suojaus, signaalin suodatus, maadoitus, moduloitimenetelmän valinta yms.) että käyttäjän toimenpitein (antennin suuntaus, aseman sijoituspaikan valinta yms.). Lämpökohina on kuitenkin aineen luontainen ominaisuus eikä voida poistaa millään keinoilla. Sen vaikutus voidaan minimoida huolellisella järjestelmäsuunnittelulla.

Sisäinen kohina muodostuu lämpökohinasta sekä puolijohteiden toimintaperiaatteen satunnaisuudesta, kuten elektronien ja aukkojen äärellisistä ja osin satunnaisista liikenopeuksista puolijohteissa.

Lämpökohinan spektri on pienillä taajuuksilla (alle 10^{12} Hz, eli yli 300 μm aallonpituuksilla) tasainen, eli kohinaa on jokaisella taajuudella saman verran. Tämän vuoksi kohinaa sanotaan myös *valkoiseksi kohinaksi*. Kohinan teho on pienimmillään sovitetun vastuksen yli

$$N = k \cdot T \cdot B \quad \text{W,}$$

jossa k on Boltzmannin vakio $1,380658 \cdot 10^{-23}$ J/K ja T on lämpötila Kelvineinä.



Kuva 63: Järjestelmän suorituskyky - kuvassa viestijärjestelmän siirtoyhteyden laatua kuvaava bittivirhesuhde BER (Bit Error Ratio) riippuu hyötysignaalin suhteesta järjestelmän omaan ja taustaympäristön kohinatasoon N, muiden järjestelmien aiheuttamaan interferenssiin I ja mahdollisten häirintäjärjestelmien häirintäsignaaliin J.

Lämpökohinan teho riippuu siten komponentin lämpötilasta ja kaistanleveydestä.

Kaikki elektroniset järjestelmät lisäävät jonkin verran signaalin kohinatasoa. Tätä ilmiötä kuvataan kohinaluvulla F, joka on laitteen vastaanottaman signaali-kohinasuhteen suhde laitteen lähettämään signaali-kohinasuhteeseen:

$$F = \frac{\text{SNR}_{\text{in}}}{\text{SNR}_{\text{out}}}, \text{ eli}$$

$$\text{SNR}_{\text{out}} = \frac{\text{SNR}_{\text{in}}}{F}$$

Tutkajärjestelmillä kohinaluku on 1-3 GHz alueella noin 1-2 dB, 10 GHz alueella noin 3-5 dB ja 18 GHz alueella noin 5 dB. HF-vastaanotinten kohinaluku saattaa olla hyvinkin suuri, luokkaa 15 dB. Tämä johtuu siitä, että matalilla taajuuksilla toimivia HF-järjestelmiä dominoi ulkoinen (ilmakehän) kohina, joten vastaanotinten kohinaluvulla ei ole suurta merkitystä.

Kuvassa 64 esitetään kohinan vaikutus signaali-kohinasuhteeseen. Laitteen vahvistus on A. Laitte vahvistaa sekä tulevan signaalin, että siihen sekoittuneen kohinan vahvistuksella A. Laitteen itsensä aiheuttama lisäkohina on otettu huomioon termillä $(F-1)kTB$. Laitteesta lähtevä signaali-kohinasuhde on siten:

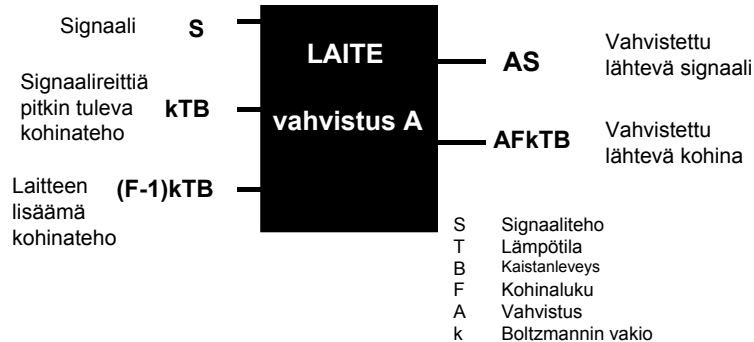
$$\frac{S_o}{N_o} = \frac{A \cdot S_i}{k \cdot T \cdot B \cdot A + (F-1) \cdot k \cdot T \cdot B \cdot A}$$

mikä supistuu muotoon

$$\frac{S_o}{N_o} = \frac{S_i}{F \cdot k \cdot T \cdot B}$$

Laitteen kohinatasa voidaan ilmaista myös ekvivalenttisenä kohinalämpötilana:

$$T_{\text{sys}} = (F - 1) \cdot T_o \text{ jossa } T_o \text{ on referenssilämpötila (yleensä 290 K)}$$



Kuva 64: Laitteen aiheuttama kohina AFkTB sekä laitteesta lähtevä vahvistettu signaali ovat käytännössä sekoittuneet toisiinsa, vaikka teoreettisessa mallissa ne onkin erotettu toisistaan.

Laitteen kohinalämpötila on yleensä yli ympäröivän lämpötilan, ellei laitetta ole jäädytetty. On kuitenkin huomattava, että matalakohinavahvistimilla, joissa käytetään reaktiivisia komponentteja T_{sys} voi olla alle 290 K.

Laitteesta lähtevä kohinateho voidaan ilmaista myös ekvivalentin kohinalämpötilan avulla:

$$N_o = A \cdot k \cdot (T_{\text{sys}} + T_s) \cdot B$$

jossa T_{sys} on laitteen ekvivalentti kohinalämpötila ja T_s signaalilähteen ekvivalentti kohinalämpötila.

Passiivisissa järjestelmissä, kuten siirtolinjoissa ja signaalikaapeleissa, kohinaluku on sama kuin järjestelmän vaimennus, eli:

$$L_{\text{line}} = F_{\text{line}} \text{ ja vastaavasti } T_{\text{line}} = (L_{\text{line}} - 1) \cdot T_o$$

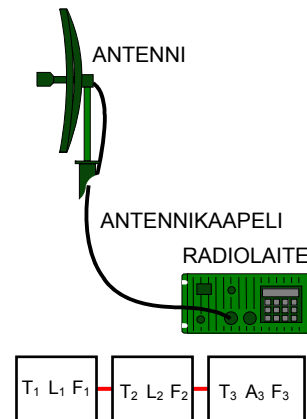
Tämän mukaisesti häviöllinen siirtomedia paitsi pienentää signaalin tasoa, myös lisää kohinaa aiheuttaen siten entistä suuremman pienennyksen signaali-kohinasuhteelle. Tämä selittää kuvassa 61 havaittavan kohinatason nousun 8-10 GHz taajuudelta alkaen: taajuuden noustessa ilmakehän absorptio nousee merkittäväksi ja siirtomedia tulee yhä häviöllisemmäksi. Samalla kun ilmakehä absorboi energiaa radioaalloista, se säteilee sitä kohinana kaikkiin suuntiin. Ilmakehän aiheuttama kohina riippuu aallon ilmakehässä kulkemasta matkasta: mikäli vastaanottimen antenni on suunnattu horisonttiin, kulkee aalto ilmakehässä pidemmän matkan, kuin jos antenni on suunnattu suorassa kulmassa taivaalle. Tämän vuoksi matalilla

elevaatiokulmilla antennien kohinalämpötila on suurempi kuin pienillä. Korkeilla taajuuksilla kasvaa myös sateen aiheuttama vaimennus ja siten myös sen aiheuttama taustakohinan taso.

Siirtoketjun, esimerkiksi antennin, signaalikaapelin ja vastaanottimen yhteinen kohinaluku ja järjestelmän ekvivalenttinen kohinalämpötila saadaan kaavoista:

$$F_{\text{sys}} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{A_1} + \frac{F_3 - 1}{A_1 \cdot A_2} + \dots$$

$$T_{\text{sys}} = T_1 + \frac{T_2}{A_1} + \frac{T_3}{A_1 \cdot A_2} + \dots$$



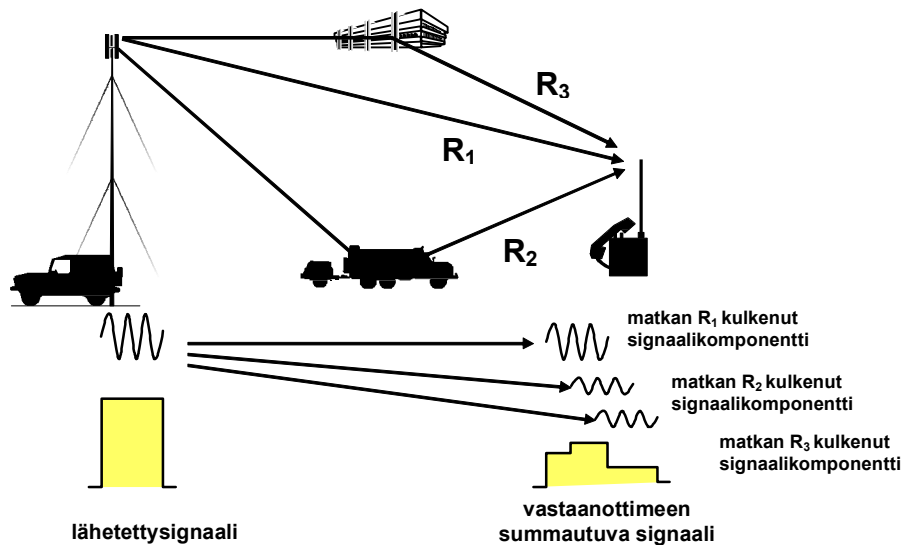
jossa F_1 , F_2 ja F_3 ovat kolmen ensimmäisen komponentin (esim. antenni, kaapeli, vastaanotin) kohinaluvut, A_1 , A_2 ja A_3 näiden vahvistukset (passiivisilla komponenteilla vaimennus, eli $A < 1$) ja T_1 , T_2 ja T_3 näiden kohinalämpötilat.

Monitie-eteneminen ja häipyminen

Kuten jo aiemmin totesimme, radioaalto heijastuu tasaisista pinnoista ja väliaineen taitekertoimen muuttumisen vuoksi sekä siroaa sopivan kokoisista epätasaisuuksista. Tällöin vastaanottimeen saapuu useita eri reittejä kulkeneita signaalikomponentteja, joiden amplitudi, vaihe ja polarisaatio ovat erilaisia. Jos aalto on lisäksi heijastunut liikkuvasta kohteesta, sen taajuuskin on Dopplerilmiön vuoksi muuttunut. Vastaanottimessa nämä signaalit summautuvat yhteen ja tyypillisesti heikentävät vastaanotetun signaalin laatua (tosin tietyissä vastaanotintyypeissä monitie-etenemistä käytetään jopa hyväksi). Häipyminen johtuu siitä, että monitie-etenemisen seurauksena vastaanottimeen saapuu vastakkaisvaiheisia signaalikomponentteja, jotka summautuessaan mitätöivät toisensa, mikä vastaanottimessa näkyy signaalin äkillisenä häipymisenä. Näiden ilmiöiden vaikutusta käsitellään tarkemmin viestijärjestelmien yhteydessä.

Spektrin rajallisuus

Sähkömagneettinen spektri on kaikille yhteinen energian ja informaation siirtoon käytettävä media, jossa yksi käyttäjä saattaa häiritä toisia. Toisten häiriytyminen pätee erityisesti radiotaajuiselle alueelle, jossa signaali etenee joka suuntaan tai ainakin suhteellisen laajassa avaruuskulmassa, minkä vuoksi signaali etenee lähettäjältä vastaanottajiksi tarkoitettujen lisäksi myös useisiin muihin vastaanottimiin. Spektrin alapäässä signaalit ja häiriöt etenevät jopa useita kertoja maapallon ympäri. HF-alueella häiriöitä saattaa tulla maapallon toiselta puolelta ja VHF-alueellakin häiriöt etenevät pitkän matkan päähän. Vaikka häiriöt UHF- ja SHF-alueilla eivät etenekään globaalisti, nämä alueet ovat täyttyneet yhteiskunnan teknistymisen myötä. Kuten aiemmista näitä spektrin alueita käsitelleistä luvuista kävi ilmi, näillä taajuuksilla toimii monia yhteiskunnan kannalta kriittisiä järjestelmiä, kuten radiolinkkejä, paikantamis- ja navigointijärjestelmiä sekä mobiilitietoliikennejärjestelmiä.



Kuva 65: Monitie-eteneminen aiheuttaa signaaliin vääristymiä. Heijastuneet komponentit vahvistavat tai heikentävät suoraan edennyttä signaalia riippuen niiden kulkeman matkan erosta johtuvasta vaihe-erosta.

Tietoyhteiskunnassa spektristä on tullut monessa suhteessa ahdas: spektri on allokoitu hyvin suuressa määrin ja lisäksi allokoitua aluetta on hyvin täynnä erilaisia järjestelmiä. Tämän ongelman vuoksi lisensoimattomien tai rajoittamattomien järjestelmien kehitykseen tullaan panostamaan. Esimerkiksi kiinnostus signaalitehoitehdydeltään alle kohinatason oleviin hajaspektrijärjestelmiin, ultralaajakaistaisiin ad hoc -tyyppisiin lähikommunikaatio-järjestelmiin sekä optisiin radiolinkkeihin on suurta.

Tässä luvussa käytiin moniin muihin elektroniikka- ja tietoliikennejärjestelmiä käsitteleviin kirjoihin verrattuna poikkeuksellisen laajasti läpi sähkömagneettisen spektrin ominaisuuksia ja sen eri osa-alueiden sovellettavuutta. Laaja käsittely on kuitenkin perusteltua, jotta seuraavissa luvuissa esiteltävien erilaisten viesti-, johtamis- ase-, paikantamis- yms. järjestelmien mahdollisuuksia ja rajoituksia voitaisiin ymmärtää riittävän syvästi. Seuraavassa luvussa käsitellään ensimmäistä sovellusaluetta, tietoliikennejärjestelmiä.

TIETOLIIKENNEJÄRJESTELMÄT

Luvussa alkuosassa käydään läpi keskeiset taistelukentän viestijärjestelmiin vaikuttavat lainalaisuudet ja teorit. Luvun loppupuolella esitellään tärkeimpiä taktisia viestijärjestelmiä ja niiden kehityssuuntia. Alueen laajuuden ja nopean kehityksen vuoksi painopisteeksi on erilaisten järjestelmien esittelyn sijaan asetettu se, että lukija ymmärtäisi luonnon – erityisesti sähkömagneettisen spektrin - aiheuttamat rajoitukset ja antamat mahdollisuudet viestijärjestelmien toteuttamisessa.

VIESTIJÄRJESTELMÄN RAKENNEOSAT

Rakenteellinen jako

Viestijärjestelmät ovat rakenteeltaan, kooltaan, kapasiteetiltaan ja käyttötarkoitukseltaan hyvin erilaisia, minkä vuoksi aiheen koottu käsittely on jossain määrin hankalaa. Kuitenkin kaikki viestijärjestelmät sisältävät samantyyppisiä toiminnallisia ja rakenteellisia osia, joita käsitellään tämän luvun alussa kootusti. Rakenteellisen jaon perusteella voidaan erottaa esimerkiksi:

- liityntäjärjestelmä
- kytkentä- ja välitysjärjestelmä
- transmissiojärjestelmä
- verkon suunnittelu- ja hallintajärjestelmä

Toiminnallisesti voidaan erottaa esimerkiksi reititys, salaus, limitys yms. informaation siirron aloittamiseen, toteuttamiseen ja valvomiseen liittyvät vaiheet. Spektrin käytön kannalta olennaisin on luonnollisesti siirto- ja liityntäjärjestelmä, minkä vuoksi vain sitä tarkastellaan toiminnallisen jaon mukaisesti. Aluksi käydään kuitenkin läpi rakenteellisen jaon mukaiset viestijärjestelmän osat, jotta lukijalle syntyy riittävä kokonais käsitys ennen yksityiskohtiin paneutumista.

Liityntäjärjestelmä

Liityntäjärjestelmä vastaa järjestelmän käyttäjien (joista teletekniikassa käytetään nimitystä tilaaja (subscriber) tai loppukäyttäjä (end-user) liittämistä muuhun viestijärjestelmän infrastruktuuriin. Perinteisesti yleisin liityntä on pohjautunut metallijohtimeen, mutta se voi perustua myös optiseen kuituun tai radiotiehen. Johtimettomat liittymät ovat kehityksen myötä syrjäyttämässä johdinliityntän. Nimitystä johtimeton (tai langaton) liityntä käytetään yleensä sovelluksissa, joissa verkkoon johtimella liitetty puhelin on korvattu tukiasemalla ja siihen radiolinkillä yhdistetyllä mukana kannettavalla puhelimella. Vaikka liityntä on fyysisesti liikkuva (puhelinjohto ei rajoita liikkumista), loogisesti (eli verkon kannalta) se on samankaltainen kuin johdinliityntäkin, eli sidottu tiettyyn paikkaan. Solukoverkolla tarkoitetaan järjestelmää, jossa tilaaja on yhdistetty verkkoon tukiasemien

kautta ja jossa tilaaja kykenee liikkumaan tukiasemien peittoalueelta toiselle. Tällöin järjestelmä tunnistaa tilaajan liikkumisen ja siirtää tämän radioyhteyden uuden tukiaseman hallittavaksi.



Kuva 66: Esimerkki viestijärjestelmän jakamisesta toiminnallisiin osiin.

KytKentä- ja välitysjärjestelmä

KytKentä- ja välitysjärjestelmä vastaa yhteyden muodostamisesta kahden tilaajan välille, tai tilaajan ja hänen kaipaamansa palvelun välille tai neuvottelu- ja kuulutusyhteyksissä usean tilaajan välille. Järjestelmä huolehtii myös muodostetun yhteyden valvonnasta ja purkamisesta. Toiminnallisesti välitysjärjestelmät voidaan jakaa piiri- ja pakettikytkentäisiin.

Piirikytkentäisessä järjestelmässä tilaajan ja hänen tarvitsemansa palvelun tai toisen tilaajan välille muodostetaan looginen yhteys⁷, joka varataan tähän käyttöön koko yhteyden ajaksi. Kun yhteyttä ei enää tarvita, se puretaan, sillä käyttämätön yhteys varaa koko piirin samoin kuin käytettykin yhteys.

Pakettikytkentäisessä yhteydessä siirrettävä tieto pilkotaan lähetyspäässä osiin, joista käytetään nimitystä paketti. Paketit kehystetään vastaanottajan sekä mahdollisesti myös lähettäjän yksilöivillä otsikko- ja ohjaustiedoilla ja yleensä myös virheenkorjausinformaatiolla ja. Tämän jälkeen ne siirretään erillisinä paketteina pakettikeskuksilta toisille. Keskuksat lukevat pakettien otsikotiedoista vastaanottajan osoitteen ja välittävät paketit edelleen lähempänä vastaanottajaa oleville pakettikeskuksille. Vastaanottopäässä kehystys puretaan ja paketit kootaan kokonaiseksi sanomaksi, joka luovutetaan vastaanottajalle. Mikäli lähettäjän ja vastaanottajan välille muodostetaan looginen yhteys ennen pakettien lähettämistä, puhutaan yhteydellisestä pakettiverkosta. Tällöin paketit kulkevat aina samaa reittiä pitkin, kuten piirikytkentäisessäkin yhteydessä. Erona on kuitenkin se, ettei muodostettu yhteys kuluta koko piirin kapasiteettia, vaan varaa sen vain silloin kun yhteydellä siirretään tietoa. Yhteydettömässä pakettiverkossa paketit annetaan järjestelmän siirrettäväksi ilman että vastaanottajaan on muodostettu yhteyttä tai ilman että vastaanottajan olemassaolostakaan olisi varmuutta. Kukin paketti on itsenäinen kokonaisuus, joka kulkee omia reittejään vastaanottajalle. Tällaisista paketeista käytetään usein nimitystä sanoma ja yhteydettömästä pakettiverkosta nimeä sanomaverkko. Pakettikytkentäisessä järjestelmässä osa kapasiteetista kuluu kehystysinformaation siirtämiseen, minkä vuoksi piirikytkentä on suositeltu ratkaisu silloin kun

⁷ Nimitystä looginen yhteys käytetään erotuksena fyysisestä yhteydestä, jossa tilaajat on yhdistetty suljetun johtimen välityksellä, kuten relekeskuksissa. Nykyiset tietokoneohjatut järjestelmät yhdistävät tilaajajohdoilta tulevat bitit rekistereiden välityksellä, mistä tässä käytetään nimitystä looginen yhteys.

verkon tarjoama siirtokapasiteetti on lähellä tilaajan tarvitsemaa siirtokapasiteettia eikä tilaa ylimääräiselle kehysinformaatiolle ole.

Transmissiojärjestelmä

Transmissio-, eli runkoverkon siirtojärjestelmä, vastaa keskusten välisten yhteyksien muodostamisesta. Transmissiojärjestelmät voidaan jakaa kahteen tyyppiin; johtimelliseen – nykyisin käytännössä valokuituoptiseen – järjestelmään ja johtimettomaan radiolinkeillä toteutettuun järjestelmään. Sotilassovelluksissa transmissiojärjestelmään kuuluu varsinaisen siirtojärjestelmän lisäksi usein myös salausrjestelmä, vaikka salausta pyritäänkin erottamaan transmissiosta, jotta tiedon siirrossa voitaisiin käyttää mahdollisimman monia verkkoja.

Verkon suunnittelu ja ohjaus

Verkon suunnittelu- ja ohjausjärjestelmä vastaa verkon topologian suunnittelusta, verkkoelementtien, kuten keskusten ja radiolinkkien toiminnan ohjaamisesta ja valvonnasta sekä muista verkon tilan hallintaan ja muutoksiin liittyvistä seikoista.

Solmuttomat verkot

Solmuttomissa verkoissa liityntä, kytkentä, välitys ja transmissio on integroitu samaan verkkoelementtiin, joka välittää kauttaan myös muiden tilaajien liikennettä. Tällä saavutetaan useita hyötyjä:

- Kahden lähellä toisiaan sijaitsevan tilaajan välistä informaatiota ei siirretä tarpeettomasti runkoverkossa, jossa se veisi turhaan kapasiteettia.
- Verkkosuunnittelua ei tarvita, koska tilaajalaitteet muodostavat itse verkkokuvan ja pitävät sitä yllä siirtyessään paikasta toiseen.
- Koska verkon kaikki elementit kykenevät reitittämään ja välittämään tietoja, verkossa ei ole kriittistä komponenttia, jonka lamautuminen estäisi koko verkon toiminnan.
- Verkkoelementtien väliset yhteydet ovat tyypillisesti pienempiä kuin tukiasemapohjaisissa solukko verkoissa, minkä vuoksi yhteyksien havaitseminen ja häiritseminen on solukko verkko toteutusta vaikeampaa.
- Lyhyiden yhteysvälien vuoksi voidaan käyttää korkeampia taajuuksia, joilla voidaan saavuttaa suurempia siirtokapasiteetteja.

Solmuttomien verkkojen ongelmina on verkon suunnittelemattomuuden mukanaan tuoma epävarmuus palvelun maantieteellisestä ja ajallisesta saatavuudesta sekä verkon hallitsemattomuudesta ja elämisestä johtuvat sanomanvälityksen viipeen vaihtelut.

Siirto- ja liityntäjärjestelmän toiminnallinen jako

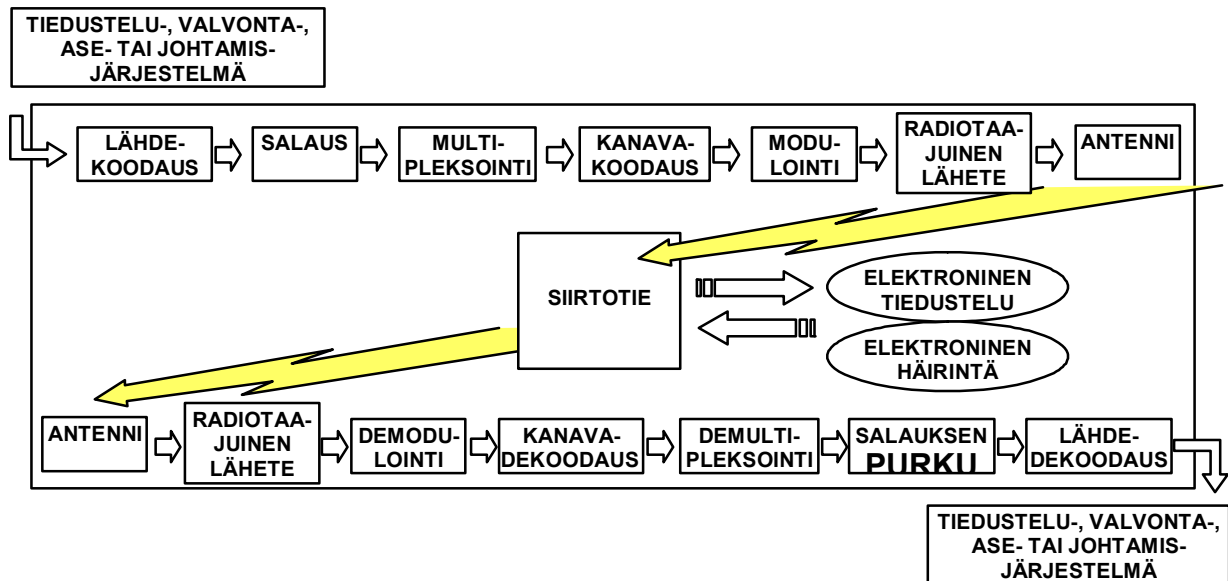
Edellä on kuvattu viestijärjestelmän jakoa erilaisiin rakenteellisiin elementteihin. Tätä jakoa voidaan hyödyntää järjestelmien määrittelyssä, hankinnoissa ja ylläpidossa. Se ei kuitenkaan sovellu järjestelmäkokonaisuuden teknisen toiminnan tarkasteluun silloin kun halutaan puhua spektrin käytöstä ja hallinnasta. Tähän soveltuu paremmin järjestelmän jako toiminnallisiin osiin kuvan 67 mukaisesti.

Viestijärjestelmä on palvelujärjestelmä, jonka tehtävänä on mahdollistaa tiedon lähteen ja nielun välinen kommunikaatio. Viestijärjestelmä ei itsessään sisällä tietoa, vaan välittää muiden järjestelmien tuottamaa tietoa. Informaation lähteinä ja nieluina toimivat esimerkiksi tiedustelu-, valvonta-, ase- ja johtamisjärjestelmät. Viestijärjestelmän vastuulla olevat tiedon siirtoprosessin vaiheet ovat:

1. lähdekoodaus
2. salaus
3. kanavakoodaus
4. lähteen multipleksointi muiden lähteiden kanssa
5. kantataajuisen signaalin modulointi ja siirto radiotaajuiseksi
6. radiotaajuisen signaalin lähettäminen
7. radiotaajuisen signaalin vastaanotto
8. radiotaajuisen signaalin siirto välitaajuudelle ja demodulointi
9. lähteen erottaminen muista lähteistä (demultipleksointi)
10. kanavadekoodaus
11. salauksen purku
12. lähdedekoodaus

Edellä mainittujen vaiheiden lisäksi siirtojärjestelmän on huolehdittava lähteen ja nielun välisestä synkronoinnista, multipleksoinnin ja demultipleksoinnin välisestä synkronoinnista, salaamisen ja salauksen purkamisen välisestä synkronoinnista ja muusta tarvittavasta tahdittamisesta. Näitä toiminnallisia informaation siirtoon liittyviä vaiheita käsitellään tarkemmin seuraavassa signaaliteoriaa käsittelevässä luvussa.

Sodankäynnissä voidaan siirtojärjestelmään vaikuttaa joko järjestelmän sisältä ohjelmistohyökkäyksiin tai ulkoa elektronisella sodankäynnillä. Elektronisen sodankäynnin menetelmin voidaan hyökätä järjestelmään siirtotien kautta tai suoraan järjestelmän laitteisiin. Edellinen on sodankäynnissä jo pitkään käytettyä ja huomattavan yleistä radiohäirintää, jossa pyritään peittämään hyötysignaali häirintälähteen alle. Kun hyöty- ja häirintäsignaalien suhde on riittävän pieni, järjestelmä ei kykene enää tulkitsemaan oikein tulevaa signaalia, mikä johtaa aluksi siirtovirheisiin ja lopulta synkronoinnin petettyä koko yhteyden katkeamiseen. Yhteys katkeaa telejärjestelmässä ensisijaisesti sen vuoksi, ettei järjestelmä kykene synkronoitumaan vastapäähän, joten se ei tiedä, miten tulevia – mahdollisesti jopa virheettömiä – bittejä tulisi tulkita. Kun synkronointi on menetetty, järjestelmä pyrkii tahdistumaan uudelleen, mikä kestää oman aikansa. Tällöin järjestelmä ei kykene siirtämään tietoa lähteeltä nielulle, vaikka yhteyttä ei enää häiritäisikään.



Kuva 67: Esimerkki tiedonsiirtojärjestelmän toiminnallisesta jaosta. Jakoa voidaan käyttää sekä liityntä- että transmissiojärjestelmän käsittelyyn.

Jos elektronisen järjestelmän toiminta ei perustu sähkömagneettisen spektrin hyödyntämiseen, siihen ei voida vaikuttaa perinteisellä elektronisella häirinnällä, vaan on käytettävä elektronista lamauttamista tai tuhoamista. Tämä on mahdollista joko sähkömagneettisen pulsin (EMP, Electro-Magnetic Pulse) tai suunnatun energian aseiden (DEW, Directed Energy Weapon), kuten suurtehomikroaaloaseen, avulla. HPM-aseella pyritään vaikuttamaan järjestelmään häiritsemällä, lamauttamalla, vaurioittamalla tai tuhoamalla⁸ järjestelmän laitteiden elektroniikkaa.

Viestijärjestelmien radiolähete on suhteellisen helposti tiedusteltavissa ja siten se saattaa paljastaa paitsi viestijärjestelmän olemassaolon, myös sen paikan ja käyttöasteen. Verkon rakenteen ja käyttöasteen perusteella vihollinen voi tehdä johtopäätöksiä viestijärjestelmään tukeutuvien joukkojen määrästä ja tyypeistä, mikä yhdessä muiden tiedustelutietojen kanssa mahdollistaa joukkojen tulevien aikomusten ennustamisen. Tilapäisesti passiivinen viestijärjestelmäkin voidaan paljastaa laitteista lähtevän hajasäteilyn, aseman ja sen henkilöstön jättämien jälkien, ynnä muiden toissijaisten seikkojen perusteella.

SIGNAALITEORIAA

Normalisoitu signaali-kohinasuhde

Vastaanottimen tehtävänä on tulkita vastaanotettavan signaalin symbolit oikein kohinan seasta. Tehtäessä päätöstä tulkittavasta symbolista, on signaali- ja kohinatehon suhdetta

⁸ Häirinnällä käsitetään tilapäisten virhetoimintojen aiheuttamista, mikä laskee järjestelmän toimintakykyä normaalista. Lamauttamisessa järjestelmän toiminta estyy asevaikutuksen ajaksi kokonaan, mutta palaa ennalleen asevaikutuksen lakattua. Tuhoamisella ja vaurioittamisella tarkoitetaan pysyvän vian aiheuttamista järjestelmään. Vaurioittamisessa järjestelmän toiminta estyy osittain ja tuhoamisessa kokonaan eikä palaa asevaikutuksen lakattuakaan.

merkittävämpää se, mikä on signaalin symbolin energian suhde kohinatehotiheyteen. Mikäli vastaanotettavan signaalin teho on P_r ja kutakin symbolia lähetetään T_b sekuntia, on yhden symbolin energia:

$$E_b = P_r \cdot T_b$$

Kohinatehotiheydellä tarkoitetaan kohinatehoa taajuusyksikköä kohti, joten se saadaan, kun kokonaiskohinateho jaetaan sillä (kohina-) kaistanleveydellä, jolle teho on jakautunut:

$$N_o = \frac{N}{B}$$

Tällöin voidaan määrittellä normalisoitu signaali-kohinasuhde:

$$\frac{E_b}{N_o} = \frac{P_r T_b}{\left(\frac{N}{B}\right)}$$

Jos symbolin lähetysnopeus R_b ilmaistaan symbolin keston avulla ($R_b = 1/T_b$), niin normalisoiduksi signaali-kohinasuhteeksi saadaan:

$$\frac{E_b}{N_o} = \frac{P_r}{N} \cdot B \cdot T_b, \text{ ja koska } \frac{P_r}{N} = \text{SNR}, \text{ niin } \frac{E_b}{N_o} = \text{SNR} \cdot B \cdot T_b$$

Edellisestä havaitaan, että mikäli signaalin kaistaa levennetään tai siirtonopeutta pienennetään, niin käytettävissä oleva normalisoitu signaali-kohinasuhde kasvaa. Signaalin levittäminen aika- ja taajuustasossa tuo siis etua heikkojen signaalien tulkinnessa. Tähän perustuvat muun muassa hajaspektrilähteet, joissa $\text{SNR} < 1$, mutta $B \cdot T \gg 1$.

Symbolin energia saadaan kertomalla signaalin teho symbolin kestolla. Vastaavasti teho voidaan kirjoittaa muotoon:

$$S = \frac{E_b}{T_b}$$

jossa symbolin kesto voidaan korvata symbolien lähetysnopeudella:

$$R_b = \frac{1}{T_b}, \text{ joten } S = E_b \cdot R_b$$

Tällöin signaalin suhde kohinatehotiheyteen voidaan kirjoittaa muotoon:

$$\frac{S}{N_o} = \frac{E_b}{N_o} \cdot R_b$$

Kun kaavan termit järjestetään uudelleen, ja kun otetaan huomioon, että (luvussa *sähkömagneettinen spektri* esitelty) kohinatehotiheys $N_o = k \cdot T_{\text{sys}}$, saadaan kaava suurimmalle mahdolliselle bittinopeudelle:

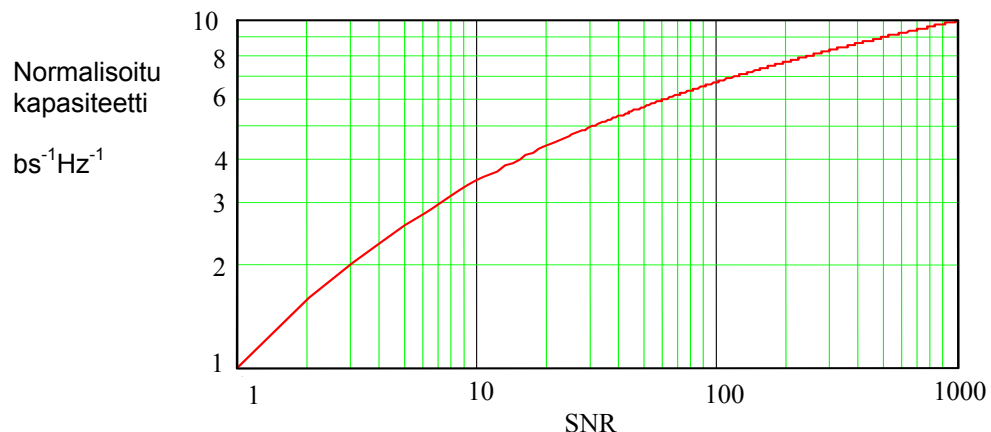
$$R_{b,\max} = \frac{S_{\min}}{k \cdot T_{\text{sys}} \cdot \left(\frac{E_b}{N_o}\right)_{\min}}$$

Kaavasta nähdään, että suurin mahdollinen siirtonopeus riippuu paitsi signaalin minimitasosta, myös järjestelmän kohinalämpötilasta T_{sys} ja pienimmästä sallitusta normalisoidusta signaali-kohinasuhteesta E_b/N_o . Seuraavassa esitetään, miten pienin hyväksyttävissä oleva normalisoitu signaali-kohinasuhde voidaan määrittellä. Sitä ennen on kuitenkin syytä tutustua teoriassa suurimman mahdollisen informaationsiirtonopeuden antavaan Shannonin teoreemaan.

Shannon-Hartleyn teoreema

Shannon-Hartleyn teoreema antaa suurimman yhteydellä teoreettisesti siirrettävissä olevan informaatiomäärän, joka riippuu vain signaali-kohinasuhteesta ja käytettävästä kaistanleveydestä:

$$C = B \cdot \frac{\log\left(1 + \frac{S}{N}\right)}{\log(2)}$$



Kuva 68: Shannonin teoreeman mukainen kapasiteetti kaistanleveyttä kohti signaali-kohinasuhteen funktiona.

Kuvassa 68 on esitetty kapasiteetti normalisoituna kaistanleveyteen ($B=1$) signaali-kohinasuhteen SNR funktiona.

Shannon-Hartleyn teoreeman kaavasta nähdään, että kapasiteettia voidaan kasvattaa leventämällä signaalikaistaa tai parantamalla signaalikohinasuhdetta. Tällöin on kuitenkin otettava huomioon, että käytetty kaistanleveys vaikuttaa myös kohinatasoon ($N=N_oB$). Signaaliteho S voidaan ilmaista myös muodossa:

$$S = \frac{E_b}{T_b} = E_b \cdot R_b = E_b \cdot C$$

Tällöin Shannon-Hartleyn teoreema voidaan edellisen perusteella kirjoittaa muotoon:

$$\frac{C}{B} = \frac{\log\left(1 + \frac{E_b}{N_0} \frac{C}{B}\right)}{\log 2}$$

$$\text{tällöin: } 2^{\frac{C}{B}} = 1 + \frac{E_b}{N_0} \frac{C}{B}$$

$$\text{Kun yhtälöstä ratkaistaan } E_b/N_0 \text{ saadaan: } \frac{E_b}{N_0} = \frac{C}{B} \left(2^{\frac{C}{B}} - 1\right)$$

Tämä yhtälö määrää käytännössä rajan, jota pienemmällä E_b/N_0 -suhteella ei voida teoreettisesti taata virheetöntä kommunikointia. Kun $C/B \gg 0$ (käytetään äärettömän laajaa kaistaa informaation siirtoon), rajaksi saadaan

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{1}{\log_2(e)} = 0.69$$

Tätä (desibeleinä $-1,59$ dB) rajaa kutsutaan Shannonin rajaksi. Nykyteknologialla kyetään pääsemään erittäin lähelle tätä teoreettista kapasiteetin ylärajaa.

Modulointi ja koodaus

Viestijärjestelmässä signaali koodataan ensin sähköiseen muotoon kantataajuudelle. Tätä matalataajuista signaalia ei kuitenkaan voida siirtää radiotaajuuksilla, joten se on siirrettävä korkeammalle taajuudelle, joka sitten vahvistetaan ja lähetetään antennin kautta. Käytännössä tämä tehdään siten, että kantataajuinen signaali moduloi toista suuritaajuista signaalia. Tällöin suuritaajuisten signaalien jotakin ominaisuutta (amplitudi, taajuus tai vaihe) muutetaan kantataajuisten signaalien hetkittäisen ominaisuuden mukaisesti. Vastaavasti vastaanottimessa signaali sekoitetaan matalammalle välitaajuudelle (IF, Intermediate Frequency), jolla se demoduloidaan takaisin kantataajuudelle.

Modulaatiomenetelmät voidaan jakaa analogisiin ja digitaalisiin. Analogisessa modulaatiossa kantaaltaa moduloiva signaali on luonteeltaan jatkuva, eli se voi saada mitä tahansa arvoja. Digitaalisessa modulaatiossa moduloiva signaali on diskreetti, eli se voi saada vain tiettyjä ennalta sovittuja arvoja. Analogiset modulaatiomenetelmät voidaan jakaa esimerkiksi seuraaviin lajeihin:

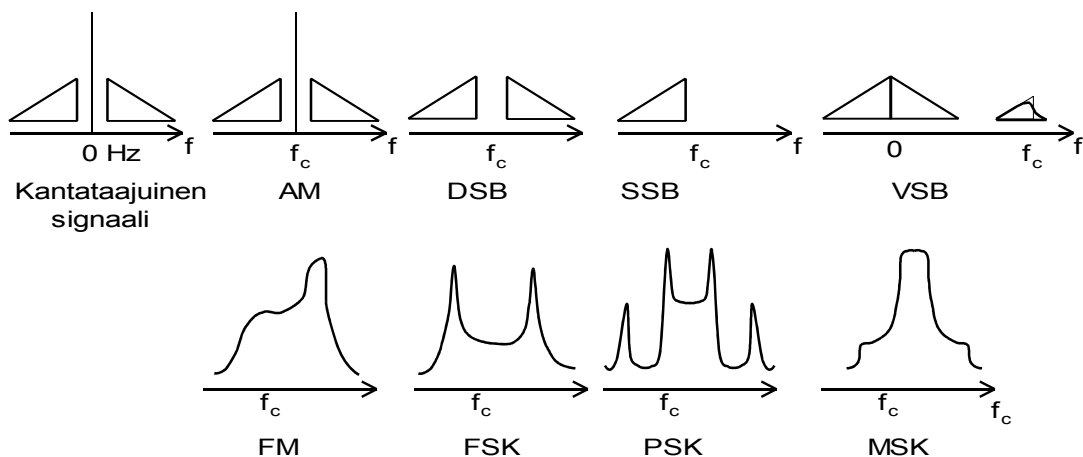
- Amplitudimodulaatio AM (Amplitude Modulation), jossa lähetetään kantaalta sekä moduloitu signaali siirrettynä kantaallon taajuudelle. Tästä käytetään myös nimitystä A3E.
- DSB-modulaatio (Double Sideband), joka vastaa AM-modulaatiota, mutta jossa informaatiota sisältämätön kantaalto on poistettu
- SSB-modulaatio (Single Sideband), jossa toinen DSB:n kaista (joka on toisen kaistan peilikuva eikä siten sisällä informaatiota) on poistettu. Jos kantaalto lähe-

tetään, käytetään myös nimitystä H3E. Nimitystä J3E käytetään, jos kanta-aalto lähetetään vaimennettuna.

- VSB-modulaatio (Vestigial Sideband), jossa lähetetään toinen sivukaista kokonaan ja toinen osittain. Tällä pyritään edesauttamaan vastaanottimen virittymistä oikealle taajuudelle. Tästä modulaatiosta käytetään nimitystä C3F.
- QAM (Quadrature Amplitude Modulation), jossa kaksi toisiinsa nähden 90 asteen vaihekulmassa olevaa signaalia on yhdistetty samalle kaistalle.
- Taajuusmodulaatio FM (Frequency Modulation), jossa signaalin taso pysyy samana, mutta taajuus vaihtelee
- Vaihemodulaatio PM (Phase Modulation), jossa signaalin vaihetta muutetaan.

Vastaavasti digitaaliset modulaatiomenetelmät voidaan jakaa seuraaviin päätyyppeihin:

- Amplitudiavainnus ASK (Amplitude Shift Keying)
- Taajuusavainnus FSK (Frequency Shift Keying)
- Vaiheavainnus PSK (Phase Shift Keying)



Kuva 69: Esimerkkejä eri modulaatioiden energian jakaumasta spektrissä.

ASK:ta käytetään nykyisin lähinnä laitteiden sisäisessä tiedonsiirrossa FSK:n ja PSK:n dominoidessa spektrin käyttöä. Digitaalisen moduloivan signaalin äkilliset muutokset johtavat moduloidun signaalin leviämiseen spektrissä. Tätä pyritään välttämään käyttämällä niin sanottua pehmeää avainnusta, jossa esimerkiksi moduloidun signaalin vaihe muuttuu hitaasti moduloivaa signaalia vastaavaksi. Tällä estetään signaalin kaistan leviäminen. Esimerkiksi MSK:ssa (Minimum Shift Keying) moduloitu signaali muuttuu hitaasti signaalin tason pysyessä vakiona, millä minimoidaan signaalin viemä tila spektrissä.

Modulointimenetelmän valinta perustuu kompromissiin eri tekijöiden kesken. Tärkeimmät valintaan vaikuttavat seikat ovat:

- tarvittava siirtonopeus
- yhteyden laatukriteerit, kuten siirtovirhetodennäköisyys, siirtoviive sekä viipeen hajonta

- soveltuvuus siirtokaistalle; modulaation vaatima kaistanleveys
- soveltuvuus vihamieliseen sähkömagneettiseen ympäristöön, jossa signaali on alttiina mm. havainnoinnille, suuntimiselle, häirinnälle, häipymiselle sekä tahattomille radiohäiriöille.
- vaadittavan laitteiston ja ohjelmiston monimutkaisuus (vaikuttaa lähinnä hintaan ja luotettavuuteen)
- järjestelmän käytettävissä oleva ja modulaation vaatima lähetysteho (vaikuttaa järjestelmän hintaan, tilan tarpeeseen, painoon, havaittavuuteen sekä mahdollisten akkujen kestoaikaan)

Viestijärjestelmissä ollaan käytännössä jo siirrytty analogisista amplitudimodulaatioista digitaalisiin modulaatioihin, ennen kaikkea FSK:hon ja erilaisiin vaihemodulaatioihin, kuten QPSK (Quadrature Phase Shift Keying), MSK ja GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying). FSK:n suurimpana ongelmana on se, että se käyttää paljon taajuuskaistaa siirtonopeuteen nähden. Binäärisellä FSK:lla lähetyskaista on $B_t \approx 3 \cdot R_s$, mikä on paljon verrattaessa esimerkiksi BPSK:n viemään kaistaan $B_t \approx 2 \cdot R_s$. PSK:n ongelma kenttäviestiyhteyksillä on sen vaatima vakiotasoinen signaali, jota nopean häipymisen vuoksi ei usein kyetä tarjoamaan. Myös QAM edellyttää toimiakseen vakiosignaalin. MSK:n etuna on se, että sillä kyetään saavuttamaan samalla kaistalla FSK:hon nähden kaksinkertainen siirtonopeus.

Moduloinnin yhteydessä on erotettava käsitteet informaationsiirtonopeus, yhteyden symbolinopeus ja modulointinopeus. Informaationsiirtonopeus kertoo yhteydellä siirrettävän informaation todellisen määrän aikayksikössä. Symbolinopeus kertoo siirrettävien signaalisymbolien (kukin symboli voi sisältää useita bittejä informaatiota) määrän aikayksikössä ja modulointinopeus puolestaan signaalisymbolien muutosnopeuden (symbolin kestoajan käänteisarvo). Symbolinopeus on modulointinopeuden ja käytettävien ortogonaalisten siirto-kanavien, esimerkiksi kantaaltojen, tulo.

Shannonin teoreeman mukaisesti N signaalitasoa käyttämällä yhteyden maksimisiirtonopeudeksi saadaan:

$$C = 2 \cdot B \cdot \frac{\log(N)}{\log(2)}$$

jossa B on yhteyden kaistanleveys. Kaavasta voi päätellä, että yhteyden kapasiteettia voidaan nostaa kasvattamalla kaistanleveyttä tai lisäämällä signaalitasojen määrää. Käytännössä kaistanleveyden kasvattaminen voi olla mahdotonta käytettävissä olevan taajuuskaistan rajallisuuden tai tekniikan tai siirtotien asettamien rajoitusten vuoksi. Signaalitasojen lisääminen johtaa kahden eri symbolin välisen eron pienenemiseen ja siten heikentää signaalikohinasuhdetta, eli kahden eri symbolin välisen energian suhdetta kohinan energiaan, mikä puolestaan lisää bittivirhesuhdetta. Shannonin määrittämien rajojen ylitse ei siis päästä.

Demodulointimenetelmät jaetaan koherentteihin ja epäkoherentteihin. Koherentti signaalin ilmaisu edellyttää vastaanottimen synkronoitumista tulevan signaalin vaiheeseen, mikä on vaikea toteuttaa silloin kun yhteys on altis signaalin nopealle häipymiselle tai silloin kun yhteys muutoin katkeilee usein. Nopeaa häipymistä esiintyy silloin kun joko lähetin tai vastaanotin liikkuvat ja vastaanottimeen saapuu merkittäviä heijastuneita signaalikomponentteja. Esimerkiksi taajama- ja haja-asutusalueilla esiintyy 0..-10 dB heijastuskomponentteja,

jotka aiheuttavat häipymistä. Tiheitä signaalin katkoksia esiintyy myös pulssimuotoisen häirinnän tai taajuushypynnän vuoksi. Jälkimmäisessä tapauksessa koherentti vastaanotin joutuu aina uudelle taajuudelle siirryttyään tahdistamaan tulevaan signaaliin. Mikäli signaali-komponentti myöhästyy ajan Δt , se aiheuttaa suhteellisen vaihemuutoksen $\Delta\phi$ seuraavan kaavan mukaisesti:

$$\Delta\phi = \frac{t_s}{\Delta t}$$

jossa t_s on symbolijakson kestoaika. Koska $t_s = \frac{1}{f_s}$, niin kaavaa voidaan käyttää ilmaisemaan suurin ilmaisimen sietämä monitie-etenemisviive Δt_{\max} :

$$\Delta t_{\max} = \frac{1}{f_s \cdot \Delta\phi_{\max}}$$

Monitie-etenemisviiveen aiheuttamien ongelmien vuoksi esimerkiksi digitaalisissa kenttä-radioissa ja monissa muissa liikkuvissa radioviestijärjestelmissä, joissa signaali on altis häipymiselle, käytetään epäkoherenttia FSK-ilmaisua.

Bittivirhesuhde

Käytännössä vaadittava E_b/N_0 minimitaso riippuu käytettävästä modulaatiosta ja suurimmasta siedettävästä bittivirhetodennäköisyydestä P_b . Bittivirhetodennäköisyys voidaan myös ilmaista bittivirhesuhteena (BER, Bit Error Rate), joka kertoo kuinka suuri osa siirretyistä biteistä on virheellisiä. Seuraavassa taulukossa on esitetty kaavat epäkoherentin ja koherentin FSK:n sekä koherentin QPSK-modulaation bittivirhetodennäköisyyksien laskemiseksi normalisoidun signaali-kohinasuhteen funktiona.

Epäkoherentti FSK	$P_{b,\text{ncFSK}}(E_b/N_0) = \frac{1}{2} \cdot e^{-\frac{1}{2} E_b/N_0}$
Koherentti FSK	$P_b(E_b/N_0) = Q\left(\sqrt{E_b/N_0}\right)$
Koherentti QPSK	$P_b(E_b/N_0) = Q\left(\sqrt{2 \cdot E_b/N_0}\right)$

Taulukko 1: Bittivirhetodennäköisyys normalisoidun signaalienergian funktiona eri modulaatioilla, kun häipymistä ei esiinny.

Edellä on oletettu signaalitason pysyvän vakiona. Mikäli vastaanottimeen saapuu merkittäviä heijastuskomponentteja, jää tietyllä signaali-kohinasuhteella saavutettavissa oleva bittivirhesuhde tätä olennaisesti huonommaksi. Esimerkiksi maaradiokanavan häipymisolosuhteissa bittivirhesuhde eri modulaatiomenetelmillä saadaan kaavoista:

Epäkoherentti FSK	$P_b \left(E_b/N_{0 \text{ mean}} \right) = \frac{1}{2} \cdot \exp\left(-\frac{E_b/N_{0 \text{ mean}}}{2}\right)$
Koherentti FSK	$P_b \left(E_b/N_{0 \text{ mean}} \right) = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{2}{E_b/N_{0 \text{ mean}}}}} \right]$
Koherentti QPSK	$P_b \left(E_b/N_{0 \text{ mean}} \right) = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{E_b/N_{0 \text{ mean}}}}} \right]$

Taulukko 2: Bittivirhetodennäköisyys normalisoidun symbolienergian funktiona eri modulaatioilla häivymiselle alttiissa ympäristössä.

Edellä esiintyvä Q-funktio voidaan approksimoida kaavalla:

$$Q(x) = \begin{cases} \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\frac{\lambda^2}{2}} d\lambda \right] & \text{jos } x < 3 \\ \left[\frac{1}{x\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} \right] & \text{jos } x > 3 \end{cases}$$

Kuvassa 70 on esitetty epäkoherentin FSK:n, koherentin FSK:n, koherentin QPSK:n ja GMSK:n bittivirhesuhteet normalisoidun signaali-kohinasuhteen funktiona.

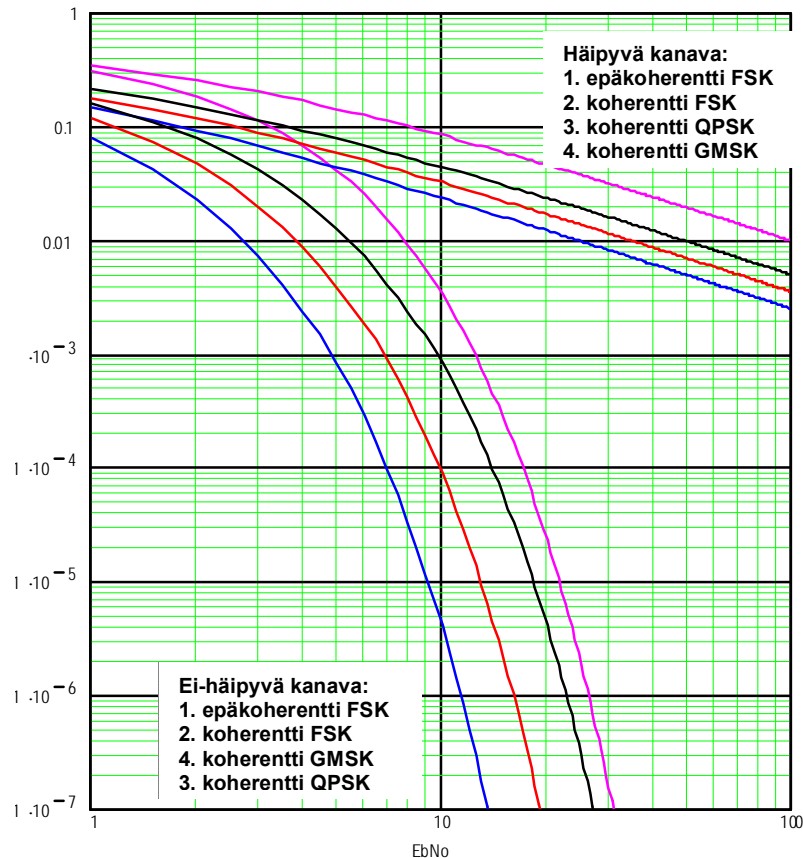
LINKKIANALYYSI

Tehobudjetti

Vastaanottimeen saatava teho P_r riippuu lähetystehosta P_t , lähetyssantennin vahvistuksesta G_t , lähettimen tehohäviöistä L_t , lähettimen ja vastaanottimen etäisyydestä (etenemisvaimennus L_R) vastaanotinantennin vahvistuksesta G_r sekä vastaanottimen tehohäviöistä L_r . Jos suuret ilmaistaan desibeleinä (teho dBW:nä ja antennivahvistus dBi:nä), niin viestijärjestelmän tehobudjetti voidaan kirjoittaa muotoon:

$$P_r = P_t + G_t - L_t - L_R + G_r - L_r$$

Yleensä linkkibudjetti lasketaan antennin maksimivahvistuksella, mikä voidaan ottaa huomioon joko laskemalla linkkibudjetti antennikulman funktiona ($G(\theta, \phi)$) tai lisäämällä korjaustermi vastaanottimen tai lähettimen häviöihin.



Kuva 70: Bittivirhesuhde häipyvissä ja ei-häipyvissä olosuhteissa.

Pienin hyväksyttävissä oleva vastaanotettu teho puolestaan riippuu järjestelmän kohinatasosta ja pienimmistä siedettävistä signaali-kohinasuhteista, kuten edellisessä luvussa jo todettiin. Mikäli yhteys on altis häipymiselle, tulee budjetissa varata häipymismarginaali M_F . Riittävän häipymismarginaalin suuruus riippuu yhteydeltä edellytettävältä bittivirhesuhteelta. Sotilasjärjestelmissä on vielä lisättävä häirintämarginaali M_J , eli se häirintä- ja hyötysignaalin suhde, jonka viestijärjestelmää vastaan toimivan häirintäjärjestelmän voidaan olettaa pystyvän tuottamaan vastaanottimeen.

Vastaanottimen kohinataso N , pienin sallittu signaalikohinasuhde SNR_{\min} ja vaadittavat häipymis- ja häirintämarginaalit M_F ja M_J määräävät pienimmän sallitun vastaanotetun signaalin tason, jolloin tehobudjetti voidaan kirjoittaa myös muotoon:

$$P_t + G_t - L_t - L_R + G_r - L_r = SNR_{\min} + N + M_F + M_J$$

Järjestelmäsuunnittelussa on kyettävä löytämään kompromissi tehobudjetin eri osatekijöiden kesken. Yleensä tehobudjetin tavoitteena on laskea järjestelmältä vaadittu lähetysteho tai antennivahvistus määrättyllä maksimietäisyydellä. Toimintaetäisyyden merkitys budjettiin on suuri, sillä etäisyys vaikuttaa etenemisvaimennukseen 2-4 -potenssiin verrannollisena. Mikäli aalto etenee tyhjässä⁹, etenemisvaimennuksena L_R käytetään vapaan tilan vaimennusta.

⁹ Tai mikäli Fresnellin 1. vyöhyke on vapaa esteistä.

Järjestelmän häviöt

Järjestelmän tehobudjetti sisältää lähettimen ja vastaanottimen häviöt signaalille. Mikäli lähetysteho on ilmoitettu EIRP:nä (Effectively Radiated Isotropic Power), sisältää tämä termi lähetystehon, lähetysantennin vahvistuksen ja lähettimen häviöt ($EIRP = P_t + G_t - L_t$). Yleensä lähetysteho ilmaistaan kuitenkin radiotaajuusena tehona lähetinpiirillä. Tämä teho siirretään *antenniliittinten* ja *antennikaapelin* kautta *antennille*, jolloin se vaimenee kussakin vaiheessa. Lisäksi mahdollinen antennin sää- ja tuulisuojuksi rakennettu *radomi* vaimentaa säteilyä. Nämä kaikki lähettimen vaimennukset on otettava huomioon linkkibudjettia laskettaessa.

Radiolähettimissä ja -vastaanottimissa tapahtuu lukuisia signaalihäviöitä moduloitaessa kantataajuisia lähetettä siirtokaistalle sekä demoduloitaessa signaali takaisin kantataajuisiksi. Moduloinnissa käytettävän paikallisoskillaattorin vaihekohina aiheuttaa lähettimessä moduloidun signaalin leviämistä taajuustasossa. Siirtokanavan kaistaa laajemmalle levinnyt signaali suodatetaan ennen lähettämistä, mistä aiheutuu signaalin tason heikkenemistä osan signaalitehosta suodattuessa pois. Vastaanottimessa paikallisoskillaattorin vaihekohina heikentää ilmaisimelle tulevaa signaalitasoa aiheuttaen lisää häviötä signaaliin. Lisäksi modulaatioprosessissa itsessään tapahtuu häviöitä. Vastaanottimen kannalta vain informaatiota sisältävä signaalienergia on merkittävä. Esimerkiksi AM-modulaatiossa osa lähetystehosta käytetään informaatiota sisältämättömän kantoaallon lähettämiseen, mikä tarkoittaa lisähäviötä hyötysignaalin kannalta.

Etenemisvaimennus kuvaa radioaallon tehotiheyden heikkenemistä etäisyyden kasvaessa. Tehotiheyden laskemisen lisäksi radioaallon polarisaatio saattaa muuttua aallon edetessä. Vastaanotinantennin vahvistus riippuu yleensä polarisaatiosta; kun polarisaatio muuttuu, antenni kykenee sieppaamaan pienemmän osan aallosta. Tästä aiheutuu *polarisaatiovaimennusta*. Jos vastaanottimen antenni on esimerkiksi 45 asteen kulmassa tulevan säteilyn polarisaatiotasoon nähden, putoaa vastaanotettu teho teoriassa puoleen. Mikäli vastaanotinantenni on 90 asteen kulmassa, ei se teoriassa kykene sieppaamaan tulevaa säteilyä laisinkaan. Käytännössä asia ei kuitenkaan ole näin, sillä ensinnäkin kaikki antennit ottavat vastaan myös ristikkäisesti polarisoitunutta säteilyä. Lisäksi etenevän säteilyn polarisaatio muuttuu heijastusten, taittumisen ja diffraktion vuoksi siten, että vastaanottimeen saapuu tyypillisesti vähäisessä määrin kaikkia polarisaatio-suuntia. Tällöin ristipolarisaation aiheuttama vaimennus voi vaihdella esimerkiksi 25-30 dB välillä.

Mikäli järjestelmässä käytetään suuntaavia antennia, on linkkibudjetissa on otettava huomioon antennien pystyttämisen mahdollisesti muodostuva suuntausvirhe, joka laskee vastaanotettua tehoa. Lisäksi tuuli tai alustan liike saattavat kääntää antennia aiheuttaen samalla *suuntausvirhevaimennusta*.

Vastaanottimen häviöt kattavat kaikki ne tekijät, jotka vaimentavat signaalia ennen ilmaisinta. Etenevä signaali vaimenee impedanssiepäsovituksesta johtuvan heijastuksen sekä signaali-johteen resistiivisyydestä johtuvan tehon absorboitumisen vuoksi. *Heijastumia* ja tehon *absorboitumista* tapahtuu järjestelmään mahdollisesti kuuluvassa *radomissa*, *antennissa*, *antenniliittimissä* ja *antennikaapelissa*. Vastaanottimessa vahvistettava ja ilmaisimelle vietävä kaista rajataan kaistanpäästösuodattimilla. Tästä aiheutuu *kaistanrajoitushäviöitä*, koska osa signaalin tehosta leikkautuu pois. Vastaanottimen *tahdistusvirheet* aiheuttavat häviötä, koska päätös vastaanotettavasta symbolista tehdään tällöin vain osittaisen signaalienergian perusteella.

Kohinalähteet

Signaaliin summautuu kohinaa lähettimellä, siirtotiellä ja vastaanottimessa, kuten jo luvussa *spektrin hyödyntämisen reunaehdot* todettiin. Lähettimen kohina aiheutuu muun muassa modulaattorin ja vahvistinten kohinasta sekä lähetinpiirin häviöistä. Kaikki signaalitiellä olevat resistiiviset komponentit, kuten liittimet, kaapelit, radomit ja antennit aiheuttavat häviöiden lisäksi myös kohinaa. Paikallisoskillaattorin vaihekohina aiheuttaa kohinaa sekä moduloinnissa että demoduloinnissa. Lisäksi digitaalisissa järjestelmissä signaalin kvantisointi, eli muuttaminen analogisesta jatkuvasta muodosta diskreettiin digitaaliseen muotoon, aiheuttaa kvantisointikohinaa.

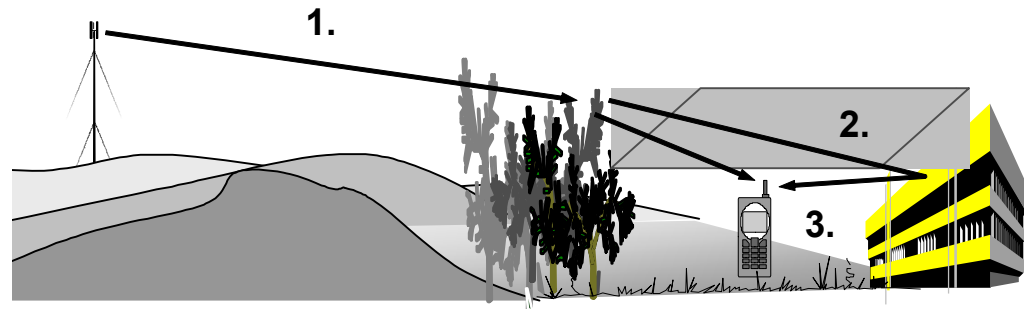
Ilmakehä aiheuttaa kohinaa voimakkaimmin niillä taajuuksilla, joilla sen vaimennus on suurin. Spektristä tulevan kohinan lähteitä on käsitelty tarkemmin luvussa *spektrin hyödyntämisen reunaehdot*, joten niitä ei ole syytä toistaa tässä yhteydessä. Vastaanottimessa kohinaa aiheuttavat samat komponentit kuin lähettimessäkin, eli radomi, antenni, liittimet, kaapelit ja suodattimet.

Siirtokaistan leveyteen nähden liian suuresta symbolinopeudesta johtuva symbolien välinen interferenssi (ISI, Inter-Symbol Interference) aiheuttaa symbolin energian leviämisen aikatasossa osittain seuraavien symboleiden päälle. Vastaanottimen kannalta tämä energia vastaa kohinaa, ellei sitä poisteta tietoisesti kanavaekvalisaattorilla. Esimerkiksi GSM-järjestelmässä symbolin energia on tietoisesti levitetty aikatasossa neljän symbolin alueelle, mikä huomioidaan ekvalisaattorilla, joka kerää aikatasossa levinneen signaalin energian ennen ilmaisua. Samalla siirtokanavalla toimivat muut radiolähtimet aiheuttavat häiriöitä vastaanotettavaan signaaliin (co-channel interference). Epäideaalisten kaistanpäästösuodatin-ten vuoksi pieni osa lähetteen energiasta pääsee siirtokanavan ulkopuolelle aiheuttaen häiriöitä tai jopa likuulamista viereisille radiokanaville (adjacent channel interference).

RADIOKANAVAN OMINAISUUDET

Keskeisin radiokanavan ominaisuuksista on sen aiheuttama vaimennus radioyhteydelle. Tämä vaimennus voidaan jakaa kolmeen osaan:

1. Yhteysvälin mediaanivaimennus (median path loss), joka edustaa suhteellisen laajalla alueella keskimääräistä vaimennusta, joka riippuu lähettimen ja vastaanottimen välillä olevasta maastosta ja antennikorkeuksista. Koska kyseessä on mediaanivaimennus, puolet todellisista vaimennusarvoista ylittää sen ja puolet alittaa. Erilaisiin mediaanivaimennusmalleihin palataan myöhemmin.
2. Keskimääräisen signaalitason vaihtelu, joka aiheutuu vastaanottimen lähellä olevista suurehkoista esteistä (shadowing). Tämä ilmiö noudattaa lognormaalia jakaumaa.
3. Pienimittakaavaiset äkillinen vaimennus, josta käytetään nimitystä nopea häipyminen (fast fading), johtuu vastaanottimeen eri reittejä pitkin saapuvien ja siten eri vaiheisten signaaliementtien interferenssistä. Välillä nämä signaaliementit vahvistavat toisiaan ja välillä vastakkaisvaiheisten komponenttien interferenssi häivyttää signaalin. Mikäli vastaanottimella on näköyhteys lähettimeen, signaalitaso noudattaa Rice-jakaumaa, ja Rayleigh-jakaumaa, jos näköyhteyttä ei ole.



Kuva 71: Vastaanottimen signaalitaso riippuu lähettimen ERP-tehon lisäksi yhteyden mediaanivaimennuksesta (1), vastaanottimen lähistöllä olevista varjostavista kohteista (2) ja monitie-etenemisestä johtuvasta nopeasta häipymisestä (3).

Edellä mainitut ilmiöt aiheuttavat vastaanottimen signaalitason satunnaista vaihtelua, joka saattaa haitata informaation vastaanottoa. Tämän vuoksi lähete voidaan ottaa vastaan useammalla antennilla, jotka ovat riittävän kaukana toisistaan. Tällöin on epätodennäköistä, että kaikki antennit olisivat samaan aikaan häipymäkuopassa. Menetelmää kutsutaan tila-diversiteetiksi (space diversity). Eri antennista tulevien signaalien yhdistäminen vastaanottiin voidaan tehdä usealla eri tavalla.

Monitie-eteneminen aiheuttaa myös signaalin viiveprofiliin tilastollista hajontaa (delay spread) mediaaniviipeen ympärille. Tällöin signaali leviää aikatasossa ja jos viivehaje on riittävän suuri, signaalienergia leviää useiden symbolien päälle. Kapeakaistaisissa järjestelmissä tämä aiheuttaa symbolien tulkintaa haittaavaa intersymbolista interferenssiä (ISI, Inter Symbol Interference). Laajakaistaisissa viestijärjestelmissä (esimerkiksi DS-SS-hajaspektri-järjestelmissä) ilmiötä voidaan käyttää hyväksi keräämällä eri reittejä edenneitä signaali-komponentteja ennen dekodaausta. Tällä vähennetään monitie-etenemisestä aiheutuvan häipymisen vaikutusta.

Koherenssikaistanleveys kuvaa sitä taajuuskaistaa, jonka sisällä eri taajuiset signaalikomponentit korreloivat, eli kokevat samanlaisen häipymän. Koherenssikaistan sisällä häipyminen on tasaista, ja sen ulkopuolella taajuusselektiivistä. Taajuusdiversiteetin käytöllä tarkoitetaan informaation lähettämistä koherenssikaistanleveyttä laajemmalla kaistalla, esimerkiksi useammalla kanta-aallolla, jolloin vain osa signaalista kokee häipymisen samaan aikaan.

Dopplersiirtymä kuvaa signaalin keskitaajuuden siirtymistä lähettimen tai vastaanottimen liikkeen vuoksi. Dopplerhaje puolestaan kuvaa tietyn taajuisen kapeakaistaisen signaalin, esimerkiksi kanta-aallon, leviämistä taajuusalueessa monitie-etenemisen vuoksi. Dopplerhaje syntyy signaalin heijastuessa eri kulmissa liikkuvista kohteista, tai tullessa liikkuvaan vastaanottiin eri suunnista.

Koherenssiaika on se aika, jona kanavan siirto-ominaisuudet eivät merkittävästi muutu. Koherenssiaika vaikuttaa optimaalisen virheenkorjaus- ja tehonsäätöalgoritmin, limitysalgoritmin ja kehyksen pituuden valintaan.

Signaalin polarisaatiossa tapahtuu aina muutoksia sen heijastuessa tai sirotessa, minkä vuoksi vastaanottiin saapuu käytännössä signaalikomponentteja kaikilla polarisaatiokulmilla. Vastaanotinantenni ottaa vastaan energiaa kaikilla polarisaatiokulmilla. Esimerkiksi vertikaaliantenni ottaa vastaan jonkin verran myös horisontaalipolarisoitua energiaa.

YHTEYSVÄLIN MEDIAANIVAIMENNUS

Yleinen vaimennusmalli

Signaali vaimenee edetessään yleisesti kaavan

$$L = 10 \log \left[S_0 \left(\frac{R}{R_0} \right)^\alpha \right] \text{ mukaisesti.}$$

S_0 on signaalin taso etäisyydellä R_0 lähettimestä. Eksponentin α arvo riippuu etenemisolosuhteista, kuten maaston tai rakennusten tyypistä sekä toimintataajuudesta. Yleisen mallin heikkous on se, että sen parametrit S_0 , R_0 ja α pitäisi mitata tapauskohtaisesti. Tähän ei yleensä järjestelmän suunnitteluvaiheessa ole mahdollisuuksia, minkä vuoksi tarvitaan yleiskäyttöisiä vaimennusmalleja ennustamaan yhteydellä odotettavissa olevaa vaimennusta.

Vapaan tilan vaimennus

Mikäli aalto etenee tyhjässä, etenemisvaimennuksena L_R käytetään vapaan tilan vaimennusta, joka kuvaa aallon heikkenemistä sen levitessä etenemisen myötä yhä laajemmalle alueelle:

$$L_f = \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2,$$

jossa r on etäisyys metreinä. Desibeleinä vapaan tilan vaimennus saadaan kaavasta:

$$L_f = 32.4 + 20 \cdot \log(f_{\text{MHz}}) + 20 \cdot \log(R_{\text{km}})$$

jossa f_{MHz} on taajuus megahertseinä ja R_{km} etäisyys kilometreinä.

Vapaan tilan vaimennusta voidaan käyttää myös silloin kun aalto etenee näköyhteysreitillä siten, etteivät maastosta tai rakennuksista heijastuvat säteet vaikuta siihen. Tämä pätee silloin kun 1. Fresnellin vyöhyke on vapaa heijastavista esteistä.

Kokeellisia malleja

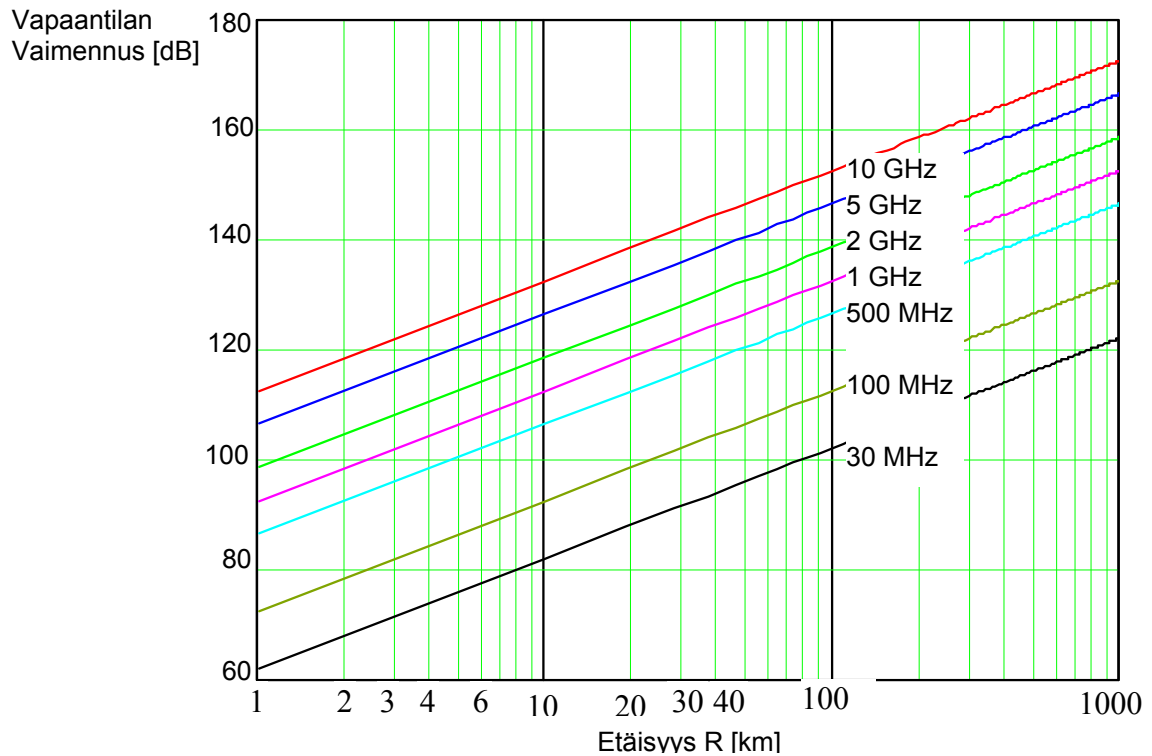
Seuraavassa esitettävät mallit pohjautuvat eri puolilla maailmaa tehtyihin mittauksiin. Niitä sovellettaessa on otettava huomioon, että mallit ennustavat vain mediaanivaimennuksen arvoa; puolet todellisista vaimennuksista ylittäisivät ja puolet alittaisivat sen. Myös ne olosuhteet, joilla mallien pohjalla olevat mittaukset on suoritettu, asettavat omat rajoituksensa mallien sovellettavuudelle. Mikäli esimerkiksi malli perustuu mittauksiin Coloradon aukeilla, sitä ei juurikaan voi soveltaa etenemiseen suomalaisessa metsämaastossa.

Plane Earth –malli on teoreettinen malli, jossa otetaan huomioon suoraan vastaanottimeen etenevä säde sekä maan tai meren pinnasta heijastuva säde. Lähettimen lähellä suoraan etenevän ja heijastuneen säteilyn aiheuttama interferenssi aiheuttavat signaalin äkillisiä häipymisiä, kuten luvussa *sähkömagneettinen spektri* esitettiin. Kun etäisyys lähettimeen kas-

vaa riittäväksi, vaimennus kasvaa 40 dB dekadia kohti. Tällä alueella yhteysvälivaimennus saadaan kaavasta:

$$L_{PE} = 120 + 40 \cdot \log(R_{km}) - 20 \cdot \log(h_{te}) - 20 \cdot \log(h_{re})$$

jossa R_{km} on etäisyys kilometreinä ja h_{te} sekä h_{re} lähetin- ja vastaanotinantennien teholliset korkeudet metreinä. Koska malli ei ota huomioon suoraan etenevän tai heijastuneen signaalin ylimääräistä vaimenemista tai muita heijastuksia, sitä käytetään harvoin.



Kuva 72: Vapaantilan vaimennus etäisyyden funktiona eri taajuuksilla

Ruotsin puolustusvoimien kehittämä **Blomqvist-Ladell**-malli on tarkoitettu ensisijaisesti metsämaastoon taajuusalueella 30-1000 MHz. Mallissa voidaan hyödyntää maastoprofiili- ja kasvillisuusinformaatiota. Malli perustuu ensisijaisesti vapaan tilan vaimennuksen ja Plane Earth-mallin yhdistelmään. Mallin etenemisvaimennus saadaan lisäämällä vapaan tilan vaimennukseen L_{spc} korjaustermi, jossa otetaan huomioon etenemistermi F_B ja maastosta aiheutuva diffraktiovaimennus F_D :

$$L_{B,L} = L_{spc} + \sqrt{F_B^2 + F_D^2}$$

Etenemistermi F_B on summa tasaisen maan etenemisvaimennuksesta F_{flat} ja korjaustermistä $Y(f,R)$:

$$F_B = F_{flat} + Y(f, R)$$

Tasaisen maan etenemisvaimennus saadaan kaavoista:

$$F_{\text{flat}} = 20 \log \left[2 \left| \sin \left[\sqrt{\frac{1}{2} (A_T + B) (A_R + B)} \right] \right| \right]$$

$$A_T = \frac{4 \pi h_t^2 f}{300 \cdot 100 \cdot R}, \quad A_R = \frac{4 \pi h_r^2 f}{300 \cdot 100 \cdot R} \quad \text{ja} \quad B = \frac{300 \cdot C_{\text{pol}}}{\pi \cdot 100 \cdot R (\epsilon_r - 1) f}$$

Vertikaalipolarisaatiolle $C_{\text{pol}} = \epsilon_r^2$ ja horisontaalipolarisaatiolle $C_{\text{pol}} = 1$. Yleensä kuivan maan suhteellinen permittiivisyys on noin $\epsilon_r = 10$.

Korjaustermi $Y(f, R)$ saadaan kaavasta:

$$Y(f, R) = \begin{cases} (-2.8 \cdot x(f, R)) & \text{if } x(f, R) < 0.53 \\ (6.7 + 10 \cdot \log(x(f, R)) - 20 \cdot x(f, R)) & \text{if } (x(f, R) \geq 0.53) \cdot (x(f, R) < 4.5) \end{cases}$$

jossa

$$x(f, R) = \left(\frac{2 \pi f}{300} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{4}{3} r_{\text{earth}} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot 100 \cdot R \quad \text{ja} \quad r_{\text{earth}} = 6371 \cdot 10^6$$

Blomqvist-Ladellin malli on varsin raskas käyttää järjestelmien ominaisuuksien arvioimiseen, mikä on vähentänyt sen käyttöä.

Eglin malli perustuu taajama-alueilla tehtyihin mittauksiin. Sen mukaan yhteyden mediaanivaimennus on:

$$L_E = \begin{cases} \left(85.9 + 20 \cdot \log(f_c) + 40 \cdot \log(R) - 20 \cdot \log(h_{te}) - 20 \cdot \log(h_{re}) \right) & \text{jos } h_{re} > 10 \\ \left(76.3 + 20 \cdot \log(f_c) + 40 \cdot \log(R) - 20 \cdot \log(h_{te}) - 10 \cdot \log(h_{re}) \right) & \text{muutoin} \end{cases}$$

jossa f_c on taajuus megahertseinä, R etäisyys kilometreinä ja h_{te} sekä h_{re} lähetyksen ja vastaanotinantennien teholliset korkeudet metreinä. Mallia voidaan soveltaa 1 – 80 km yhteydsvälillä, kun toimintataajuus on 30 ja 1000 MHz välissä.

Murphyn malli perustuu mittauksiin Coloradon alueilla. Sen mukaan yhteyden mediaanivaimennus on:

$$L_M = 99.2 + 0.016 \cdot \log(f_c) + 40 \cdot \log(R) - 20 \cdot \log(h_{te}) - 18.5 \cdot \log(h_{re})$$

Mallin mukaan vaimennus riippuu hyvin vähän toimintataajuudesta, joten sitä ei voida soveltaa esimerkiksi metsämaastoon tai taajama-alueelle, jossa vaimennus kasvaa voimakkaasti taajuuden myötä.

Okumara Hatan malli perustuu japanilaisen Okumuran 150 – 1500 MHz taajuuksilla teke-miin mittauksiin. Mallissa on kolme eri versiota käytettäväksi avoimessa maastossa, pien-asutusalueilla ja taajamissa. Taajama-alueella mediaanivaimennus on:

$$L_{H,u} = 69.55 + 26.16 \cdot \log(f_c) - 13.82 \cdot \log(h_{te}) - A + (44.9 - 6.55 \cdot \log(h_{te})) \cdot \log(R)$$

jossa korjaustermi $A = (1.1 \cdot \log(f_c) - 0.7) \cdot h_{re} - (1.56 \cdot \log(f_c) - 0.8)$,

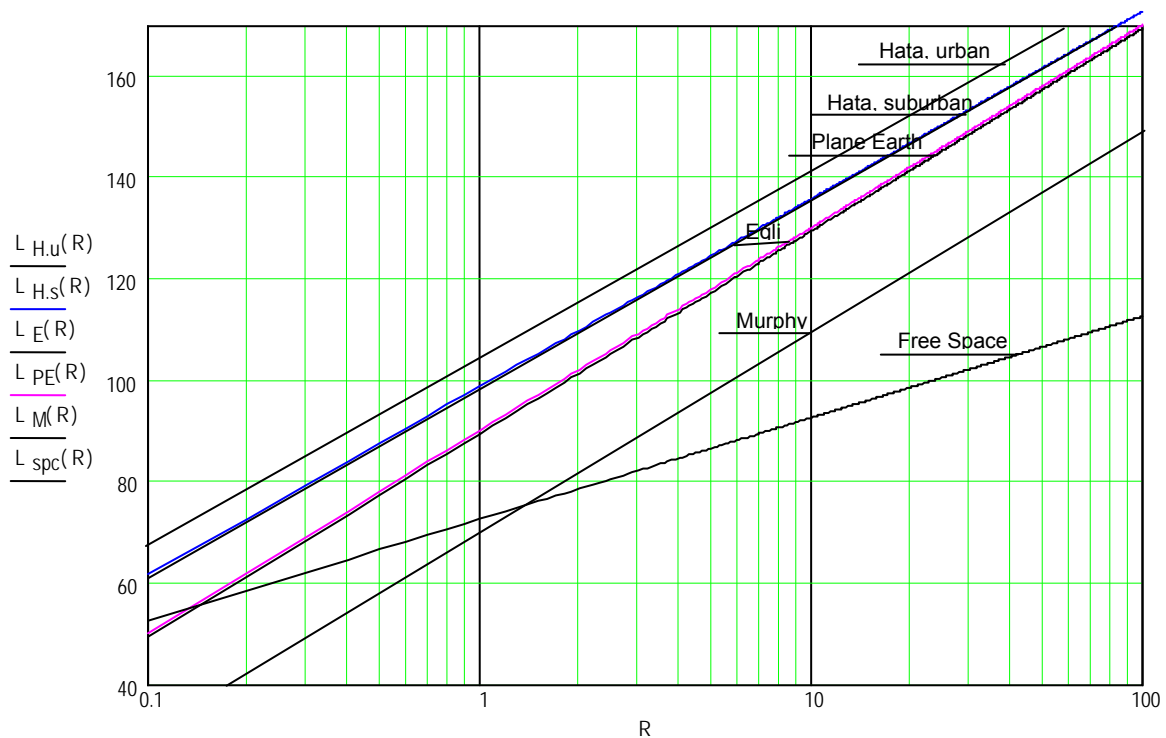
etäisyys R on 1 – 20 km, lähetinantennin korkeus R_{te} 30 – 1000 m ja vastaanotinantennin korkeus R_{re} on välillä 1 – 10 m. Pienasutusalueella vaimennus saadaan kaavasta:

$$L_{H,s} = L_{H,u} - 2 \cdot \log\left(\frac{f_c}{28}\right)^2 - 5.4$$

Avoimella alueella vaimennus on: $L_{H,o} = L_{H,u} - 4.78 \cdot \log(f_c)^2 - 18.33 \cdot \log(f_c) - 40.94$

Vaikka Hatan mallin pohjalla olevat mittaukset on alunperin tehty Tokiossa, mallia pidetään soveltuvana myös eurooppalaisiin kaupunkeihin.

Edellä kuvatut mallit pohjautuvat suureen määrään mittauksia ja ne on sovitettu tiettyjen alueiden olosuhteisiin. Niistä voidaan kuitenkin arvioida *tyypillisiä etenemisvaimennuksia* ja *suuruusluokkia*, mutta ne eivät riitä tapaus- ja tilannekohtaiseen etenemisvaimennuksen laskemiseen, mihin tarvitaan digitaalisen kartan päällä suoritettava tietokonesimulaatio. Kuvassa 73 on esitetty eri mallien antamia etenemisvaimennuksia 100 MHz taajuudelle (Hatan mallin alarajataajuus on 150 MHz) tilanteessa, jossa lähetinantenni on 16 metrin korkeudella ja vastaanotin 2 metrin korkeudessa. Kuvasta nähdään, että mallin valinta vaikuttaa olennaisesti arvioon mediaanivaimennuksen suuruudesta.



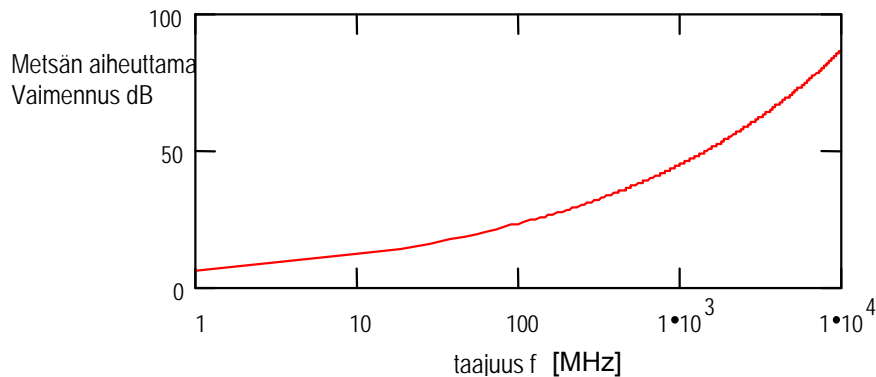
Kuva 73: Eri mediaanietenemismallien vertailu esimerkinomaisessa tilanteessa (f=100 MHz, ht=16 m ja hr=2 m).

Kasvillisuuden vaikutus

Mikäli lähetin- ja vastaanotinantennit ovat metsän sisällä, tiheän kuivan lehtimetsän vaimennus voidaan laskea kaavalla:

$$L_f = \begin{cases} \left[0.45 \cdot \left(\frac{f}{10^3} \right)^{0.284} \cdot d_f \right] \text{ jos } (d_f \leq 14) \\ \left[1.33 \cdot \left(\frac{f}{10^3} \right)^{0.284} \cdot d_f^{0.588} \right] \text{ jos } (d_f > 14) \cdot (d_f \leq 400) \\ \left[1.33 \cdot \left(\frac{f}{10^3} \right)^{0.284} \cdot 400^{0.588} \right] \text{ muutoin} \end{cases}$$

jossa d_f on metsäalueen syvyys metreinä ja f taajuus hertseinä.



Kuva 74: Esimerkki metsän vaimennuksen kasvusta taajuuden nousun myötä.

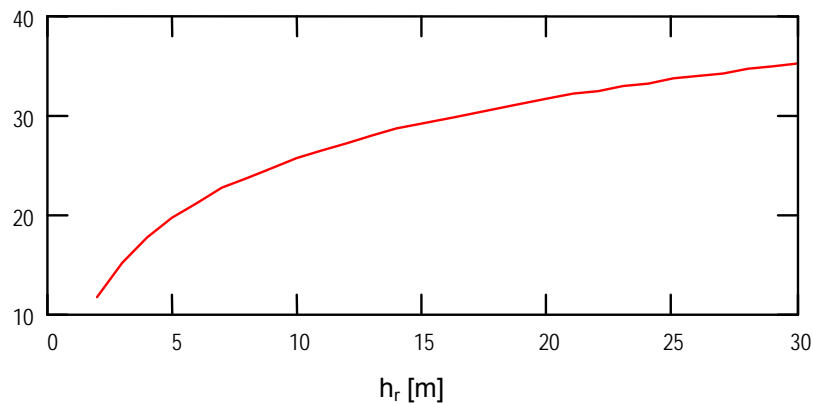
Edellä esitetty kaava ei ota huomioon eri metsätyyppejä, vuodenaikaa, metsän kosteutta yms. seikkoja, joilla on suuri merkitys kokonaisvaimennukselle. Esimerkiksi talvella lehtimetsän vaimennus on 3-5 dB pienempi kuin kesällä.

Kuvassa 74 on esitetty 400 metrin syvyisen metsän aiheuttama vaimennus taajuuden funktiona. Kuvasta käy ilmi voimakas vaimennuksen riippuvuus taajuudesta. Puiden latvuksissa tapahtuvan diffraktion aiheuttaman signaalikomponentin vuoksi vaimennus ei korkeilla taajuuksilla kasva 300-400 metrin jälkeen. Kun aalto etenee puiden latvuksissa, osa siitä taittuu alaspäin. Tällöin suurin vaimennustekijä on matka lähettimeltä puiden latvuksiin ja aallon edettyä vaakasuoraan latvustoa pitkin, puiden latvuksista vastaanottimeen. Edetessään vaakasuorassa puiden latvuksissa aalto vaimenee suhteellisen vähän.

Kun antennin korkeutta lisätään, vähenee aallon häviöllisessä metsässä kulkema matka, joka muodostaa merkittävimmän osan yhteysvälivaimennuksesta. Siten pienilläkin antennikorkeuden muutoksilla saattaa olla merkittävä vaikutus yhteyden laatuun. Tätä ilmiötä kutsutaan korkeusvahvistukseksi (height gain), joka vähentää yhteyden vaimennusta metsätyypistä riippuen joko logaritmisesti tai lineaarisesti. Korkeusvahvistus riippuu metsätyypistä sekä käytettävästä taajuudesta ja polarisaatiosta. Esimerkiksi Tewari on määrittänyt tiheän metsän korkeusvahvistukseksi pystypolarisaatiolla 900 MHz alueella:

$$G_h = -12 - 4 \cdot \log(f) + 20 \cdot \log(h_t \cdot h_r) \quad [\text{dB}]$$

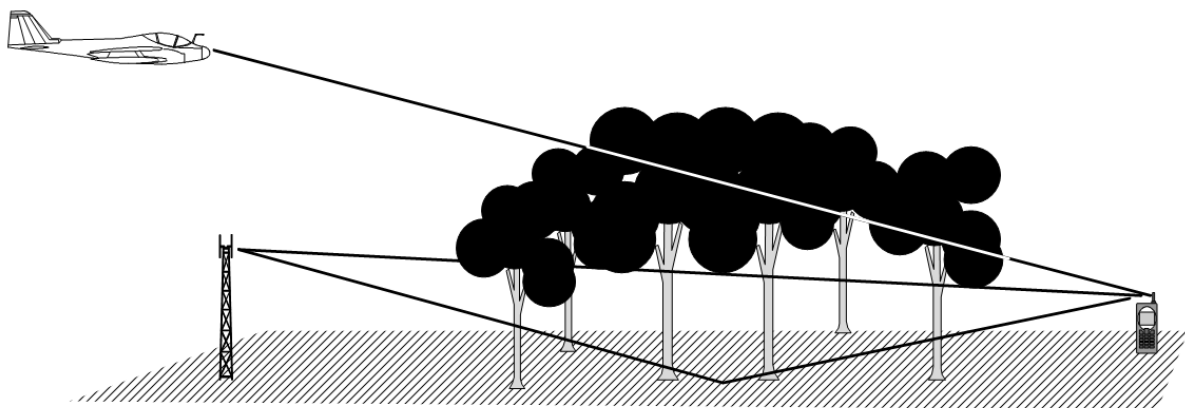
Matalilla taajuuksilla korkeusvahvistus on yleensä aina positiivinen, mutta korkeilla taajuuksilla se voi pienentyä antennin korkeuden mukana ja olla myös negatiivinen. Tämä johtuu siitä, että matalilla taajuuksilla vaimennus johtuu lähinnä puiden rungoista, mutta korkeilla taajuuksilla (UHF-alueen yläpäässä) lehvästöstä. Siten UHF-alueella vastaanotettavan signaalin taso voi jopa vähetä korotettaessa vastaanotinantennia lehvästön sisään. Matalilla taajuuksilla puiden runkojen dominoiva vaikutus näkyy myös siinä, että vertikaalisesti polarisoitunut säteily vaimenee horisontaalista enemmän edetessään tiheässä metsässä. Korkeammilla taajuuksilla polarisaatiotasojen erot vähenevät ja yli 1 GHz taajuuksilla metsä muodostaa käytännössä esteen signaalin etenemiselle kummallakin polarisaatiolla.



Kuva 75: Esimerkki vastaanotinantennin korkeusvahvistuksesta 900 MHz alueella.

Lisävaimennus

Etenemisvaimennukseen vaikuttavat edellä kuvattujen tekijöiden lisäksi esimerkiksi lisävaimennus, joka syntyy aallon tunkeutumisesta rakennukseen tai rakennuksen sisällä seinien lävitse sekä lähiesteet, eli vastaanottimen lähellä olevat isot rakennukset tai maastoesteet.



Kuva 76 UHF-taajuuksista alkaen lehvästö vaimentaa puiden runkoja enemmän, minkä vuoksi yhteysvälivaimennus voi jopa kasvaa vastaanotinantennin korkeutta lisättäessä.

Sään vaikutus

Sateen ja sumun vaikutus radioaaltojen etenemiseen riippuu aallon taajuudesta. Kuten luvussa *Sähkömagneettinen spektri* esitettiin, UHF-alueella ja sitä pienemmillä taajuuksilla sää ei juurikaan vaikuta etenemisvaimennukseen. Yli gigahertsin luokkaa olevilla yhteyksillä **sade** on huomioitava pitkällä viestiyhteyksillä. Esimerkiksi 16 mm/h rankkasade aiheuttaa 2 GHz taajuudella noin 0,3 dB vaimennuksen kilometrillä. Yhtymän viestijärjestelmien maksimietäisyyksillä 20-30 km vaimennus olisi 6-9 dB:tä. **Sumun vaikutus** on merkittävä vasta reilusti yli kymmenen gigahertsin taajuuksilla. Esimerkiksi 94 GHz:n alueella sankka sumu (näkyvyys satakunta metriä) aiheuttaa noin 1 dB vaimennuksen kilometrillä, mutta 10 GHz:lla vaimennus on vain 0,02 dB/km. **Märkä lumi** ja **räntä** vaimentavat jopa enemmän kuin vastaavan vesimäärän mukainen sade, mutta niidenkin vaikutus alle 2 GHz yhteyksillä on olematon. **Kuiva lumi** ja **jää** eivät vaimenna yhteyttä millään viestijärjestelmissä käytettävillä etäisyyksillä ja taajuuksilla – laserlinkkejä lukuunottamatta.

TAHDISTUS

Vastaanottimen on kyettävä tahdistumaan, eli synkronoitumaan, lähettimeltä tulevaan informaatiivirtaan, jotta se kykenisi tulkitsemaan vastaanottamaansa informaatiota oikein. Kaikkien vastaanotinten on kyettävä tahdistumaan tulevaan moduloituun bittivirtaan siten, että tulkinta vastaanotettavasta signaalista osataan tehdä oikein. Mikäli siirrettävä informaatio muodostuu monibittisestä koodisanasta (esimerkiksi puhe koodattuna 8 bittiin PCM-järjestelmissä tai 8-bittinen data-alkio), on vastaanottimen tahdistuttava oikein näihinkin. Siirrettävät tiedot on yleensä ryhmitelty siirtokehyksiin, joiden alku- ja loppukohdat on varustettu kehyslukitusmerkeillä ja joiden sisällöstä osa on kehysten hallintaan liittyvää informaatiota varsinaisen siirtodatan muodostaessa lopun kehysten sisällöstä. Vastaanottimen on tahdistuttava myös siirtokehyksiin, jotta se kykenisi tulkitsemaan oikein kehystettyä informaatiota. Mikäli järjestelmässä on lisäksi salauslaite, on senkin tahdistuttava siirrettävään bittivirtaan, jotta se kykenisi aloittamaan tehdyn salauksen purkamisen oikeasta kohdasta.

Eritasoista synkronointia kutsutaan synkronointihierarkiaksi. Kullakin hierarkiatasolla vastaanotin on tahdistettava vastaavaan lähettimeen, esimerkiksi:

1. radiovastaanottimen tahdistuminen
 - 1.1 hajaspektrivastaanottimessa taajuushypintä-, aika- tai suorasekvenssikoodisynkronointi
 - 1.2 kantoaalto- ja alikantoaalsosynkronointi
 - 1.3 bitti- (symboli)synkronointi ilmaisimella
 - 1.4 koodisanasynkronointi
 - 1.5 kehysynkronointi
2. salauksen tahdistuminen
3. telekeskuksen merkinantokehysten tahdistuminen

Tarkastellaan seuraavassa esimerkkiä, jossa L-bittinen siirtokehys varustetaan n -bittisellä kehystyskuviolla, kehyslukitusmerkillä. Vastaanotin tarkkailee bittivirtaa ja tunnistaa kehysten alkamisen ja päättymisen kehyslukitusmerkistä. Mikäli siirretyn bitin virhetodennäköisyys on p , niin todennäköisyys, että saapuvassa kehystyskuviossa on virhe, on:

$$P_f = 1 - (1 - p)^n, \text{ jos } p \ll 1, \text{ niin } P_f \approx n \cdot p$$

Mikäli vastaanotin odottaa k virheellistä kehyslukitusmerkkiä ennen kuin päättää kehys-synkronoinnin menetetyksi, niin synkronoinnin menetystodennäköisyys on:

$$P_{sl} = P_f^k, \text{ ja jos } p \ll 1, \text{ niin } P_{sl} \approx (n \cdot p)^k$$

Jos yhteydellä siirretään F kehystä sekunnissa, niin synkronointi menetetään keskimäärin

$$T_{sl} = \frac{1}{P_{sl} \cdot F} \text{ sekunnin välein.}$$

Synkronoinnin menettämisen jälkeen vastaanotin alkaa etsiä kehyslukitusmerkkiä vastaanotettavasta bittivirrasta. Havaitessaan kehyslukitusmerkin se ei voi olla varma siitä, onko kyseessä bittivirrassa satunnaisesti esiintynyt kehyslukitusmerkin kanssa samanlainen bittikuvio vai todellinen kehyslukitusmerkki. Tämän vuoksi vastaanottimen on odotettava useampia samassa kohtaa bittivirtaa olevia kehyslukitusmerkkejä ennen kuin se voi olla varma siitä, että kyseessä on oikea lukitusmerkki. Jos vastaanotin odottaa m perättäistä lukitusmerkkiä ennen kuin päättää synkronoinnin oikeaksi, niin pisimmillään synkronoinnin saavuttaminen kestää

$$T_a = m + 1 + h \text{ sekuntia, jossa } h = \frac{L}{2^n - 1}$$

on väärin kehyslukitusten määrä lukitusprosessin aikana. Mikäli siirtojärjestelmässä on huolehdittu siitä, ettei kehyslukitusmerkkiä esiinny satunnaisesti bittivirrassa, on väärin kehyslukitusten määrä lähes nolla. Tämä pätee esimerkiksi HDLC-kehyksiin, joissa kehyslukitusmerkki on 01111110. Mikäli informaatiokentässä esiintyy viisi ykköstä peräkkäin, lisätään lähetettävään bittivirtaan nolla. Vastaavasti vastaanotin poistaa informaatiokentässä nollan viiden ykkösen jälkeen. Siten kehyslukitusmerkki voi esiintyä vain kehyksen alussa ja lopussa.

Jos vastaanotin odottaa k perättäistä virheellistä kehyslukitusmerkkiä ennen kuin päättää synkronoinnin menetetyksi, niin pahimmassa tapauksessa vastaanottimelta kuluu

$$T = k + m + 1 + \frac{L}{2^n - 1}$$

kehystä ennen kuin se on todennettu kehyslukituksen menetetyksi ja onnistunut lukittumaan uudelleen vastaanottamaansa bittivirtaan.

KOODAUS JA VIRHEENKORJAUS

Perusteet

Limityksellä tarkoitetaan siirrettävän informaation jakamista aikatasossa siten, että alkuperäisessä informaatiovirrassa peräkkäin olevat bitit hajautetaan ennen niiden lähettämistä. Menetelmällä voidaan torjua lyhytkestoisen häipymisen ja purskemuotoisten häiriöiden sekä pulssihäirinnän vaikutusta, sillä limitys jakaa häirinnän vaikutuksen tasaisesti koko alkuperäiseen informaatiovirtaan, jolloin virheet ovat helpommin havaittavissa ja korjattavissa. Mitä lyhyempää limitystä käytetään, sitä reaaliaikaisempi tiedonsiirto voidaan toteuttaa, mutta toisaalta signaalia ei saada suojattua niin hyvin kuin levitettäessä se pidemmälle ajanjaksolle. Käytettäessä pitkää limitystä, joudutaan lähetettävä signaali koostamaan pitkältä ajanjaksolta, jolloin signaalin reaaliaikaisuus menetetään. Tällainen siirto ei sovellu reaaliaikaisen puheen tai datan siirtämiseen.

Virheenkorjaus perustuu siihen, että siirrettävään dataan lisätään redundanttia informaatiota, jota käytetään virheenkorjaukseen. Tällöin joko yhteyden nettosiirtonopeus laskee¹⁰ tai bruttosiirtonopeutta on nostettava. *Koodisuhde* r (code rate) määrittellään sanoman informaatiota sisältävien databittien k suhteeksi siirtolohkon kokonaisbittimäärään:

$$r = \frac{k}{n}, \text{ jossa } k \text{ on databittien lukumäärä ja } n \text{ lohkon kokonaisbittimäärä.}$$

Virheenkorjauskoodin tehokkuus η puolestaan määrittellään koodin sisältämien databittien siirtonopeuden R_d suhteena kokonaissiirtonopeuteen R_b :

$$\eta = \frac{R_d}{R_b}, \text{ jossa } R_d \text{ on hyötydatan siirtonopeus ja } R_b \text{ on kokonaissiirtonopeus}$$

Tällöin koodin redundanssi on

$$\rho = 1 - \eta$$

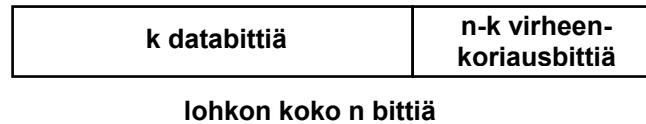
Mitä enemmän koodi sisältää redundanssia, sitä useampia virheitä koodilla on mahdollista korjata, mutta toisaalta sitä pienemmäksi hyötyinformaation siirtonopeus jää.

FEC-koodaus

Virheenkorjausmenetelmät voidaan jakaa FEC- ja ARQ-menetelmiin, joista ensin mainittu (Forward Error Correction) perustuu virheellisten bittien havaitsemiseen ja korjaamiseen siirtoprosessia keskeyttämättä. ARQ-menetelmissä (Automatic ReQuest to Repeat) vastaanotin havaitsee virheellisen siirtokehityksen ja pyytää lähettimeltä uudelleenlähetystä. FEC-koodit jaetaan jaksollisiin lohkokoodeihin ja konvoluutiokodeihin.

¹⁰ Vaikka nettosiirtonopeus laskee, siirron laatu paranee, sillä myös virheellisten bittien määrä laskee.

Jaksollisissa lohkokodeissa (linear block code) siirrettävä data on ryhmitelty kehyksiin, joihin lisätään tiettyjen algoritmien mukaan laskettu virheenkorjausinformaatio. Jos databittien lukumäärää merkitään k :lla ja lohkon koko on n , niin virheenkorjaukseen on käytettävissä $n-k$ bittiä. Lineaarinen lohkokoodi määritellään luvuilla n ja k sekä tarkistuskoodisanan muodostavalla matriisilla tai polynomilla.



Koodin tunnistamien ja korjattavissa olevien erilaisten bittivirhekombinaatioiden määrän määrittäminen on hankala matemaattinen ongelma. Yläraja FEC-dekooderin tekemille virheellisille tulkinnoille voidaan kuitenkin laskea helposti kaavalla:

$$P_d \leq \left[1 - (1 - P_b)^n \right] \cdot 2^{-(n-k)},$$

jossa P_b on yksittäisen bitin virhetodennäköisyys.

Mikäli FEC-koodi kykenee korjaamaan t virhettä, virheenkorjauksen jälkeen bittivirhesuhde on:

$$P_d = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=t+1}^n j \cdot C(n,j) \cdot P_b^j \cdot (1 - P_b)^{n-j}, \text{ jossa } C(n,j) = \frac{n!}{j! \cdot (n-j)!}$$

Edellä oleva kaava on hieman työläs käyttää, joten sitä voidaan approksimoida kaavalla:

$$P_{fec} = P_b - P_b \cdot (1 - P_b)^{n-1}$$

Esimerkkeinä jaksollisista lohkokodeista voidaan mainita Hamming-koodit, joissa koodin pituus ja databittien määrä noudattaa yhtälöä

$$(n,k) = (2^m - 1, 2^m - 1 - m), \text{ jossa } m = 1, 2, 3, \dots$$

Konvoluutiokoodi kuvataan kolmella kokonaisluvulla: n , k ja K . Suhde n/k on sama koodisuhde kuin edellä käsitellyissä lohkokodeissa, vaikka n ei määrittelekään lohkon kokoa. K määrittelee koodin redundanttisuuden. Konvoluutiokoodien olennaisin ero lohkokodeihin on siinä ettei niillä ole mitään tiettyä lohkoa ja siinä, että ne ovat muistillisia koodeja. Tällä tarkoitetaan sitä, että dekoodattu informaatio riippuu paitsi viimeisestä k databitistä, myös aiemmista $K-1$ dekoodatusta bitistä. Koodi perustuu siihen, että vain tietyn tyyppiset muutokset perättäisissä biteissä ovat mahdollisia. Dekoodausprosessissa lasketaan, mikä on todennäköisin lähetetty koodijono vastaanotetun datan perusteella (maximum likelihood). Esimerkkejä konvoluutiokodeista ovat Trellis- ja Viterbi-koodit. Viterbin kehittämä dekoodausalgoritmi toimii *maximum likelihood* -periaatteella ja on siten optimaalinen.

FEC:ä käytetään yleensä alimpana hierarkiatasolla korjaamassa limityksen hajauttamia erillisiä siirtovirheitä. FEC:n ja limityksen yhteiskäyttö mitätöi käytännössä pulssihäirinnällä saavutettavissa olevan hyödyn.

ARQ-protokolla

FEC:n etuna on se, että se tarjoaa vakiosiirtokapasiteetin, joka ei riipu yhteyden laadusta (siirtovirheiden määrästä). Sen heikkoudeksi muodostuu koodin rajallisuus: osa siirtovirheistä pääsee havaitsematta ja korjaamatta läpi. FEC-koodien virheenkorjauskyky on usein riittävä esimerkiksi puheensirtoon, muttei sitä huonommin virheitä sietävään datansiirtoon. Tämän vuoksi ylemmillä hierarkiatasoilla käytetään tarvittaessa ARQ-menetelmiä, joissa informaatio on ryhmitelty laajempiin kehyksiin. Kehykseen lisätään datakentän perusteella laskettu tarkistuskenttä. Vastaanotin suorittaa saman tarkistuslaskun datakentän perusteella ja vertaa saamaansa tulosta kehiksen mukana tulleeseen tarkistuskenttään. Jos näissä on eroa, vastaanotin pyytää koko kehiksen lähettämistä uudelleen. Lähetyspäässä kehykset on numeroitu, joten vastaanotin voi pyytää lähetintä aloittamaan lähetykset uudelleen haluamastaan kehiksestä (go-back-n) tai voi yksilöidä, mitkä kehykset se haluaa uudelleen (selective repeat).

ARQ-protokolla ei takaa täysin virheetöntä yhteyttä, sillä osa virheistä voi jäädä kokonaan havaitsematta. Todennäköisyys, että ARQ-kehiksessä on havaitsematon virhe on maksimissaan

$$P_e = \left[1 - (1 - P_b)^n \right] \cdot 2^{-(n-k)}$$

Esimerkiksi, jos databittien lukumäärä on $k = 1024$, lohkon koko $n = 1030$ bittiä ja kanavan bittivirhetodennäköisyys on $P_b = 10^{-3}$, niin kehiksessä on havaitsematon virhe todennäköisyydellä 10^{-5} . Koska kuitenkin myös uudelleen lähetettävässä kehiksessä saattaa olla virhe, on kokonaisvirhetodennäköisyys suurempi kuin edellä laskettu. Jos todennäköisyys, että siirrettävässä kehiksessä *ei ole* virhettä on:

$$P_c = (1 - P_b)^n$$

niin todennäköisyys, että ARQ-protokolla tekee virheen on:

$$P_{\text{arq}} = \frac{P_e}{P_e + P_c}$$

Edellä käsitellyssä esimerkissä virhetodennäköisyys nousee arvoon $2,8 \cdot 10^{-5}$.

Vaikka ARQ ei kykenekään tarjoamaan täysi varmaa virheenkorjausta, se takaa kuitenkin tietyn – laskettavissa oleva – virhesuhteen, joka ei riipu siirtoyhteyden laadusta niin suuressa määrin kuin FEC-menetelmät. ARQ:n heikkoutena on kuitenkin se, ettei sillä kyetä takaamaan tiettyä siirtokapasiteettia, koska uudelleenlähetyksen määrä riippuu siirtovirheiden esiintymisestä kehyksissä. Valintaisen (selective repeat) ARQ-protokollan tehokkuus saadaan kaavasta:

$$\eta = \frac{k}{n} \cdot (1 - P_b)^n$$

Kun edellä mainitussa esimerkissä bittivirhesuhde on $P_b = 0,001$, on todennäköisyys sille, ettei bitti ole virheellinen $(1 - P_b) = 0,999$ ja todennäköisyys, ettei yksikään $n = 1040$ bitistä ole virheellisiä on $0,999^n = 0,353$. Kertomalla tämä koodin databittien suhteella kokonaisbittimäärään $(k/n = 0,985)$ saadaan valinnaisen ARQ:n tehokkuudeksi $0,353 \cdot 0,985 = 0,348$.

Virheenkoodausmenetelmän valinta

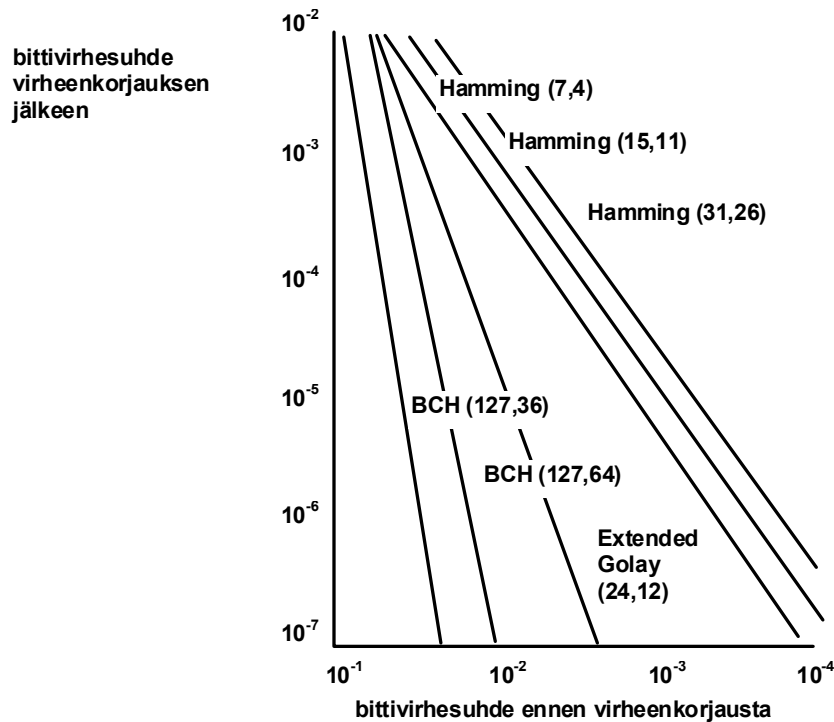
Yleiskäyttöistä optimaalista virheenkorjausmenetelmää ei ole olemassakaan, vaan kulloiseenkin tilanteeseen ja järjestelmään paras mahdollinen menetelmä riippuu muun muassa seuraavista seikoista:

- Siirtokanavan ominaisuuksista, kuten kohinan tilastoluonteesta sekä satunnaisten ja purskemuotoisten häiriöiden ja häirinnän määrästä ja ominaisuuksista.
- Järjestelmältä vaadittavasta nettosiirtonopeudesta, joka määrää virheenkorjaukseen käytettävissä olevien bittien määrän ja siten pienimmän koodisuhteen.
- Suurimmasta sallitusta virheenkorjauksen jälkeisestä jäännösvirhesuhteesta, josta huolehtiminen jää järjestelmän ylempien hierarkiakerrosten murheeksi.
- Suurimmasta sallitusta koodaus- ja dekodeausviipeestä sekä suurimmasta sallitusta viipeen vaihtelusta.
- Jos järjestelmän on kyettävä tiettyyn nettosiirtonopeuteen, ei ARQ:ta voida käyttää.
- Jos järjestelmän on taattava tietty maksimi bittivirhesuhteelle, on käytettävä ARQ:ta FEC:n sijaan tai sen lisäksi.
- Paluukanavan olemassaolo ja ominaisuudet määräävät ARQ-protokollan käytettävyyden sekä sen voidaanko yhteydellä käyttää adaptiivista FEC:ä.
- Menetelmän edellyttämästä ohjelmiston ja laitteiston monimutkaisuudesta. Nykyisin tämä kulminoituu lähinnä hinta- ja luotettavuustekijöihin, ei niinkään painoon, kokoon tai tehonkulutukseen.
- Menetelmän hinnasta; jotkut virheenkorjausmenetelmistä on patentoitu ja omien parempien menetelmien kehittäminen vaatii huomattavaa tutkimus- ja tuotekehityspanosta.

Konvoluutiokoodit soveltuvat kanavalle, jossa kohina on satunnaista ja jossa ei ole purskemuotoisia häiriöitä ja sovelluksiin joissa dekodeatusta informaatiosta voidaan sallia virheitä, kuten puheensierrossa. Niiden etuna on se, että dekodeatun informaation laatu laskee tasaisesti siirtovirheiden määrän kasvaessa ilman äkillistä laadun romahtamista. Konvoluutiokoodien pieni koodisuhde estää niiden käytön sovelluksissa, joissa nettosiirtonopeus on tärkeä kriteeri. Lohkokoodeja käytetään usein silloin kun dekodeatusta datassa ei saisi esiintyä virheitä tai silloin kun koodin on oltava tehokas eikä mahdollisuuksia ylimääräisten bittien siirtämiseen ole. Mikäli redundanssia on vain vähän käytettävissä, käytetään usein Reed-Salomon-koodeja. Lohkokoodien ongelmana on laadun romahtaminen huonoilla yhteyksillä.

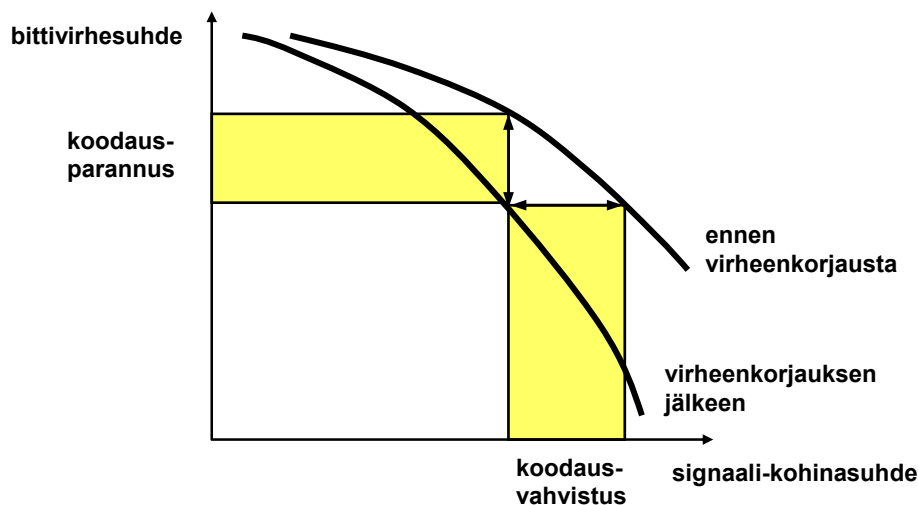
Taktisissa viestijärjestelmissä käytetään usein päällekkäin erilaisia koodeja, kuten:

- Mikäli käytettävissä on riittävästi redundanssia, sisempänä koodina konvoluutiokoodi ja ulompana Reed-Salomon-lohkokoodi. Lohkokoodin tehtävänä on vähentää mahdollisesti hyvinkin heikkolaatuisen kanavan siirtovirheiden määrää RS-koodin sietämälle tasolle. RS-koodi puolestaan kykenee korjaamaan purskemuotoisten häiriöiden aiheuttamat siirtovirheet.
- Mikäli käytettävissä ei ole juurikaan redundanssia, käytetään pelkkää RS-koodia.



Kuva 77: Esimerkki erilaisten lohkokoodien vaikutuksesta bittivirhesuhteeseen.

Virheenkorjauksen käyttö mahdollistaa saman bittivirhesuhteen saavuttamisen pienemmällä symbolienergia-kohinatehoitehyysuhteella verrattuna tilanteeseen, jossa virheenkorjausta ei käytetä. Tätä tyypillisesti useiden desibeleiden etua voidaan käyttää joko pidemmän yhteysvälin toteuttamiseen tai häirintämarginaalin hankkimiseen suojaksi tahallista häirintää tai tahattomia häiriöitä vastaan. Tällöin puhutaan *koodausvahvistuksesta*, joka voidaan ottaa linkkibudjetissa huomioon päättämällä ensin haluttu virhesuhde ja laskemalla tai katsomalla taulukoista käytetyn modulaatiomenetelmän kyseisellä virhesuhdetalossa edellyttämä normalisoitu signaalikohinasuhde ja vähentämällä tästä virheenkorjauksen koodausvahvistus. Virheenkorjausta voidaan käyttää myös nettovirhesuhteen parantamiseen häiriöllisillä yhteyksillä. Tällöin tavoitteena on saavuttaa *koodausparannus* tietyllä signaalikohinasuhteella.



Kuva 78: Virheenkorjausta voidaan käyttää sekä bittivirheiden vähentämiseen tietyllä signaali-kohinasuhteella (koodausparannus), tai pienemmän signaali-kohinasuhteen mahdollistamiseen samalla bittivirhesuhteella (koodausvahvistus).

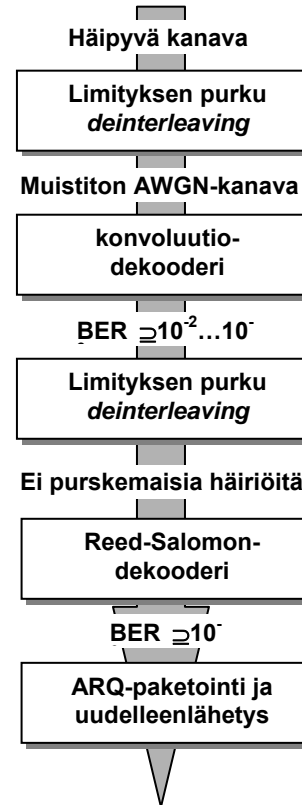
Virheenhallintaa ei saa jättää pelkän siirtoprosessin virheenkorjauksen murheeksi, vaan myös tietoliikennealustaa käyttävien sovellusten siirtoyhteyserroksen on kyettävä sovittamaan kulloiseenkin siirtoyhteyden tilanteeseen. Lisäksi istuntokerroksen on hallittava dialogin keskeytyminen sekä toipuminen. Myös sovellusten tulisi kyetä mitoittamaan tiedon-siirtotarpeensa siirtoyhteyden laadun mukaan.

Esimerkki:

Radiokanavan bittivirhesuhde on demodulaattorilla häipymisolosuhteissa luokkaa $10^{-1} \dots 10^{-2}$. Demoduloinnin jälkeen limitys puretaan (deinterleaving), millä häipyvä kanava muutetaan satunnaiseksi AWGN-kanavaksi (Average White Gaussian Noise).

Tämän jälkeen puretaan konvoluutiokoodi, jolla bittivirhesuhde saadaan putoamaan luokkaan $10^{-2} \dots 10^{-3}$. Konvoluutidekoodekissa saattaa kuitenkin ilmaantua koodauksen luonteesta johtuvia häiriöryöppyjä. Näiden vaikutus tasataan uudella limityksen purulla.

Saatu bittivirta, jossa virheet esiintyvät tasaisemmin, syötetään Reed-Salomon-dekooderiin, josta saatava bittivirhesuhde on luokkaa 10^{-6} . Tämä riittää useille sovelluksille, mutta mikäli halutaan vielä parempaa bittivirhesuhdetta, voidaan käyttää toistoprotokollaa, esimerkiksi valikoivaa ARQ:ta.



HAJASPEKTRITEKNIIKAT

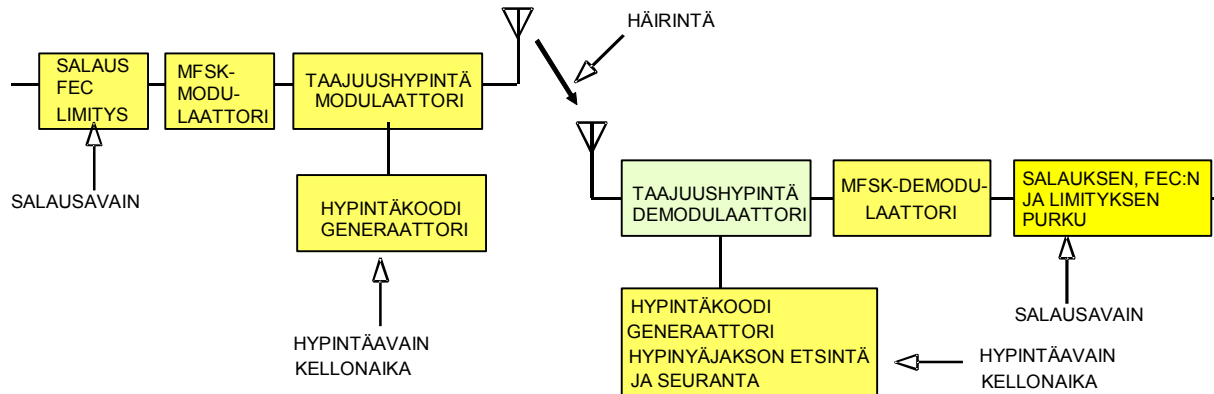
Hajaspektritekniikoiden tavoitteena on lisätä järjestelmien häiriöiden ja häirinnän kestokykyä sekä vaikeuttaa vihollisen suorittamaa signaalitiedustelua ja lähettimen paikantamista. Hajaspektrimenetelmissä signaali levitetään aika- tai taajuustasossa ennen lähettämistä, ja kootaan vastaanottimessa ennen ilmaisua. Signaali voidaan hajottaa taajuus- ja aikatasossa vaihtelemalla kanta-aallon taajuutta (taajuushypintä), levittämällä koko lähete laajalle siirtokaistalle (suorasekvenssimenetelmä) tai hajottamalla signaali ajallisesti (aikahypintä). Hajaspektri-järjestelmissä voidaan myös käyttää eri menetelmistä koostettuja hybridimenetelmiä, esimerkiksi yhdistettyä taajuus- ja suorasekvenssimenetelmää.

Taajuushypintä

Taajuushypintäjärjestelmän lähetin koostuu virheenkorjaus-, salaus- ja limitysyksiköistä, yleensä kaksi tai useampitasoisesta FSK-modulaattorista sekä taajuushypintämodulaattorista ja hypintäkoodigeneraattorista. Vastaanotin sisältää taajuushypintädemodulaattorin sekä hypintäkoodigeneraattorin sekä hyppajakson etsintä ja seurantapiirin, FSK-demodulaattorin ja salauksen, virheenkorjauksen sekä limityksen purkamisen.

FEC-virheenkorjaimen sekä bittilimityksen ominaisuudet rajautuvat pienimmän koodinopeuden ja suurimman sallitun prosessointiviiveen perusteella. Synkroninen salaamislaitte edellyt-

tää vastaanottimen ja lähettimen tahdistamista ennen varsinaisen siirtoyhteyden muodostamista, mikä lisää yhteyden muodostamisviivettä. Toisaalta synkroninen salauslaite ei levitä bittivirheitä niin kuin itsesykronoituva salausjärjestelmä.



Kuva 79: Taajuushypintäjärjestelmän periaatteellinen lohkokkaavio.

Hyppivätaajuiset kenttäradiot käyttävät yleensä epäkoherenttia binääristä tai M-tasoista FSK-modulaatiota (BFSK, MFSK), koska signaalin vaihe muuttuu hypy hypyltä ja signaalin taso vaihtelee voimakkaasti. Tällöin koherentin ilmaisun hyväksikäyttö on vaikeata.

Taajuushypintää kutsutaan hitaaksi, jos kullakin taajuudella lähetetään useita symboleita ja nopeana, jos yhtä symbolia kohti käytetään useita eri taajuuksia. Koska informaation siirto on keskeytettävä taajuuden vaihdon ja stablitoitumisen ajaksi, joudutaan yhteydellä käyttämään nettosiirtonopeutta suurempaa siirtonopeutta. Tämän vuoksi syntetisaattorin tulee siirtyä mahdollisimman nopeasti uudelle taajuudelle sekä stabiloitua mahdollisimman nopeasti taajuuden muuttamisen jälkeen. Taajuushypintämodulaattorissa voidaan käyttää epäsuoraa tai suoraa taajuussynteesiä. Jälkimmäisessä menetelmässä lähetettävä aaltomuoto on tallennettuna syntetisaattorin digitaaliseen muistiin, josta se siirretään halutulla taajuudella digitaali-analogiamuuntimeen (DAC). Menetelmän etuna on nopeus; uutta taajuutta voidaan alkaa generoida välittömästi eikä tarvitse odottaa vaihelukittujen silmukoiden tai muiden perinteisten analogisten piirielinten asettumista ennen informaationsymbolien lähettämistä.

Aloittaessaan vastaanoton vastaanotin ei tiedä, missä kohtaa hypintäkoodia lähete on, eli millä taajuudella se tietyllä ajanhetkellä on ja mikä on seuraava lähetystaajuus. Karkean käsityksen se saa kellonajasta, mutta lähettimen ja vastaanottimen satunnainen etäisyys edellyttää sitä, että vastaanotin tahdistetaan ennen siirron alkua lähettimen hyppysekvenssiin. Yleensä tämä tehdään synkronoimalla koko verkko johonkin johtoasemana toimivaan lähettimeen. Synkronoinnin aikana lähetetään erityistä synkronointikuviota joko normaalilla, tai normaalia hitaammalla hypintänopeudella.

Taajuushypintäjärjestelmää voidaan häiritä kapea- tai laajakaistaisella signaalilla, joka voi olla esimerkiksi jatkuvaa tai pulssimaista kohinaa. Häirintälähetin voi myös pyyhkiä yli koko hypintäkaistan, jolloin häirintä näkyy pulssimaisena kunkin kanavan kohdalla. Taajuushyppi-vän BFSK-järjestelmän bittivirhetodennäköisyys voidaan määrittellä kaavalla:

$$P_b = \frac{1-\rho}{2} \cdot e^{-\frac{E_b}{2 \cdot N_0}} + \frac{\rho}{2} \cdot e^{-\frac{E_b}{2 \cdot N_0 + \frac{J_0}{\rho}}}$$

jossa ρ on häirintäkaistan suhde hypintäkaistaan¹¹, E_b on signaalienergia (signaaliteho kerrottuna symbolin kestolla; $E_b = S \cdot T_b$), N_o on vastaanottimen kohinatehotiheys ($N_o = k \cdot T_{\text{sys}}$) ja J_o on häirintätehotiheys. Häirintätehotiheys riippuu häirintätehosta J ja häiritävän kaistan leveydestä. Mikäli häirintälähetin häiritsee koko hypintäkaistaa B_h , on häirintätehotiheys: $J_o = J/B_h$. Jos signaali-kohinasuhde on suuri ($E_b \gg N_o$), kaava supistuu muotoon:

$$P_b = \frac{\rho}{2} \cdot e^{-\frac{E_b \rho}{2 J_o}}$$

Viestijärjestelmän kannattaa pyrkiä hyödyntämään mahdollisimman laajaa taajuuskaistaa hypinnässä, koska tällöin järjestelmä pakottaa häirintälähtetimen jakamaan tehonsa hetkellistä siirtokaistaa (eli kanavan kaistanleveyttä B_{ch}) laajemmalle taajuusalueelle. Jos hypintäkaistaa merkitään B_h :lla, niin taajuushypinnällä saavutetaan häirintälähetintä vastaan etu $G_p = B_h/B_{ch}$ verrattuna kiinteätaajuiseen läheteeseen.

Edellisestä yhtälöstä voidaan laskea optimaalinen pulssisuhde differentioimalla yhtälö, jolloin saadaan:

$$\rho_o = \begin{cases} \frac{2}{\frac{E_b}{J_o}} & \text{jos } \frac{E_b}{J_o} > 2 \\ 1 & \text{muutoin} \end{cases}$$

Häirintälähtetimen kannattaa siis häiritä koko hypintäkaistaa vain mikäli hyötyläheteen signaalienergian suhde häirintätehotiheyteen vastaanottimella on vähintään kaksinkertainen. Mikäli hyötylähete on tätä suurempi, kannattaa siirtyä osakaistahäirintään, jolloin häirintä kohdistuu harvempiin bitteihin mutta tehoa niihin paremmin. Optimi häirintäpulsstin pituus on sellainen, jolla toisaalta taataan juuri ja juuri riittävä energia kuhunkin häiritävään symboliin ja jolla toisaalta maksimoidaan häiritävien symbolien määrä. Viestijärjestelmässä käytettävä FEC-virheenkorjaus sekä bittilomitus voivat kuitenkin mitätöidä muutaman bitin häirinnästä saatavan hyödyn ja pakottaa häirintäjärjestelmän häiritsemään jatkuvasti ($\rho=1$). Viestijärjestelmän suojauksen kannalta onkin keskeistä suunnitella järjestelmä niin, että häirintälähetin joutuu jakamaan rajallisen häirintätehonsa sekä ajassa että spektrissä mahdollisimman laajalti (suhteellinen temporaalisspektraalinen etu).

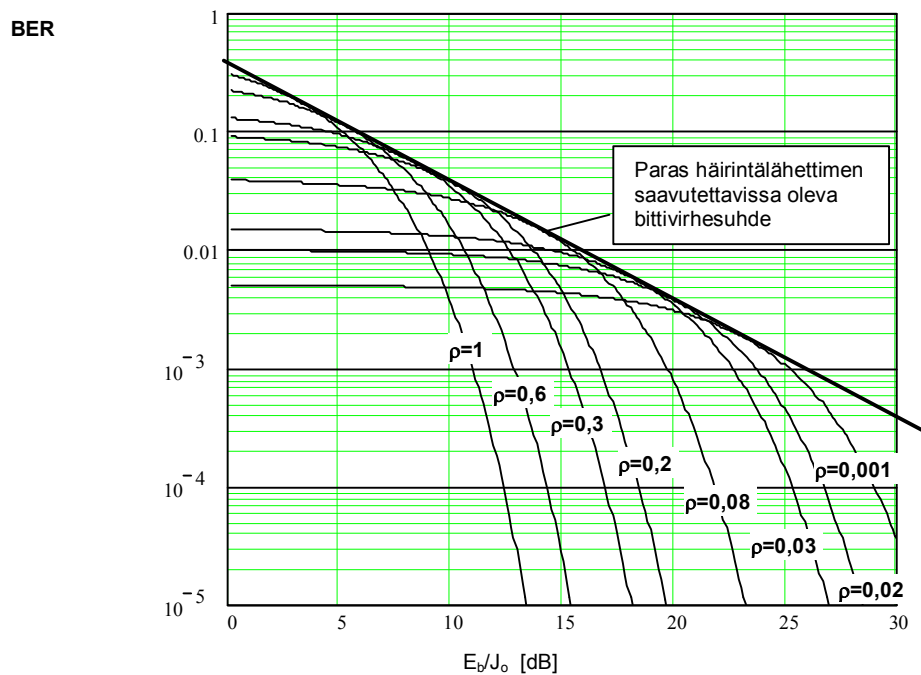
Paras häirintälähtetimen saavutettavissa oleva bittivirhetodennäköisyys on:

$$P_{b,\max} = \begin{cases} \frac{e^{-1}}{\left(\frac{E_b}{J_o}\right)} & \text{jos } \frac{E_b}{N_o} > 2 \\ \frac{1}{2} \cdot e^{-\frac{E_b}{2 N_o}} & \text{muutoin} \end{cases}$$

¹¹ Häirintäsuhde ρ vastaa häirinnän pulssisuhdetta (sitä osaa ajasta, jolla häirintäteho on päällä) kiinteätaajuisella läheteellä. Osakaistahäirintähän näkyy hyppivätaajuisessa järjestelmässä pulssimaisena häirintänä aina silloin kun signaali hyppii häiritylle kaistalle.

Tämän saavuttaakseen häirintälähtetimen on kuitenkin kyettävä päättelemään symbolienergian suhde häirintätehotiheyteen (E_b/J_o), tai saatavalla jollakin toisella tavalla palaute optimaalisesta häirintäsuhteesta. Käytännössä häirintälähtetin voi kokeilla erilaisia pulssisuhteita ja tarkastella kohdejärjestelmän käyttäytymistä. Jos kohteena oleva järjestelmä esimerkiksi nostaa lähetystehoaan tai muuttaa bittivirtaansa (esimerkiksi uudelleensynkronointi on havaittavissa spektristä) häirinnän tehottua, kykenee häirintälähtetin päättelemään löytäneensä optimaalisen pulssisuhteen. Tämän vuoksi onkin ehdottoman tärkeää välttää kaikin keinoin häirinnän tehoamisen paljastaminen.

BFSK:ssa symbolit (joko 0 tai 1) lähetetään kahdella taajuudella kantoaallon läheisyydessä. Vastaanotin päättelee lähetetyn symbolin merkin sen mukaan, kummalla symbolitaajuudella on enemmän energiaa. MFSK:ssa käytetään M:ää taajuutta ja vastaanotin valitsee sen symbolin, jonka taajuudella on eniten energiaa. Häirintälähtetin voi käyttää tätä tietoa hyväkseen keskittymällä häiritsemään kerrallaan yhtä symbolitaajuutta, eli vain osaa radiokanavasta. Tällöin se kykenee BFSK-lähetettä häiritsemään saavuttamaan kaksinkertaisen tehottiheyden symbolitaajuudella koko kanavan kattavaan kohinahäirintään verrattuna. Vastaavasti MFSK:ssa häirintälähtetin kykenee keskittämään M-kertaisen tehon symbolitaajuudelle.



Kuva 80: Pulssihäirinnällä saavutettava bittivirhesuhde signaali- ja häirintäenergian funktiona häirintälähtetimen eri pulssisuhteilla.

Siedettävissä oleva bittivirhesuhde riippuu radiosta ja yhteyden tyypistä; puheensiirrossa nykyiset hyppivätaajuiset kenttäradiot kykenevät sietämään noin 40% kanavista olevan häirittyjä. Datansiirrossa sietokynnys riippuu pienimmästä sallitusta nettosiirtonopeudesta. On huomattava, ettei hypintänopeuden nostaminen vähennä tai lisää yhteyden bittivirhesuhdetta. Tämä johtuu siitä, että vaikka suuremmalla hypintänopeudella kerrallaan tietyillä taajuuksilla häirittyjen symbolien määrä vähenee, käyttää järjestelmä näitä taajuuksia tiheämpään kuin hitaammin hyppivä versio. Siten hidus hypintä johtaa pidempiin mutta harvemmin toistuviin virhepurskeisiin. Nopeammalla järjestelmällä kukin virhepurske on lyhyempi, mutta niitä tulee vastaavasti tiheämpään. Nopeammalla taajuushypinnällä voidaan saavuttaa hyötyä vain seuraavaan häirintälähtetimeen nähden. Seuraava häirintälähtetin (follow-on jammer) tarkkailee signaaliavaruutta ja siirtyy häiritsemään vain käytettyjä kanavia; kun

hypintäjärjestelmä siirtyy uudelle taajuudelle, häirintälähetin lopettaa lähetyksensä, siirtyy perässä ja aloittaa häirinnän uudella kanavalla. Tällöin häirintäjärjestelmän on kuitenkin kyettävä tunnistamaan häirittävä lähetin esimerkiksi signaalin tulosuunnan perusteella ennen kuin lähetin on jo siirtynyt uudelle taajuudelle.

Kuva 81 havainnollistaa seuraavan häirintälähettimen toimintajaksoa. Kun viestiliikennelähetin on siirtynyt uudelle taajuudelle, kestää jonkin aikaa ennen kuin lähete tällä taajuudella on edennyt häirintälähettimen vastaanottimelle. Kuvassa 81 tämä aika on t_{TJ} , joka riippuu lähetimen ja häirintäjärjestelmän välisestä etäisyydestä R_{TJ} :

$$t_{TJ} = \frac{R_{TJ}}{c}$$

jossa c on valon nopeus

Häirintälähettimellä kestää jonkin (kuvassa t_t) aikaa virittyä uudelle taajuudelle, käynnistää häirintälähete ja nostaa lähetysteho maksimiinsa. Häirintälähete saapuu vastaanottimelle ajan T_{JR} kuluttua:

$$t_{JR} = \frac{R_{JR}}{c}$$

Tällöin aika, jona viestijärjestelmän vastaanottimella on pelkkä hyötylähete saadaan kaavasta:

$$t_c = t_{TJ} + t_t + t_{JR}$$

Tämän ajan jälkeen häirintälähettimen signaali summautuu hyötyläheteeseen ja häirintähyötysignaalisuhteesta riippuen katkaisee viestiliikenteen. Radiotaajuinen lähete etenee niin nopeasti, ettei hyötylähettimen, häirintäjärjestelmän ja vastaanottimen välinen etäisyysgeometria tuo suojaa häirintäsignaalilta.

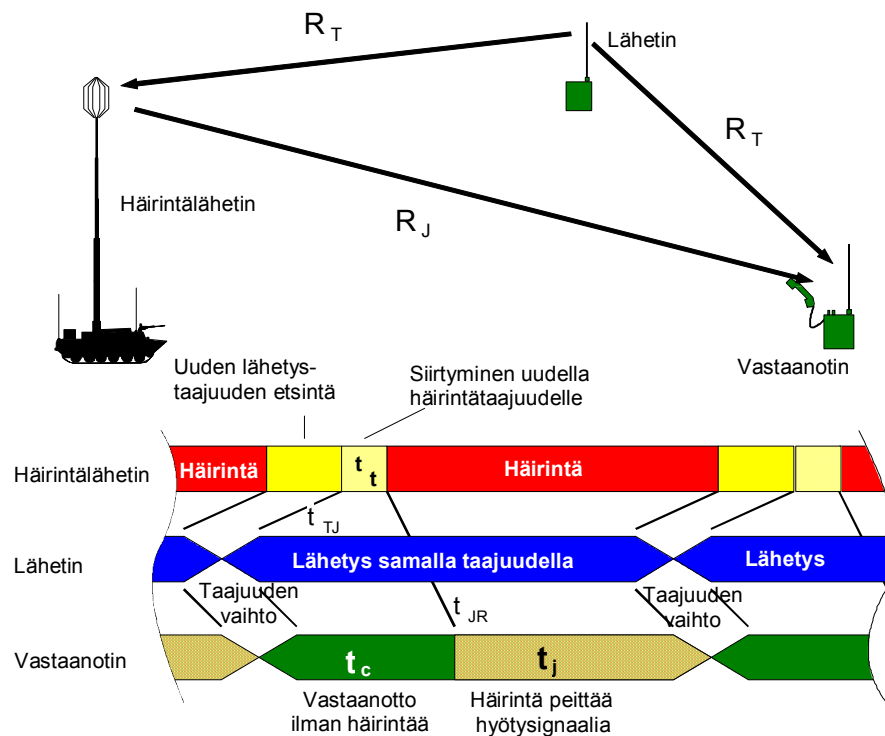
Esimerkiksi tilanteessa, jossa häirintäjärjestelmä on 25 km etäisyydellä sekä viestijärjestelmän lähettimestä että vastaanottimesta, on etenemisviive lähettimeltä häirintäjärjestelmän kautta vastaanottimelle vain 167 μ s. Jos häirintäjärjestelmän reagointiaika on 500 μ s, pitäisi viestijärjestelmän vaihtaa taajuutta nopeudella:

$$\frac{1}{t_c} = 1500 \text{ hyppä/s}$$

Hyppivätaajuisia signaaleita voidaan havaita ja suuntia esimerkiksi IFM- tai kompressio-vastaanottimella, joka on yhdistetty interferometrisuuntimoon. Mikäli halutaan suuri taajuusresoluutio, esimerkiksi häirintätehon keskittämiseksi, voidaan käyttää skannaavaa super-vastaanotinta, joka käy hypintäkaistaa kapeakaistaisesti läpi pyyhkäisemällä yli koko taajuusalueen. Hajaspektrisygnaalien havaitsemistekniikoista on kirjoitettu laajemmin ESM-sensoreiden yhteydessä *sensorijärjestelmät*-luvussa.

Koska taajuuden vaihdon aikana ei voida siirtää informaatiota, joudutaan hyppivätaajuisessa järjestelmässä käyttämään kiinteätaajuisia järjestelmää suurempaa modulointinopeutta. Tämän vuoksi hyppivätaajuinen lähete vaatii periaatteessa suuremman signaali-kohinasuhteen kuin vastaavanopeuksinen kiinteätaajuinen lähete. Taajuushypintä tuo kuitenkin suojaa häirintää vastaan, mikäli häirintäjärjestelmä ei kykene seuraamaan taajuuden vaihtoa, vaan

joutuu levittämään häirintäenergiansa koko hypintäkaistalle. Voidaan kuitenkin olettaa, että tekniikan kehittyminen lisää häirintäjärjestelmien signaalin analysointikykyä ja vähentää siten taajuushypinnän tuomaa suojaa teknisesti kehittyntä vihollista vastaan.



Kuva 81: Seuraavan häirintälähtetimen vaikutus vastaanottiin. Kun lähetin siirtyy uudelle taajuudelle, kulkeutuu tieto tästä häirintäjärjestelmälle ajassa t_{TJ} . Häirintäjärjestelmä kykenee siirtämään häirintätehonsa uudelle taajuudelle ajassa t_t ja tällä taajuudella oleva häirintäsignaali kulkeutuu vastaanottiin ajassa t_{JR} .

Vaikka taajuushypintä ei toisikaan merkittävää suojaa yksittäisille laitteille, on tilanne täysin toinen silloin kun lähettäjiä on useita. Tällöin häirintäjärjestelmän reagoitinopeutta hidastaa lukuisten eritaajuisten läheteiden tulosuunnan analysointi ja oikean häirintätaajuuden päättely. Useat samalla alueella toimivat järjestelmät vaikeuttavat häirintäjärjestelmän toimintaa ja yleensä pakottavat sen toimimaan laajalla kaistalla. Näin käy myös useiden kiinteätaajuisten järjestelmien yhteydessä, mutta silloin häirintäjärjestelmällä on myös mahdollisuus valita, mihin kiinteätaajuisiin läheteisiin se keskittyy. Hyppivätaajuisista radioista saadaan siten paras hyöty silloin kun niitä käytetään massamaisesti.

Taajuushypintäjärjestelmien eduiksi voidaan tiivistää:

- Häirinnän kesto on yleensä parempi kuin kiinteätaajuisella läheteellä
- Hyppivätaajuinen lähetys pakottaa häirintälähtetimen jakamaan häirintätehon lähes koko hypintäkaistalle.
- Järjestelmä voidaan toteuttaa ilman keskitettyä valvontaa ja ohjausta.
- Valesatunnaisesti hyppivää lähetettä on teknisesti huomattavasti vaikeampi kuunnella kuin kiinteätaajuisista läheteistä.
- Järjestelmät ovat käytännössä yhteentoimivia vanhojen kenttäradioiden kanssa toimiessaan kiinteätaajuisessa analogisessa tilassa.

- Ortogonaalinen hypintä, jossa verkon radiot synkronoidaan keskenään siten, että ne hyppivät samaan aikaan ja käyttävät samoja hypintätaajuuksia, vaikeuttaa vihollisen kykyä muodostaa hyppivätaajujen lähettimien verkkokuva ja verkossa olevien lähettimien johtosuhteiden määrittelyä.

Suurimmat taajuushypinnän haitat ovat:

- Yhteyden laatu romahtaa heikoilla signaali-kohinasuhteilla nopeammin kuin kiinteätaajuisen lähetteen¹².
- Taajuushypintä ei tuo riittävää suojaa nykyisiltä tiedustelu- ja suuntimisjärjestelmiltä: hyppivätaajuisen lähete havaitaan ja sen ominaisuudet analysoidaan käytännössä yhtä helposti kuin kiinteätaajuisenkin.
- Vastaanottimet on synkronoitava lähettimen hypintäsekvenssiin, mikä edellyttää sekä erityistä synkronoitumisjaksoa että tarkan ajan ylläpitoa vastaanottimissa.

Aikahypintä

Aikahypintäjärjestelmissä symbolienergia on kerätty hyvin lyhyisiin purskeisiin, joita lähetetään valesatunnaisina hetkinä. Tällöin hetkellisesti lähetettävä teho P_t on hyvin suuri, mutta keskimääräinen teho P_{av} vastaavasti pieni. Jos purskejakson pituus on t_b ja symbolin pituus on t_s , niin normalisoitu signaali-kohinasuhde saadaan kaavalla:

$$\frac{E_b}{N_o} = \frac{P_t \cdot t_s}{N_o \cdot \beta}$$

jossa

$$\beta = \frac{t_s}{t_b}$$

on symbolin lähetysajan suhde purskejakson aikaan.

Koska häirintäjärjestelmä ei tiedä symbolien oikeita lähetyshetkiä, se joutuu lähettämään häirintätehoa jatkuvasti. Tällöin aikahypinnällä saavutetaan β suuruinen parannus verrattuna konventionaaliseen lähetteeseen.

Aikahypinnän maksimia edustaa *impulssiradio*, jossa kerralla lähetetään vain yksi jakso kantoaaltoa (ns. monocycle transmission) ja jossa modulaationa käytetään lähetyshetkeä (PPM, pulse position modulation). Impulssiradiosta käytetään myös nimitystä ultra-laajakais-tainen radio. Ultralaajakaistaisen järjestelmän ongelmiksi muodostuvat järjestelmän komponenteilta edellytettävän taajuuskaistan laajuus sekä suuri hetkellinen huipputeho.

Aikahypintäjärjestelmien eduiksi voidaan tiivistää:

- Häirinnänkesto parempi kuin jatkuvasti lähetettävällä lähetteellä.

¹² DERAn mukaan taajuushypintäjärjestelmän ominaisuudet romahtavat, kun alle 60% kanavista on vapaana. Tämän väitteen vuoksi FH-kenttäradioiden käyttöönotto Britanniassa on lykkäantynyt. Tehdyt kokeet eivät kuitenkaan tue DERAn väitteitä, mutta on selvää, että taajuushyppivä järjestelmä vaatii toimiakseen riittävän monen kanavan olevan häiritsemättömiä.

- Järjestelmä voidaan toteuttaa ilman keskitettyä valvontaa ja ohjausta.
- Järjestelmät eivät häiritse toisiaan, ellei lähetintiheys ole kovin suuri.
- Signaali on vaikeammin havaittavissa ja suunnittavissa kuin perinteinen lähete; impulssiradiossa jopa erittäin vaikeasti havaittavissa.

Suurimmat aikahypynnän haitat ovat:

- Järjestelmän komponenteilta edellytetään laajaa kaistanleveyttä ja suurta hetkelisen tehon kestoa.
- Koska informaatiota lähetetään vain pieni osa kokonaisajasta, on järjestelmän siirtokapasiteetti huomattavasti konventionaalista radiojärjestelmää pienempi.

Pelkästään aikahypintää käyttäviä järjestelmiä ei ole toistaiseksi palveluskäytössä, mutta impulssiradiota tutkitaan ja kehitetään erikoisjoukkojen käyttöön sen poikkeuksellisen hyvien LPI-ominaisuuksien vuoksi. Aikahypintää käytetään yleensä yhdessä taajuushypynnän tai suorasekvenssimenetelmän kanssa tuomaan lisäsuojaa häirintää ja tiedustelua vastaan sekä parantamaan järjestelmien sisäisten häiriöiden kestoa.

Suorasekvenssimenetelmä

Suorasekvenssimenetelmässä (DS-SS, Direct Sequence Spread Spectrum) symbolienergia levitetään spektriin laajalle alueelle. Sotilasjärjestelmissä pyritään levittämään signaalin energia niin laajalle, että signaalitaso saadaan kohinatasoa pienemmäksi. Tällä toivotaan signaalin peittyvän kohinan sekaan niin, ettei sitä kyettäisi havaitsemaan tiedusteluvastaantimilla.

Kuvassa 83 on esitetty suorasekvenssijärjestelmän lohkokkaavio. Lähettimessä on virheenkorjaus-, salaus- ja limityslogiikan jälkeen datamodulaattori, jossa lähetettävää dataa vaihemoduloidaan (PIK, Phase Inversion Keying) valesatunnaisella bittikuviolla.

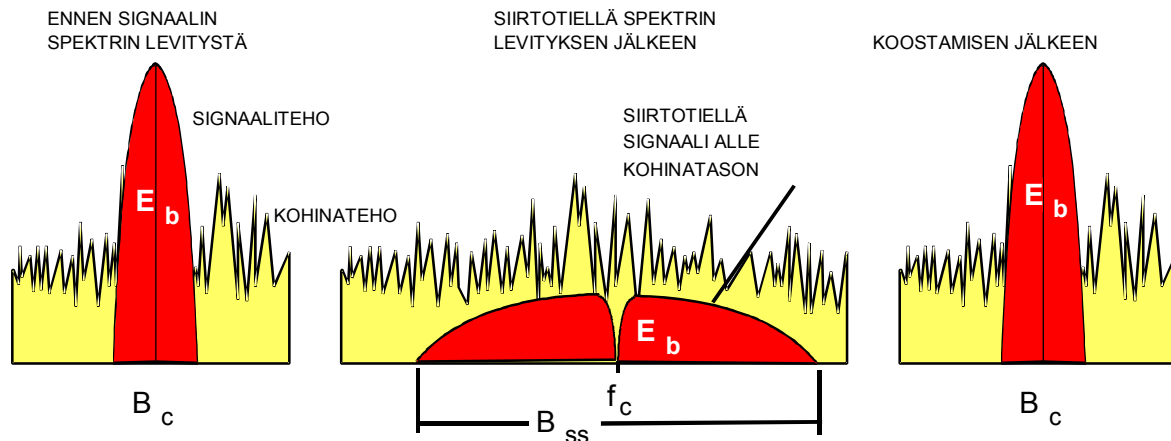
Modulaationopeus on huomattavasti yhden symbolin kestoa suurempi, jolloin kunkin lähetettävän symbolin energia saadaan levitettyä laajalle alueelle spektriin. Hajotettu signaali siirretään toisella modulaattorilla kantoaallon taajuudelle ja lähetetään antennin kautta. Jos hajotuskoodin nopeus (chip rate R_{ss}) on esimerkiksi 10 Mbps ja käytetään binääristä vaihemodulaatiota, saadaan signaali levitettyä taajuuskaistalle:

$$B_{ss} = 2 \cdot R_{ss} = 20 \text{ MHz}$$

Signaalin energia hajotusprosessissa pysyy samana joten signaali-kohinasuhde siirtotiellä laskee. Signaali-kohinasuhteeksi siirtotiellä saadaan:

$$\frac{S}{N} = \frac{E_b}{N_o} \cdot \frac{R_b}{B_{ss}} = \frac{E_b}{N_o} \cdot \frac{1}{G_p} \rightarrow \frac{E_b}{N_o} = G_p \cdot \text{SNR}$$

jossa $G_p = \frac{B_{ss}}{R_b}$ on järjestelmän prosessointivahvistus ja R_b on symbolinopeus.



Kuva 82: Suorasekvenssimenetelmässä signaalin energia jaetaan laajalle alueelle spektrissä, jolloin signaalin tehtiheys siirtokaistalla voi olla kohinatason alapuolella. Signaalienergia kootaan vastaanottimessa takaisin kapealle kaistalle ennen ilmaisua.

Suorasekvenssijärjestelmissä B_{ss} on lähellä hajotuskoodin chippinopeutta R_{chip} , jolloin prosessointivahvistukseksi saadaan hajotuskoodin chippinopeuden suhde datansiirtonopeuteen R_b :

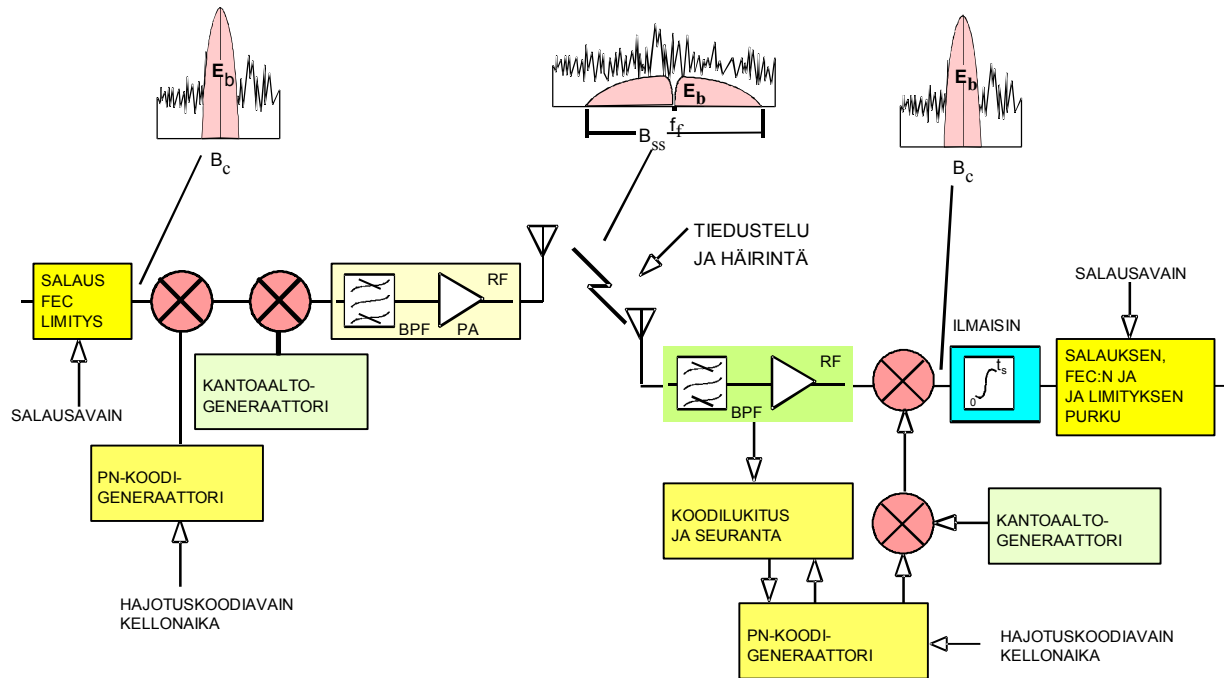
$$G_p = \frac{R_{chip}}{R_b}$$

Signaali kannattaa levittää mahdollisimman laajalle kaistalle, jolloin sen havaitseminen radiotiedustelumenetelmin on vaikeampaa pienemmän signaali-kohinasuhteen vuoksi. Tällöin myös sen häirintä on hankalampaa, koska häirintälähetin joutuu levittämään häirintätehonsa koko sille kaistalle, jolle signaali on levitetty. Käytännössä vastaanottimen etupää asettaa ylärajan siirtokaistan leveydelle.

Koska levityskoodin nopeus R_{ss} on paljon suurempi kuin yhteyden symbolinopeus R_b , signaalin kaista riippuu käytännössä pelkästään levityskoodista. Tämän vuoksi suorasekvenssihajotusmenetelmien tukena voidaan käyttää tehokkaita virheenkorjausalgoritmeja ilman siirtokaistarajoituksia. Virheenkorjaus kasvattaa kuitenkin symbolinopeutta R_b , jolloin prosessointivahvistus G_p pienenee ja bittivirhesuhde kasvaa. Järjestelmäsuunnittelussa on löydettävä kompromissi symbolinopeuden kasvattamisen aiheuttaman virhesuhteen heikennyksen ja virheenkorjauksen mukanaan tuoman virhesuhteen paranemisen välillä.

Suorasekvenssihajotuksella saavutettava hyöty verrattuna konventionaaliseen läheteeseen on prosessointivahvistuksen G_p suuruinen. Jos järjestelmän normalisoidun signaali-kohinasuhteen (E_b/N_o) oletetaan olevan 16 dB, ja 16 kbps lähete levitetään 15 MHz kaistalle, on prosessointivahvistus:

$$G_p = 10 \cdot \log \left(\frac{15 \cdot 10^6}{16 \cdot 10^3} \right) \approx 30 \text{ dB}$$



Kuva 83: Suorasekvenssimenetelmän periaate.

Tällöin pienin sallittu signaali-kohinasuhde siirtotiellä on $\text{SNR} = 16 \text{ dB} - 30 \text{ dB} = -14 \text{ dB}$. Vastaanottimessa signaali suodatetaan ja vahvistetaan radiotaajuudella, jonka jälkeen signaalin energia kootaan hajotuskoodilla takaisin alkuperäiselle kaistalle B_{ch} , jolloin normalisoitu signaali-kohinasuhde on:

$$\frac{E_b}{N_0} = \text{SNR}_{\text{vast}} \cdot G_p \cdot L_{\text{sys}} = -14 \text{ dB} + 30 \text{ dB} - L_{\text{sys}} = 16 \text{ dB} - L_{\text{sys}}$$

jossa L_{sys} sisältää vastaanottimen järjestelmähäviöt, jotka vaihtelevat yleensä toteutuksesta riippuen 1-2 dB välillä. SNR_{vast} on vastaanotettu signaali-kohinasuhde levitetillä spektrillä.

Prosessointivahvistusta voidaan käyttää myös häirinnän vastustamiseen, sillä häirintälähetin ei tiedä hajotuskoodia ja joutuu jakamaan tehonsa koko B_{ss} kaistalle. Tällöin häirintäteho tiheys pienenee G_p verran. Vastaanotin tuntee hajotuskoodin ja demoduloi vastaavalla bittikuviolla vastaanotettua signaalia, jolloin levitetty signaalienergia saadaan kerättyä ilmaisimelle.

Jotta vastaanotin kykenisi koostamaan signaalin alkuperäiseen muotoonsa levitetyltä kaistalta B_{ss} kapealle signaalikaistalle B_{ch} , sen tulee tietää oikea hajotuskoodi ja kyetä tahdistumaan oikeaa kohtaan koodia. Vastaanottimessa on oma logiikkansa oikean koodin kohdan etsimiseen ja seuraamiseen (code acquisition and tracking). Etsintävaiheessa vastaanotin aloittaa koodin syöttämisen valitsemastaan koodin kohdasta ja tarkkailee, korreloiko vastaanotettu signaali kyseisen koodinpätkän kanssa. Jos vastaanotin havaitsee riittävän korrelaation, se ryhtyy seuraamaan koodia ja vastaanottamaan signaalia. Jos korrelaatiota ei ilmene, vastaanottimen logiikka koettaa toista koodin kohtaa. Koodin kohdan etsintäalgoritmin on oltava riittävän nopea, jotta yhteys saadaan muodostettua mahdollisimman nopeasti lähetteen vastaanottamisen jälkeen. Toisaalta algoritmi ja hajotuskoodi eivät saisi johtaa kovin moniin väärin tahdistuksiin. Seuranta-algoritmin tehtävänä on ylläpitää saavutettua tahdistusta siten, että PN-koodigeneraattorin seuraava koodi tahdistuu mahdollisimman tarkasti tulevan

signaalin muutoksiin. Seurantavirhe johtaa ilmaisimelle tulevan signaalienergian pienenemiseen, jolloin yhteyden bittivirhesuhde kasvaa suuremmaksi kuin mitä signaali-kohinasuhde mahdollistaisi. Seuranta-algoritmin on siedettävä signaalin häipymistä, häirintää sekä toisista hajaspektrilähettimistä tulevia häiriöitä.

Differentiaalisesti koherentin suorasekvensijärjestelmän bittivirhesuhde voidaan laskea kaavalla:

$$P_b = (1 - \rho) \cdot Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) + \rho \cdot Q\left[\sqrt{\frac{2E_b}{N_0 + \frac{J_0}{\rho}}}\right]$$

jossa ρ on häirinnän pulssisuhde (se osa ajasta, jolla häirintäteho on päällä), E_b signaalienergia, N_0 vastaanottimen kohinatehotiheys ja J_0 häirintätehotiheys. On huomattava, että bittivirhetodennäköisyys *ei riipu* kanavan signaali-kohinasuhteesta, vaan pelkästään ilmaisimelle tulevan signaalin symbolienergian suhteesta kohinatehotiheyteen ja häirintäsignaalin tehotiheyteen. Tämä vuoksi hajaspektrijärjestelmässä voidaan toimia jopa negatiivisilla signaali-kohinasuhteilla. Käytännössä häirintätilanteissa kohina voidaan usein jättää huomioimatta, jolloin em. kaava lyhenee muotoon:

$$P_b = \rho \cdot Q\left(\sqrt{\frac{2E_b \cdot \rho}{J_0}}\right)$$

Oikealla pulssisuhdeella voidaan lisätä häirinnän tehokkuutta, aivan kuten jo taajuushyppivän järjestelmän yhteydessä todettiin. Optimaalinen pulssisuhde saadaan kaavasta:

$$\rho_0 = \begin{cases} \frac{0,70}{\frac{E_b}{J_0}} & \text{jos } \frac{E_b}{J_0} > 0,70 \\ 1 & \text{muutoin} \end{cases}$$

Suurin pulssihäirinnällä aikaan saatava bittivirhesuhde saadaan kaavasta:

$$P_{b,\max} = \begin{cases} \frac{0,08}{\frac{E_b}{J_0}} & \text{jos } \frac{E_b}{J_0} > 0,709 \\ Q\left(\sqrt{2 \cdot \frac{E_b}{N_0}}\right) & \text{muutoin} \end{cases}$$

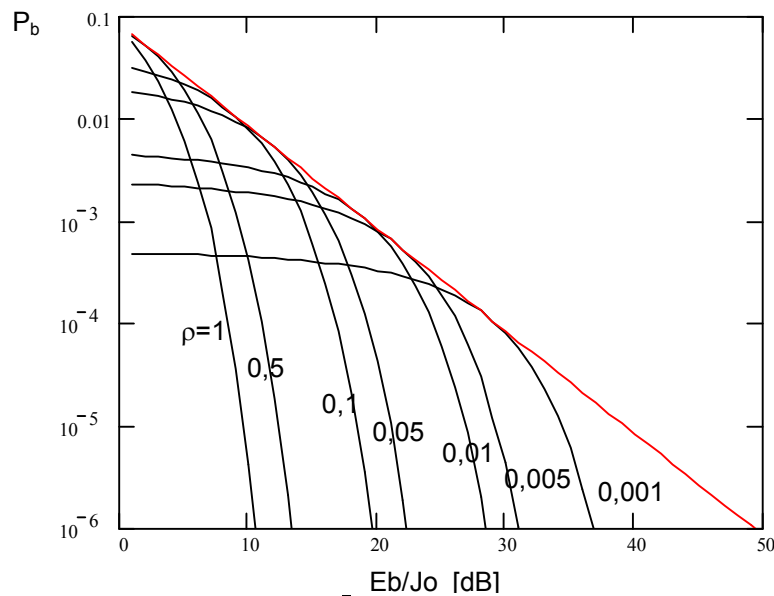
Kuvassa 84 voidaan havaita pulssisuhteen vaikutus yhteyden häirintään. Suurilla häirintäsignaalin tasoilla (eli pienillä E_b/J_0 -suhteilla) kannattaa häiritä pidempiä aikoja kuin pienemmillä häirintä-hyötysignaalitysoilla. Tämä pätee luonnollisesti vain tilanteessa, jossa häirintälähetimen lähetysteho rajaa keskimääräinen teho eikä suinkaan hetkellinen huipputeho. Ensin mainittuun rajoitukseen voi olla syynä esimerkiksi akun kesto tai teholähteen tai lähetinpiirien lämpenemisen aiheuttamat rajoitukset. Huipputehoa puolestaan voi rajoittaa esimerkiksi lähetinkomponenttien hetkellisen tehon kesto.

Suorasekvenssijärjestelmän sietämä häirintä J_{\max} voidaan laskea kaavasta:

$$J_{\max} = \text{SNR}_{\text{vast}} - \text{SNR}_{\text{min}} + G_p - L_{\text{sys}}$$

jossa SNR_{vast} on vastaanotettu signaali-kohinasuhde, SNR_{min} on pienin sallittu signaali-kohinasuhde sen jälkeen kun signaali on koottu, eli ilmaisuvaiheessa, G_p on järjestelmän prosessointivahvistus ja L_{sys} vastaanottimen kokonaishäviöt.

Suorasekvenssimenetelmää käytetään joissakin informaation levitysjärjestelmissä, kuten amerikkalaisessa JTIDS:ssa (Joint Tactical Information Distribution System), sekä esimerkiksi satelliittikommunikaatio- ja satelliittipaikannusjärjestelmissä (esimerkiksi GPS). Menetelmää ei pidetä soveltuvana esimerkiksi kenttäradiokäyttöön niin kutsutun lähi/kauko-ilmion vuoksi. Suorasekvenssimenetelmässä lähetysteho jakautuu laajalle spektrille, jolloin järjestelmät häiritsevät toisiaan. Hyvin lähellä sijaitsevien lähettimien lähetteen tehoteho voi olla niin suuri, että kaukana sijaitsevan lähettimen lähete peittyi. Tätä kutsutaan lähi/kauko-ilmioiksi. Ilmion vuoksi lähellä sijaitsevien lähettimien lähetystehoa tulisi kyetä pienentämään, mikä edellyttäisi järjestelmäelementtien välistä hallintaa. Tämä on vähentänyt suorasekvenssimenetelmän suosiota taistelukentän sovelluksissa. Sen sijaan esimerkiksi CDMA-solukko-verkoissa menetelmää käytetään tehokkaasti hyväksi. Niissä tilaajalaitteiden lähettimien tehoa säädetään tukiaseman toimenpitein, jolloin lähi/kauko-ilmioista ei koidu haittaa tilaajalaitteille tai tukiasemille.



Kuva 84: BPSK-suorasekvenssijärjestelmän häirintään vaadittava E_b/J_0 -suhde.

DS-SS-järjestelmää kutsutaan myös LPI-tyyppiseksi järjestelmäksi (Low Probability of Intercept), jos sen signaalin tehoteho on alle pohjakohinan tason. Tämä on kuitenkin mahdollista vain tietyillä etäisyyksillä. Ilmaisimelle saatavaa normalisoitua signaali-kohinasuhdetta voidaan approksimoida radiotiellä olevan signaali-kohinasuhteen ja DS-järjestelmän prosessointivahvistuksen tulolla:

$$\frac{E_b}{N_0} = \text{SNR}_r \cdot G_p$$

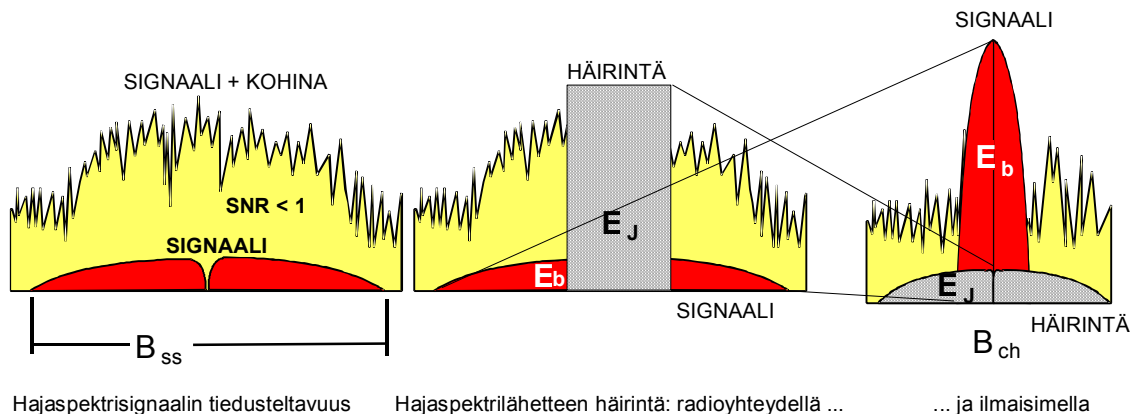
Tällöin radiotiellä levitetyllä kaistalla vaadittava signaalikohinasuhde on vastaavasti

$$\text{SNR}_{r,\min} = \frac{E_b}{N_o} \cdot G_p$$

Vastaavasti yhteyden kantama saadaan vapaan tilan vaimennuksen vallitessa kaavasta

$$R_{tr} = \sqrt{\frac{P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \lambda^2}{(4\pi)^2 \cdot k \cdot T \cdot B \cdot F \cdot \text{SNR}_{r,\min} \cdot L_{\text{sys}}}} = \sqrt{\frac{P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \lambda^2 \cdot G_p}{(4\pi)^2 \cdot k \cdot T \cdot B \cdot F \cdot E_b / N_o \cdot L_{\text{sys}}}} = \sqrt{\frac{P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \lambda^2 \cdot B_{ss}}{(4\pi)^2 \cdot k \cdot T \cdot B \cdot F \cdot E_b / N_o \cdot R_b \cdot L_{\text{sys}}}}$$

jossa P_t on lähetysteho, G_t ja G_r lähetys- ja vastaanotinantennien vahvistukset, B_{ss} levityskaista, E_b/N_o ilmaisimelle vaadittu normalisoitu signaali-kohinasuhde, R_b yhteyden bittisiirtonopeus ja L_{sys} järjestelmän häviötermi.



Kuva 85: Hajaspektrisignaalin tiedusteleminen on vaikeata, koska signaali-kohinasuhde voi olla alle yhden, jolloin signaalitaso on alle kohinatason (vasemmalla). Signaalin koostaminen kokoaa levitetyn signaalienergian, mutta levittää hajotuskoodin kanssa korreloimattoman häirintäsignaalin laajalle kaistalle.

Yhteys on tiedusteltavissa elektronisen tiedustelun järjestelmällä etäisyydeltä, joka on alle:

$$R_E = \sqrt{\frac{P_t \cdot G_t \cdot G_E \cdot \lambda^2}{(4\pi)^2 \cdot k \cdot T \cdot B \cdot F \cdot \text{SNR}_{E,\min}}}$$

jossa G_E on ELINT-järjestelmän antennivahvistus ja SNR_{\min} pienin signaalikohinasuhde, jolla lähteen ilmaisu on mahdollista. Lisäksi yksinkertaisuuden vuoksi oletetaan, että lähttimen antenni on ympärisäteilevä ja ELINT-vastaanotin on samankaltainen järjestelmän vastaanottimen kanssa. Järjestelmän kantaman ja maksimin tiedusteluetaisyyden suhteeksi saadaan edellä mainituin yksinkertaistuksin.

$$\frac{R_E}{R_{tr}} = \sqrt{\frac{G_E \cdot E_b / N_{o,min} \cdot R_b}{G_r \cdot B_{ss} \cdot SNR_{E,min}}} \quad \gamma \quad R_E = R_{tr} \cdot \sqrt{\frac{G_E \cdot E_b / N_{o,min} \cdot R_b}{G_r \cdot B_{ss} \cdot SNR_{E,min}}}$$

Tiedusteluvastaanottimella on yleensä puolellaan huomattavasti järjestelmävastaanotinta suurempi antennivahvistus (esimerkiksi 25 dB verrattuna järjestelmän ympärisäteilevän antennin 5 dB:iin) ja pienempi signaalikohinasuhdevaatimus (esimerkiksi $E_b N_{o,min} = 16$ dB, mutta $SNR_{E,min} = 3$ dB), joka johtuu siitä, ettei tiedusteluvastaanottimen tarvitse välittää virheellisten bittien määrästä, vaan pelkästään ilmaista lähetteen energian olemassaolo. Jos 6 MHz kaistalle levitetyllä yhteydellä siirretään tietoa 144 kbps nopeudella, saadaan tiedustelutavuusetaisyudeksi $R_E = 2,6 R_{tr}$. Jotta yhteys olisi tiedusteltavissa vain etäisyyksiltä, jotka ovat lyhyempiä kuin järjestelmän kantama, siirtonopeus pitäisi pudottaa noin 22 kbps tasolle muiden parametrien pysyessä samana.

Suorasekvenssimenetelmän etuina voidaan mainita:

- Hyvä häirinnän sietokyky suuren prosessointivahvistuksen vuoksi.
- Levitysprosessi on yksinkertainen, jolloin voidaan käyttää yksinkertaisia lähettämiä.
- Lähetteen vaikea tiedusteltavuus pienen signaali-kohinasuhteen vuoksi.

Menetelmän suurimpia ongelmia ovat:

- Koodin synkronoituminen on vaikeampaa ja hitaampaa kuin taajuus- tai aikahypintäjärjestelmissä.
- Koodin synkronoitumisvaihe on altis häirinnälle.
- Järjestelmän käyttäjät aiheuttavat häiriöitä toisilleen. Häiriötaso riippuu käyttäjien määrästä, joten maksimi häiriötaso määrää suurimman käyttäjien lukumäärän.
- Lähi/kauko-ilmiö rajoittaa käytettävyyden tilanteisiin, joissa lähellä sijaitsevien lähetinten suurista tehotasoista ei muodostu ongelmia.
- Vastaanotinten kaistanleveyden ja dynaamisen alueen on oltava hyvin laaja.
- Järjestelmässä on käytettävä laajakaistaisia antennia, jotka ovat tehottomampia tai suurikokoisempia kuin perinteisesti viestijärjestelmissä käytettävät antennit.

LIITYNTÄMENETELMÄT

Liityntämenetelmäksi (access method) kutsutaan tekniikkaa, jolla kaksi tai useampia järjestelmäkomponenttia voidaan liittää toisiinsa. Yleisin sovelluskohde on usean tietokoneen liittäminen lähiverkkoon, puhelin- tai radiotilaajalaitteen liittäminen tukiasemaan tai tietoliikennesatelliittiin. Liityntämenetelmät erottavat eri tilaajalaitteet jonkin fyysisen ominaisuuden perusteella, kuten:

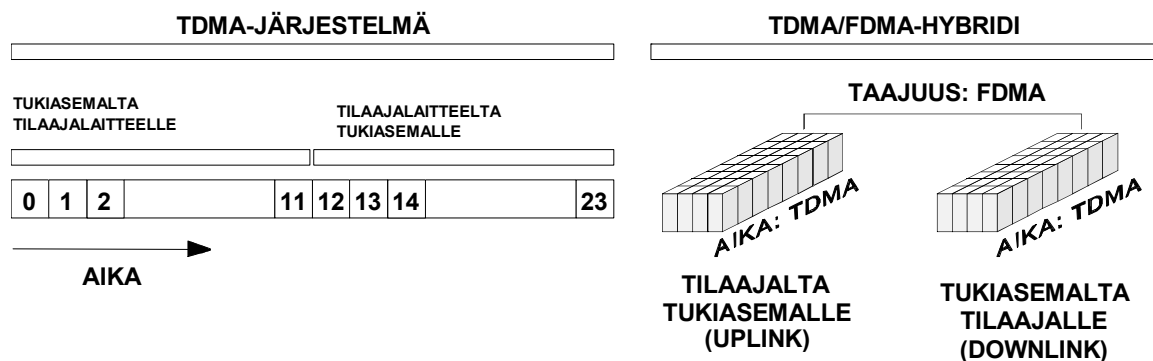
- aika; lähetys- ja vastaanottohetket; TDMA, Time Division Multiple Access
- taajuus; FDMA, Frequency Division Multiple Access
- hetkellinen energiajakauma spektrissä; hajotuskoodi; CDMA, Code Division Multiple Access

- fyysinen siirtotie; SDMA; Space Division Multiple Access.

Näistä viimeksi mainitussa kutakin tilaajalaitetta kohti on oma siirtotiensä. Tällaisia järjestelmiä ovat esimerkiksi perinteisten johdinpuhelinverkkojen tilaajien liittäminen keskittimillä keskuksille. SDMA soveltuu vain tilanteisiin, joissa siirtotie voidaan erottaa fyysisesti erillisiksi osiksi, kuten laseroptisissa ja kaapelipohjaisissa järjestelmissä. Radiojärjestelmissä käytetään TDMA:ta, FDMA:ta tai CDMA:ta tai näiden hybridejä.

TDMA

Aikajakokanavoinnissa, eli TDMA:ssa, siirrettävä informaatio on ryhmitelty kehyksiin (frame), jotka sisältävät aikavälejä (slot). Kullekin tilaajalaitteelle varataan tietyt aikavälit. Kun laite haluaa lähettää, sen on odotettava, kunnes sille kuuluvaa aikaväliä vastaavan lähetyshetki koittaa. Vastaanottaja tunnistaa lähettäjän signaalin vastaanottohetken perusteella. Kehykset alkavat ja päättyvät vakiodulla kehyslukitusmerkillä, jonka avulla vastaanottimet kykenevät tahdistumaan tulevaan informaatiovirtaan ja tulkitsemaan sitä oikein. Osa aikaväleistä voi olla varattu osan aikaa tai kiinteästi järjestelmäkomponenttien väliseen merkinantoon loppujen ollessa käytettävissä hyötyinformaation siirtämiseen. Kehyslukitus ja merkinanto vievät osan yhteydellä käytettävissä olevasta kapasiteetista.



Kuva 86: TDMA-järjestelmässä käytetään vain aikaa eri tilaajien ja eri suuntaan kulkevan informaation erottamiseen. Usein käytetään kuitenkin aika- ja taajuusjakokanavoinnin hybridiä, jossa tilaajalaitteet ja eri suuntaan kohdistuva liikennöinti erotetaan sekä aika- että taajuustasossa.

Aikajakokanavoinnissa voidaan käyttää yksi- tai kaksisuuntaisia kanavia; esimerkiksi GSM:ssä on kaksi eri taajuudella toimivaa TDMA-kehysvirtaa; toinen tilaajalta tukiasemalle ja toinen tukiasemalta tilaajalle. ETSIn standardoimassa digitaalisessa langattomassa puhelimessa DECT:ssä sen sijaan käytetään samalla taajuudella aikajakoisesti vuorosuuntiin lähetettäviä TDMA-kehyksiä.

Puhdas TDMA-järjestelmä on halvempi toteuttaa kuin TDMA/FDMA-hybridi, sillä siinä voidaan tukeutua samalla taajuudella toimivaan lähettimeen ja vastaanottimeen. Hybridi on monimutkaisempi, mutta mahdollistaa suuremman liityntä- ja siirtokapasiteetin.

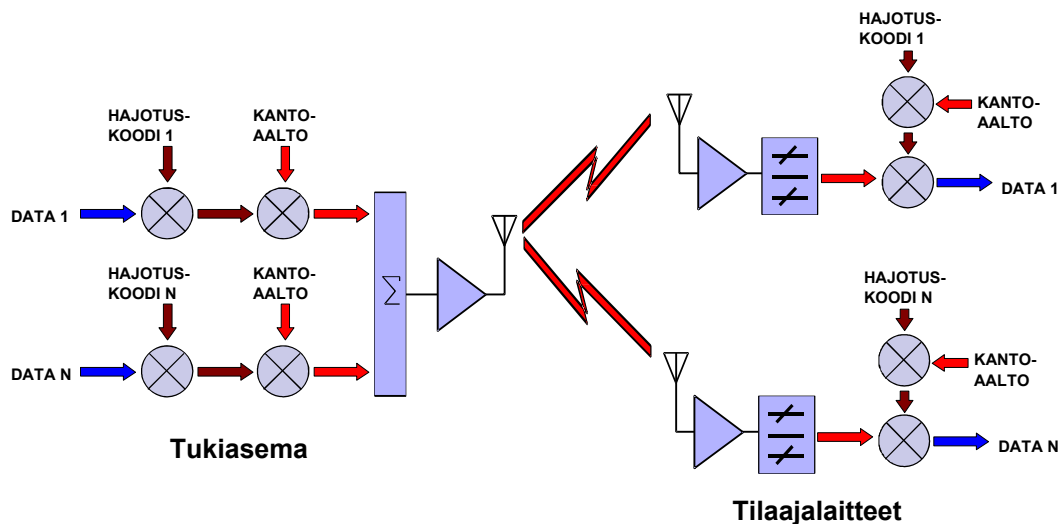
CDMA

Koodijakomenetelmässä (CDMA Code Division Multiple Access) käytetään suorasekvenssihajotusta siirtotiellä. Kaikki laitteet toimivat samalla (laajalla) taajuuskaistalla, mutta ne on

erotettu toisistaan eri hajotuskoodeilla, joiden keskinäinen korrelaatio on mahdollisimman pieni. Tukiasemassa on oltava periaatteessa yhtä monta lähetinvastaanotinta kuin siihen liittyneitä yhtäaikaaisesti kommunikoivia tilaajalaitteita.

Jos oletetaan kaikkien vastaanottimeen tulevien signaalien olevan yhtä suuria, saadaan signaali-kohinasuhteeksi levitetetyllä spektrillä:

$$\text{SNR}_{\text{ss}} = \frac{S}{S \cdot (N_{\text{usr}} - 1) + N_o \cdot B_{\text{ss}}} \approx \frac{1}{N_{\text{usr}} - 1}, \text{ mikäli } S \gg N_o$$



Kuva 87: CDMA-järjestelmän toimintaperiaate.

Järjestelmän toimivuuden ratkaisee ilmaisimella oleva signaali-kohinasuhde, joka on:

$$\text{SNR}_{\text{det}} = \text{SNR}_{\text{ss}} \cdot G_p, \text{ jossa } G_p = \frac{B_{\text{ss}}}{R_b}$$

Suurin CDMA-järjestelmään liitettävissä oleva tilaajamäärä N_{usr} saadaan pienimmän järjestelmän sietämän signaali-kohinasuhteen SNR_{min} avulla kaavasta:

$$N_{\text{usr}} = \frac{B_{\text{ss}}}{R_b \cdot \text{SNR}_{\text{min}}} \cdot L_{\text{sys}} + 1$$

jossa L_{sys} sisältää vastaanottimen kokonaishäviöt.

Koodijakoista kanavointia käytetään esimerkiksi nykyisissä digitaalisissa solukoverkoissa sekä tulevaisuuden matkapuhelinstandardissa, UMTS:ssä (Universal Mobile Telecommunication System). Euroopassa valittiin aikoinaan TDMA/FDMA-hybridi GSM:n standardiksi, koska CDMA:n arveltiin tarjoavan heikomman kapasiteetin rajallisilla käytettävissä olevilla taajuuskaistoilla.

FDMA

Taajuusjakomenetelmässä laitteiden ja tukiaseman välisessä kommunikaatiossa käytetään eri taajuuksia eri laitteille ja eri suuntaan kulkevalle informaatiolle. Menetelmän etuna on se, ettei laitteita tarvitse synkronoida keskenään, jolloin voidaan käyttää yksinkertaisempaa rakennetta tilaajalaitteissa. Haitaksi muodostuu tuhlaileva spektrin käyttö, sillä kukin yhteys vie aina yhden kaksisuuntaisen radiokanavan. Nykyisissä järjestelmissä FDMA:ta käytetään muiden menetelmien, ennen kaikkea TDMA:n, tukena lisäämässä kuhunkin tukiasemaan liitettävissä olevien tilaajien määrää ja vähentämässä tilaajalaitteiden tai tukiasemien toisille aiheuttamia häiriöitä.

VIESTIYHTEYDEN TIEDUSTELU JA HÄIRINTÄ

Tiedusteltavuus

Viestiyhteyden tiedusteluun liittyvien sensoreiden ominaisuuksia, rakennetta ja toimintaa käsitellään tarkemmin kirjan *sensorijärjestelmät*-luvussa. Signaalin havaitsemiseen ja sieppaamiseen liittyvää problematiikkaa kaavoineen on esitetty liitteessä 2. Tässä yhteydessä aihe käydään läpi vain viestijärjestelmän suojaamisen kannalta. Järjestelmän tiedusteltavuus riippuu ensisijaisesti tiedusteluvastaanottimella olevasta signaali-kohinasuhteesta. Tämä puolestaan riippuu paitsi siepatun signaalin tasosta, myös tiedusteluvastaanottimen kohinatasosta. Vastaanottimen kohina muodostuu kohinatehotiheyden N_o ja kohinakaistanleveyden B_{elint} tulosta:

$$SNR_{elint} = \frac{S}{N_o \cdot B_{elint}}$$

$$\text{jossa } N_o = k \cdot T_{elint}$$

T_{elint} on tiedusteluvastaanottimen ekvivalentti kohinalämpötila, joka saadaan vastaanottimen kohinaluvun F_{rec} , lämpötilan T_o ja antennin ekvivalentin kohinalämpötilan avulla kaavasta:

$$T_{elint} = T_{ant} + (F_{rec} - 1) \cdot T_o$$

Pienin ilmaistavissa oleva signaali S_{min} riippuu:

1. pienimmästä sallitusta tiedusteluvastaanottimen signaali-kohinasuhteesta SNR_{min} , joka puolestaan riippuu:
 - a) vaaditusta havaitsemistodennäköisyydestä P_d ja
 - b) suurimmasta sallitusta väärin hälytysten määrästä aikayksikössä FAR, joka riippuu:
 - väärin hälytysten todennäköisyydestä P_{fa} ja
 - vastaanottimen kaistanleveydestä B
2. tiedusteluvastaanottimen kohinatasosta, joka riippuu:
 - a) vastaanottimen kohinaluvusta F_{rec}

- b) vastaanottimen lämpötilasta T_o
- c) vastaanotinantennin ekvivalenttisesti kohinalämpötilasta T_{ant} , joka ottaa huomioon antenniin spektristä tulevan kohinan.

Auki kirjoitettuna pienimmän ilmaistavissa olevan signaalin kaavaksi saadaan:

$$\begin{aligned} S_{\min} &= \text{SNR}_{\min} (P_d \cdot P_{fa}) \cdot k \cdot T_{elint} \cdot B_{elint} \\ &= \text{SNR}_{\min} (P_d, P_{fa}) \cdot k \cdot [T_{ant} + (F_{rec} - 1) \cdot T_o] \cdot B_{elint} \end{aligned}$$

Mitä laajempi vastaanottimen kaistanleveys on, sitä enemmän järjestelmässä on kohinaa ja mitä suuremmaksi kohinakaista kasvaa, sitä enemmän järjestelmä joutuu prosessoimaan vääriä hälytyksiä, sillä ($FAR = P_{fa} \cdot B_{elint}$). Siten pieni kaistanleveys olisi tavoiteltava piirre. Optimitilanteessa vastaanottimen kaista on sama kuin signaalin, jolloin signaalienergian ja kohinaenergian suhde maksimoituu. Kapea kaista johtaa kuitenkin siihen, että tiedusteluvastaanotin, joka ei välttämättä tiedä, millä taajuudella lähete on, joutuu siirtymään taajuudelta toiselle etsiessään lähetettä. Tällöin lähetteen havaitsemistodennäköisyys pienenee. Käytännössä optimaalinen kaistanleveys on näiden kompromissi.

Tiedusteluvastaanottimeen saatava signaali S riippuu:

1. lähettimen tehosta ja antennivahvistuksesta tiedusteluvastaanottimen suuntaan,
2. etenemisvaimennuksesta tiedusteluvastaanottimeen,
3. sekä tiedusteluvastaanottimen antennivahvistuksesta G_{elint} ja häviöistä.

Mitä suurempi tiedusteluvastaanottimen antennivahvistus on, sitä pienempiä signaaleita sillä kyetään havaitsemaan. Toisaalta mitä suurempi vahvistus on, sitä kapeampi antennin keila on. Kapea keila pakottaa tiedustelujärjestelmän pyyhkimään valvomaansa tilaa sektori kerrallaan. Tällöin keilan ulkopuolella oleva signaali saattaa jäädä havaitsematta. Tämän vuoksi tiedustelujärjestelmät varustetaan yleensä ympärisäteilevillä antennilla, joiden keila on kapeahko vertikaalisuunnassa. Esimerkiksi suorakulmaisen apertuuriantennin – tai suorakulmaisen antenniryhmän - vahvistus voidaan arvioida keilanleveyden ($\theta \times \phi$ [sterad]) mukaan kaavalla:

$$G_{elint} = \eta \frac{4 \cdot \pi}{\theta \cdot \phi}$$

Jos tiedustelujärjestelmän pitäisi valvoa esimerkiksi $360^\circ \times 15^\circ$ ($= 2\pi \times 0,5$ [sterad]) sektoria, on sen antennivahvistus noin 7,6 dB. Vahvistusta voidaan lisätä käyttämällä useampia vastaanottimia ja suuntaavampia antennia, joita käännetään mekaanisesti.

Suojautuminen tiedustelulta

Viestijärjestelmän suunnittelussa tai käytössä ei voida vaikuttaa tiedustelujärjestelmän ominaisuuksiin, mutta signaalin sieppaamista voidaan vaikeuttaa seuraavin keinoin:

- a) Maksimoidaan pienin siepattavissa oleva signaalitaso:

1. Levitetään signaali mahdollisimman laajalle spektriin hajaspektrimenetelmin
- b) Minimoidaan tiedusteluvastaanottimelle kulkeutuvan signaalin teho:
1. Minimoidaan viestijärjestelmässä käytettävä lähetysteho (käytetään tehokkaita virheenkorjauskoodeja, joiden avulla suurinta sallittua bittivirhesuhdetta voidaan lisätä, mikä sallii lähetystehon laskemisen).
 2. Käytetään suuntaavia antenneja, joiden sivukeilataso on hyvä (d/λ -suhdetta lisäämällä ja sopivalla antennin valaisulla).
 3. Maksimoidaan etenemisvaimennus lähettimeltä tiedusteluvastaanottimelle (korkea toimintataajuus tai ilmakehän absorptiopiikkien hyväksikäyttö, sopiva antennikorkeus, esteiden hyväksikäyttö).
- c) Peitetään signaali:
1. Käytetään samanaikaisesti useita samanlaisia lähettäjiä, jolloin signaali peittyy jossain määrin muiden läheteiden joukkoon. Tällä kyetään yleensä vain hidastamaan yksittäisen läheteen analysointia.
 2. Käytetään aktiivisia häirintälähettäjiä, joilla peitetään hyötylähete (masking). Tällä menetelmällä läheteen paljastumistodennäköisyys kasvaa, mutta yksittäisen signaalin sieppaaminen vaikeutuu.

Toimintataajuuden nostaminen lisää etenemisvaimennusta. Tämä tuo suojaa tiedustelua ja häirintää vastaan, silloin kun viestijärjestelmän yhteysväli on pienempi kuin tiedustelu- tai häirintäjärjestelmien etäisyys lähettimestä tai vastaanottimesta. Taajuuden nostaminen lisää myös viestijärjestelmän antennien vahvistusta, mikä tosin voi kompensoitua vastaavasti tiedustelu- ja häirintäjärjestelmän suuremman antennivahvistuksen vaikutuksesta. Etenemisvaimennusta voidaan maksimoida myös sijoittamalla maastoeste, kuten kukkula tai rakennus, lähettimen ja todennäköisen uhkasuunnan välille.

Häirinnän vaikutus viestiyhteyteen

Häirintä on tehokasta vain, jos häirintäsignaalilla kyetään heikentämään hyötysignaalin suhdetta häirintäsignaaliin ja vastaanotettuun normaaliin kohinaan. Mikäli kohinan vaikutus voidaan jättää huomioimatta ($N \ll S$), puhutaan signaali/häirintä-suhteesta (SJR, Signal-to-Jamming-Ratio). Pienillä signaalitasoilla myös kohinan vaikutus on huomioitava, jolloin käytetään nimitystä SJNR (Signal-to-Noise+Jamming Ratio):

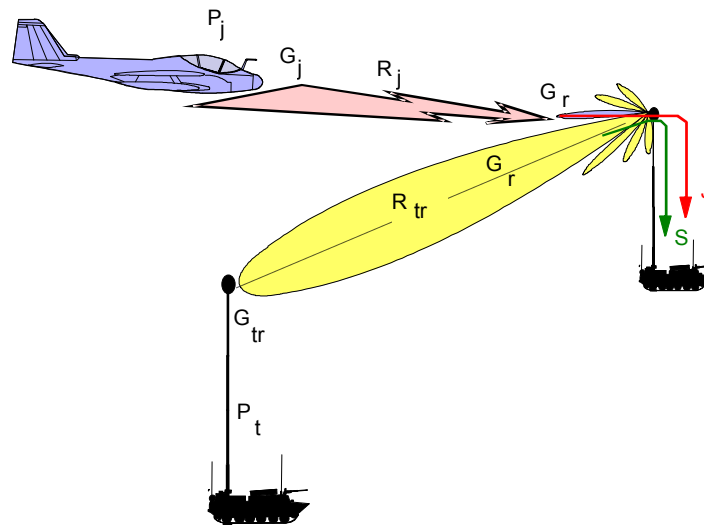
$$SJR = \frac{S}{J} \quad SJNR = \frac{S}{J + N}$$

Hyötysignaalin tehotaso vastaanottimella saadaan kaavasta:

$$S = P_t + G_{tr} - L_t - L_{tr}(R_{tr}) + G_{rt} - L_r \quad [\text{dBW}]$$

jossa P_t on lähettimen lähetysteho, G_{tr} lähettimen vahvistus vastaanottimen suuntaan, L_t lähettimen kokonaishäviöt, $L_{tr}(R_{tr})$ yhteysvälivaimennus lähettimen ja vastaanottimen välillä, G_{rt} vastaanottimen vahvistus lähettimen suuntaan ja L_r vastaanottimen kokonaishäviöt. Vastaavasti häirintäsignaalin tehotasoksi vastaanottimella saadaan:

$$J = P_j + G_{jr} - L_j - L_{jr}(R_{jr}) + G_{rj} - L_r \quad [\text{dBW}]$$



Kuva 88: Häirintälähtetimen isotrooppinen lähetysteho on $EIRP_j = P_j \cdot G_j$. Vastaavasti viestijärjestelmän $EIRP_t = P_t \cdot G_r$. Vastaanottimen antennivahvistus viestilähtetimen suuntaan on G_r ja häirintälähtetimen suuntaan G_{rj} . Vastaanottimen etäisyys häirintälähtettiin on R_{jr} ja viestilähtettiin R_{tr} .

Jos viestijärjestelmän antennivahvistus on sama lähetyksessä ja vastaanotossa ($G_{tr} = G_{rt} = G_s$) ja järjestelmähäviöt jätetään huomioimatta, saadaan hyöty/häirintäsignaalisuhteeksi:

$$\frac{S}{J} = (P_t - P_j) + (2G_s - G_j - G_{rj}) + (L_{jr}(R) - L_{tr}(R)) \quad [\text{dB}]$$

Kaavasta nähdään, että häirinnän tehoa voidaan laskea lisäämällä hyötysignaalin lähetysteho tai viestijärjestelmän antennivahvistusta tai lyhentämällä viestitysetäisyyttä. Viestijärjestelmän antennivahvistus on mukana myös termissä G_{rj} , eli vastaanottimen antennivahvistuksessa häirintälähtetimen suuntaan. Jos häirintäjärjestelmän voidaan olettaa häiritsevän viestijärjestelmän sivukeilassa, jonka suuntaan vahvistus on $G_s - \text{SLL}$ (SLL = sivukeilatase, side-lobe level), saadaan

$$\frac{S}{J} = (P_t - P_j) + (G_s - G_j + \text{SLL}) + (L_{jr}(R) - L_{tr}(R)) \quad [\text{dB}]$$

Kaavalla voidaan laskea myös tapaus, jossa häirintä kohdistuu viestijärjestelmään pääkeilan suunnassa merkitsemällä $\text{SLL} = 0$. Mikäli molemmilla lähettimillä on näköyhteysreitti (LOS, Line Of Sight) vastaanottimeen, saadaan hyöty/häirintäsignaalisuhteeksi:

$$\frac{S}{J} = (P_t - P_j) + (G_s - G_j + \text{SLL}) + 20 \cdot \log\left(\frac{R_{jr}}{R_{tr}}\right) \quad [\text{dB}]$$

Jos molemmat taas toimivat ilman näköyhteysreittiä (NLOS, Non-LOS), niin molempien yhteysvälivaimennuksen voidaan olettaa kasvavan etäisyyden neljanteen potenssiin verrattuna. Tällöin hyöty/häirintäsignaalisuhteeksi saadaan:

$$\frac{S}{J} = (P_t - P_j) + (G_s - G_j + \text{SLL}) + 40 \cdot \log\left(\frac{R_{jr}}{R_{tr}}\right) \quad [\text{dB}]$$

Jos häirintälähtetimen etäisyys on kaksinkertainen hyötylähtetimen etäisyyteen nähden, on häirintätehon (EIRP) oltava LOS-yhteydellä kuusinkertainen ja NLOS-yhteydellä 12-kertainen. Jos etäisyysuhde on 4:1, on häirintätehon oltava LOS-yhteydellä 12-kertainen ja NLOS-yhteydellä 24-kertainen. Jos viestiyhteys lyhennetään puoleen, on häirintälähtetimen tultava vastaavan verran lähemmäs tai lisättävä tehoaan 6-12 -kertaiseksi.

Mikäli viestijärjestelmän signaali etenee NLOS-olosuhteissa ja häirintäsignaali LOS-olosuhteissa, kasvaa häirinnän ulottuvuus huomattavasti. Tämän vuoksi ilmasta suoritettu häirintä on hyvin tehokasta; yhteysvälivaimennus kaukanakin sijaitsevasta häirintä-lähettimestä voi olla samaa luokkaa kuin verrattain lähellä sijaitsevasta viestilähettimestä.

Signaali/häirintäsuhteen lisäksi yhteyden häirittävyys vaikuttaa:

1. Käytetty informaation koodaus- ja modulointimenetelmä
2. Käytetty ilmaisumenetelmä
3. Siirrettävän symbolin kesto
4. Tiedon siirtoon käytettävissä oleva aika
5. Yhteyden redundanttisuus ja käytettävä virheenkorjaus
6. Yhteydellä käytettävä tahdistusmenetelmä

Aiemmissa luvuissa on esitetty bittivirhesuhteen ja normalisoidun signaali-kohinasuhteen välinen riippuvuus eri koodaus- ja modulaatiomenetelmillä. Näiden lisäksi virhesuhteeseen vaikuttaa myös se, käytetäänkö koherenttia vai epäkoherenttia ilmaisua. Mikäli symbolin kesto lisätään (eli siirtonopeutta vähennetään), kasvaa symbolin energia ($E_b = P_r T_b$) jolloin häirintäsignaalin energia pienenee suhteessa hyötysignaaliin. Informaatiota voidaan siirtää hyvinkin huonolla hyöty-/häirintä signaalisuhteella pidentämällä symbolien kesto riittävästi. Käytännössä tiedon siirtoon käytettävissä oleva aika ja tässä ajassa siirrettävän informaation määrä asettaa minimin siirtonopeudelle. Vaikka symbolien kesto olisi rajattu, voidaan samaa symbolia lähettää riittävän monta kertaa, millä saavutetaan käytännössä lähes sama vaikutus kuin pidentämällä yksittäisen symbolin pituutta. Yhteyden redundanttisuus sallii virheenkorjauksen käytön, joka puolestaan mahdollistaa toiminnan normaalia pienemmillä signaali-häirintäsuhteilla.

Mitä enemmän yhteyttä käyttäviltä järjestelmiltä edellytetään tahdistumista, sitä herkempiä ne ovat häirinnälle. Häirintä voidaan keskittää tahdistuksen suistamiseen ja uudelleentahdistuksen estämiseen. Monimutkaisissa järjestelmissä, kuten telejärjestelmissä, joissa on radiolinkkejä, salauslaitteita, kanavointilaitteita ja telekeskuksia, uudelleentahdistuminen saattaa kestää hyvinkin pitkään.

Häirintäjärjestelmän kannalta on olennaista kyetä jakamaan häirintäteho optimaalisesti taajuus- ja aikatasoissa sekä avaruuskulmassa; häirintälähtetimen kannattaa käyttää vain niin pientä tehoa kullakin häirittäväällä taajuudella, että häirintä juuri ja juuri riittää katkaisemaan yhteyden. Kun yhteys on saatu poikki, häirintä voidaan lopettaa ja siirtyä uudelle taajuudelle häiritsemään jotakin toista yhteyttä. Häirintälähtetimen on kuitenkin yleensä erittäin vaikea tietää, milloin sen lähteen aiheuttama tehotiheys riittää hyötylähtetimen häirintään. Viestijärjestelmältä – erityisesti kenttätelejärjestelmiltä – kestää yleensä jonkin aikaa ennen kuin katkaistu yhteys saadaan muodostettua uudelleen. Vaikka yhteyttä ei kannata häiritä

pidempää aikaa kuin mitä sen katkaisemiseen tarvitaan, saattaa häirintäjärjestelmän olla vaikeata tunnistaa milloin se on kyennyt suistamaan vastaanottimen synkronoinnin. Tämä pakottaa sen häiritsemään jatkuvasti.

Adaptiivisilla antenneilla voidaan optimoida häirintätehon jakautuminen avaruuteen; vain sellaisia sektoreita, joilla on vastaanotin, kannattaa häiritä. Ongelmaksi muodostuu tällöin se, että vain aktiiviset lähetinvastaanottimet paljastuvat elektronisen tiedustelun järjestelmille. Jos häirintäjärjestelmän on esimerkiksi häiritävä 180 x 10 asteen sektorissa sijaitsevia vastaanottimia, on sen antennivahvistus maksimissaan 13,6 dB, mutta jos häirintä kyetään keskittämään esimerkiksi 10 x 10 asteen sektoriin, kasvaa antennivahvistus lähes kymmenellä desibelillä 26,2 dB:iin. Siten häirintäteho olisi kymmenkertainen koko sektorin häiritsemiseen verrattuna. Toisaalta sektorin kaventaminen johtaa siihen, että häirintälähetin kykenee häiritsemään kerrallaan vain yhtä osaa taistelukentästä. Mikäli häirintäjärjestelmällä pyritään vaikuttamaan lähetysvastaanottiin, pystyy häirintäjärjestelmä ainakin teoriassa seuraamaan aktiivista vastaanotinta ja kohdistamaan häirintätehonsa havaitsemiinsa radiolaitteisiin.

Vastatoimenpiteet häirinnälle

Häirinnän vastatoimenpiteet voidaan jakaa rakenteellisiin keinoihin sekä käyttökeinoihin. Ensin mainittuja voidaan käyttää järjestelmän vaatimusmäärittelyssä ja teknisessä suunnittelussa. Niiden tarkoituksena on rakentaa teknisesti mahdollisimman hyvin häirintää ja tahattomia häiriöitä sietävä järjestelmä. Rakenteellisia keinoja ovat esimerkiksi:

1. Häirintäjärjestelmän pakottaminen jakamaan häirintätehonsa mahdollisimman laajalle kaistalle taajuushypinnällä tai suorasekvenssihajaspektritekniikalla (spektraalinen etu).
2. Häirintäjärjestelmän pakottaminen häiritsemään yhteyttä jatkuvasti käyttämällä valesatunnaista bittilomitusta ja virheenkorjausta tai aikahypintämenetelmää (temporaalinen etu).
3. Lähetystehon lisääminen siten, että hyötysignaali peittää häirintäsignaalin vastaanottimella (ns. burn-through). Menetelmän heikkoutena on kuitenkin se, että suuri lähetysteho paljastaa lähettimen ja viestiyhteyden olemassaolon vihollisen elektroniselle tiedustelulle. Lähetystehon lisääminen häirinnän seurauksena paljastaa lisäksi häirinnän tehoamisen viholliselle.
4. Antennivahvistuksen lisääminen vastaanottimen suuntaan. Jos esim. siirrytään käyttämään monopoliantennin sijasta pitkälanka-antennia sekä lähettimessä että vastaanottimessa, vahvistus kasvaa 2 x 2,5 dB:stä 2 x 10 dB:iin, eli 5 dB → 20 dB. Tämän 15 dB:n parannuksen kompensoimiseksi häirintäjärjestelmän on lisättävä häirintätehoa yli 30-kertaiseksi tai siirryttävä lähemmäksi häiritävää vastaanotinta.
5. Ohjataan antennin vahvistuskuvion minimi häirintälähetintä kohti. Tämä voidaan tehdä manuaalisesti suuntaavien antennien avulla tai elektronisesti vaiheohjatuilla antenniryhmillä.
6. Kasvatetaan normalisoitua signaali-kohinasuhdetta E_b/N_o pienentämällä siirtonopeutta R_b joko laskemalla modulointinopeutta tai lähettämällä samaa symbolia useita kertoja.
7. Priorisoidaan ja tiivistetään siirrettävä data, jotta siihen voidaan lisätä redundanttisuutta ja käyttää virheenkorjausta.

8. Väistetään häirintää etsimällä häirinnästä vapaita kanavia. Menetelmän ongelmana on se, että samalla paljastetaan häirinnän tehoaminen. Siirryttäessä taajuudelta toiselle siirtoyhteys katkeaa, ja kestää jonkin aikaa ennen kuin keskeytynyttä siirtoa voidaan taas jatkaa. Häirintäjärjestelmä kykenee käyttämään tämän ajan hyväkseen siirtymällä häiritsemään muita yhteyksiä ja seuraamalla perästä valitulle vapaalle kanavalle vasta kun yhteys on saatu muodostettua uudelleen.

Järjestelmän käyttöön liittyviä keinoja häirinnän väistämiseksi ovat esimerkiksi:

1. Suunnitellaan viestiverkko siten, että yhteysväli on riittävän lyhyt. Maasta suoritettavan häirinnän etenemisvaimennus on yleensä verrannollinen etäisyyden neliöön. Siten yhteysvälin lyhentäminen pakottaa häirintäjärjestelmän tulemaan vastaavan matkan lähemmäs tai lisäämään tehoa suhteessa $(R_1/R_2)^4$, jossa R_1 on alkuperäinen vastaanottimen etäisyys lähettimestä ja R_2 lyhennetty etäisyys, Jos vastaanotin on alunperin 10 km etäisyydellä lähettimestä ja yhteyttä lyhennetään 8 kilometriin, on häirintälähtetimen lisättävä tehoa 2,4-kertaiseksi.
2. Maksimoidaan etenemisvaimennus häirintälähtetimen suuntaan käyttämällä korkeampia taajuuksia ja sijoittamalla vastaanotin siten, että sen ja häirintälähtetimen välissä on mahdollisimman suuria maastoesteitä – korkeilla taajuuksilla myös kasvillisuus tuo suojaa.
3. Suunnitellaan viestiverkko siten, ettei suuntaavien antennien pää-, sivu- tai takakeiloja kohdistu suurimpiin uhkasuuntiin. Esimerkiksi linkkiverkko tulisi suunnitella vinosti häirintälähtetimen todennäköisimpiä suuntia kohtaan. Tällöin linkkien pääkeilat eivät suuntaudu häirintälähtetimiin päin.
4. Häirinnän tehoamista ei saa paljastaa. Koska häirintäjärjestelmä ei kykene itse mittaamaan hyöty/häirintäsignaalisuhdetta vastaanottimella, sen on perustettava häirintätaktiikkansa viestijärjestelmästä sieppaamiensa signaalien analysointiin. Mikäli häiritetty viestijärjestelmä lisää lähetystehoa, vaihtaa toiselle taajuudelle tai laskee modulointinopeutta, häirintäjärjestelmä tietää häirinnän tehonneen. Tällöin sen ei kannata lisätä häirintätehoa, vaan käyttää ylimääräinen teho jonkin toisen yhteyden häiritsemiseen. Jos viestilähtetimen käyttöä jatketaan samaan tapaan kuin ennen häirinnän tehoamista, häirintälähtetimen joko jatkaa häirintää tietämättä sen tehoamista tai lakkaa häiritsemästä sitä ja siirtyy toiselle taajuudelle. Edellisessä tapauksessa osa häirintälähtetimen tehosta sitoutuu tämän yhteyden häirintään ja on poissa jonkin muun yhteyden häirinnästä. Ja jälkimmäisessä tapauksessa tuloksena on häirinnän päättyminen.
5. Suuren lähetystehon vuoksi häirintälähtetimen voidaan paikantaa elektronisesti suurella tarkkuudella. Tällöin se voidaan myös tuhota esimerkiksi epäsuoralla tulella. Tämän vuoksi häirintäjärjestelmät rakennetaan liikkuviksi.
6. Vaihtamalla käyttötaajuuksia riittävän usein sekä lähettämällä informaatio lyhyinä purskeina voidaan tiedustelu- ja häirintäjärjestelmien toimintaa haitata. Mikäli järjestelmän taajuuksia vaihdetaan nopeammin kuin vihollinen kykenee havaitsemaan ne ja siirtämään havaitut taajuudet tiedustelujärjestelmästä häirintäjärjestelmälle, voidaan häirintä väistää kokonaan tai pakottaa vihollinen häiritsemään laajalla kaistalla, jolloin häirinnän tehoteho spektrissä laskee. NykYTEKNIKALLA lähetet kyetään kuitenkin havaitsemaan ja suuntimaan mikrosekunneissa sekä siirtämään häirintäjärjestelmälle millisekunneissa ja aloittamaan häirintä. Siten taajuuksien vaihto ja purskemuotoinen lähetys ei tuo suurta suojaa nykyisiltä tiedustelu- ja häirintäjärjestelmiltä.

Nykyaikaisessa sodankäynnissä käytettävät viestijärjestelmät ovat niin monimutkaisia ja automaattisia, ettei käyttöhenkilöstö voi olla täysin varma siitä, miksei yhteys synny. Tällöin häirintää epäillään liian helposti tai sitten sitä ei osata tunnistaa laisinkaan. Optimaalinen häirintäjärjestelmä ei paljasta olemassaoloaan, jolloin käyttäjä ei voi olla varma siitä, miksei yhteys synny tai miksi yhteydellä on liian paljon siirtovirheitä, vaikka vastaanotettavan signaalin taso olisi riittävä. Häirinnän väistämiseksi ensisijainen ongelma onkin hallita viestijärjestelmän käyttö niin hyvin, että käyttövirheet voidaan jättää ottamatta huomioon yhteysongelmia ratkottaessa. Toissijaisena ongelmana on tunnistaa häirintä. Hyvin harvat sotilasviestijärjestelmäkään osaavat ilmaista häirinnän olemassaoloa, vaikka teknisesti olisi suhteellisen yksinkertaista lisätä vastaanottimiin tällainen ominaisuus. Esimerkiksi vastaanottimeen kuuluvan ympärisäteilevän suoja-antennin avulla voidaan ilmaista sivukeilasta tuleva häirintä. Vasta kun häirintä on todettu syyksi yhteyden katkeamiseen, voidaan ryhtyä tehokkaisiin toimenpiteisiin häirinnän väistämiseksi. Usein vastatoimenpiteet kuitenkin paljastavat häirinnän tehonneen. Tällöin joudutaan tekemään päätös siitä, paljastetaanko häirinnän tehoaminen ja yritetään saada yhteys jälleen aikaan vai korvataanko yhteys jollakin muulla ja odotetaan häirintäjärjestelmän siirtyvän muualle tai lasketaan sen varaan, että häirintäjärjestelmä sitoutuu kyseisen yhteyden häiritsemiseen. Taktisissa järjestelmissä aika on yleensä niin kriittinen tekijä, että yhteyttä on koetettava muodostaa uudelleen, vaikka samalla paljastettaisiin häirinnän teho. Päätös on kuitenkin tehtävä aina tapauskohtaisesti.

YHTYMÄN VIESTIJÄRJESTELMÄ

Yhtymän viestijärjestelmällä tarkoitetaan yhtymän eri viestijärjestelmien muodostamaa kokonaisuutta, jonka tehtävänä on taata käytännössä prikaatin tietoliikennetarpeet. Saumattomasta integroidusta yhtymän viestijärjestelmästä käytetään tässä kirjassa nimitystä yhtymän tietoliikennealusta. Yhtymän viestijärjestelmä voi sisältää useita erilaisia tietoliikennejärjestelmiä, kuten:

- kenttäteleverkko ja solukkoverkko
- useita HF-, VHF- ja UHF-komentoradioverkkoja
- lukuisia VHF- ja UHF-lähiradioverkkoja
- sanomalaiteverkko
- tilannetiedon jakelu- ja tilanneilmoitusverkko
- komentopaikkojen ja esikuntien lähiverkot
- satelliittitietoliikennejärjestelmä

Yhtymän viestijärjestelmä rakentuu armeijakunta-prikaatitasalla kenttäteleverkon ja prikaatijoukkueetasalla kenttäradioverkon ympärille. Joukkue-ryhmätasalla voidaan käyttää lähiradioverkkoja. Suomalaisessa tietoliikennekonseptissa käytetään kotimaista sanomalaitejärjestelmää kaikilla hierarkiatasoilla aina joukkueetasalta ylijohtoon saakka. Solukkoverkkoja voidaan taktisiin järjestelmiin rakentaa sotilas- tai siviiliteknikkaan tukeutuen.



Kuva 89: Patrian XA-202 viestijärjestelmäajoneuvo Lapissa. (Patria)

Seuraavissa luvuissa käsitellään tarkemmin yhtymän viestijärjestelmän eri komponentteja. Aluksi tarkastellaan radiojärjestelmiä ja radiotekniikkaa, sen jälkeen kenttätelejärjestelmiä, solukoverkkoja, trunking-järjestelmiä ja lopuksi satelliittijärjestelmiä sekä taktisten viestijärjestelmien yleisiä kehityspiirteitä. Tämän luvun tarkastelussa on keskitytty taistelukentälle taktiseen käyttöön tarkoitettuihin tai taktisessa käyttötarkoituksessa todennäköisesti käytettäviin järjestelmiin. Siten esimerkiksi pitkän kantaman strategiset tiedonsiirtojärjestelmät ja yleisradiotyypiset jakelujärjestelmät on jätetty käsittelemättä.

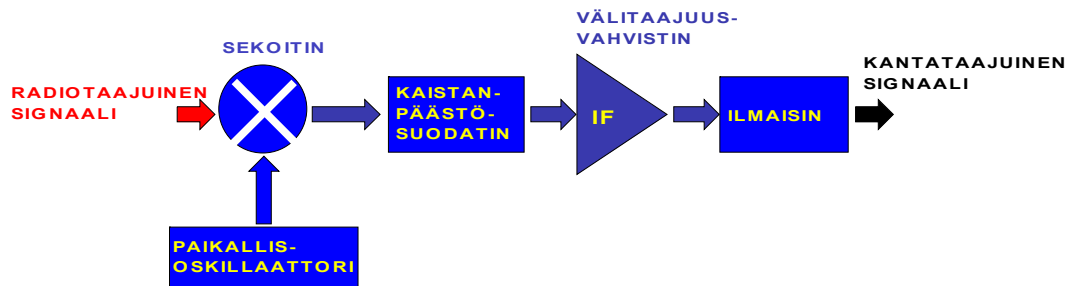
RADIOJÄRJESTELMÄT

Radiovastaanotin

Viestijärjestelmissä käytetään yleisimmin käytetään niin sanottua supervastaanotinta (superheterodyne receiver) sen erittäin hyvän herkkyuden ja selektiivisyyden vuoksi. Supervastaanotimessa paikallisoskillaattorin (LO, Local Oscillator) generoima signaali, jonka taajuus on f_{LO} sekoitetaan sekoittimessa (mixer) vastaanotettuun radiotaajuiseen signaaliin (f_s). Sekoitusprosessissa syntyy kaksi signaalikomponenttia näiden erotustaajuuksille: $f_{IF} = f_{LO} \pm f_s$. Näistä välitaajuutena voidaan käyttää kumpaa tahansa (alas sekoitus, down conversion: $f_{IF} = f_{LO} - f_s$, ylös sekoitus, up conversion: $f_{IF} = f_{LO} + f_s$). Valinta tehdään välitaajuussuodattimella, joka päästää läpi vain valitun välitaajuuskaistan. Tämän jälkeen välitaajuinen signaali vahvistetaan ennen ilmaisua. Koska IF-vahvistin toimii kiinteällä kaistalla, sen vahvistus ei riipu tulevan signaalin taajuudesta¹³. Vahvistuksella signaalin tasoa nostetaan

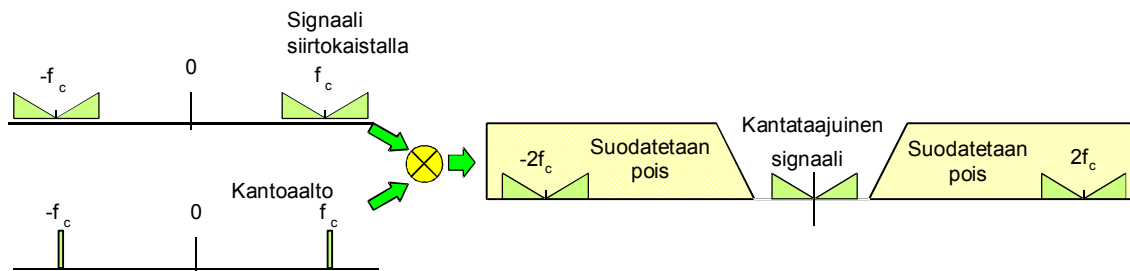
¹³ Suuri välitaajuus johtaa heikkoon selektiivisyyteen ja huonoon kanavien erottelukykyyyn. Pieni välitaajuus puolestaan johtaa peilitaajuusvaimennuksen heikentymiseen. AM-radiovastaanotimissa välitaajuus on yleensä

riittäväksi ilmaisimelle ja suodatuksella rajoitetaan kohinan kaistanleveys signaalin kaistaa vastaavaksi. Signaalitaso nousee ja kohinataso laskee, jolloin vastaanottimen herkkyys paranee.



Kuva 90: Supervastaanottimen tärkeimmät rakenneosat ja toimintaperiaate. Sekoitin on usein ensimmäinen komponentti mikroaaltjärjestelmissä, mutta sitä voi edeltää kaistanpäästösuodatin ja pienikohinainen radiotaajuinen esivahvistin (LNA, Low Noise Amplifier).

Välitaajuus on yleensä kiinteä, joten vastaanottotaajuuden valinta tapahtuu paikallis-oskillaattorilla. Paikallisoskillaattori on useimmiten vaihelukittu puolijohdeoskillaattori, jonka taajuutta muuttamalla voidaan valita laajakaistaisesta radiotaajuisesta signaalista haluttu osa ilmaisimelle.



Kuva 91: Sekoitettaessa vastaanotettu signaali kantaaltoon f_c , saadaan signaalikomponentteja taajuuksille $\pm N \cdot f_c$, joista kantataajuuden ($N=0$) ulkopuolella olevat signaalit suodatetaan pois. Käytännössä radiovastaanottimissa signaali siirretään yhdelle tai useammalle välitaajuudelle ennen lopullista siirtoa kantataajuudelle.

Sekoittimessa muodostuu edellä mainittujen kahden taajuuden lisäksi useita valetaajuuksia¹⁴, jotka häiritsevät ilmaisimen toimintaa. Jotta nämä taajuudet eivät pääsisi ilmaisimelle, pyritään IF-kaista pitämään mahdollisimman kapeana. Kapea IF-kaista rajoittaa lisäksi kohinatasoa ja parantaa vastaanottimen selektiivisyyttä.

455 kHz, FM-yleisradiovastaanottimissa (88-108 MHz) se on 10,7 MHz ja mikroaaltjärjestelmissä 1-10 GHz alueella useimmiten 30, 60 tai 70 MHz.

¹⁴ Valetaajuuksia syntyy radio- ja LO-signaalin harmonisista monikerroista taajuuksille $\pm N \cdot f_s \pm M \cdot f_{LO}$. Näistä pahimmat ovat kolmannet valetaajuudet $2 \cdot f_s - f_{LO}$ ja $2 \cdot f_{LO} - f_s$, jotka saattavat olla IF-kaistan sisällä. Tällöin ne pääsevät ilmaisimelle. Kun tulosignaalin taso kasvaa riittävän suureksi, ne ovat riittävän vahvoja sotkemaan ilmaisimen toimintaa.

Radiovastaanottimen tärkeimmät parametrit ovat:

- Herkkyys kertoo pienimmän signaalitason. Tangentiaalinen herkkyys (tangential sensitivity) kuvaa sitä signaalitasoa, jolla signaali on ($M=5-6$ dB) yli kohinatason. Herkkyys riippuu laitteen pohjakohinatasosta, joka määräytyy ilmaisinta edeltävien komponenttien ominaisuuksista. Jos käytetään tangentiaalista herkkyyttä, pienin sallittu signaaliteho ilman tehomarginaaleja saadaan kaavasta:

$$S_{\text{dBm}} := -174 + 10 \cdot \log(B) + F + M$$

jossa B on kohinakaistanleveys ja F kohinaluku desibeleinä.

Toiminnallinen herkkyys (operational sensitivity) puolestaan kuvaa pienintä signaalia, jolla laitteen muut luvatut arvot täyttyvät. Toiminnallinen herkkyys riippuu laitteen pohjakohinatasosta N [dBW] ja vaadittavasta signaali-kohinasuhteesta SNR_{min} [dB]:

$$S_{\text{min}} = N + \text{SNR}_{\text{min}} \text{ [dB]}$$

Laitteen pohjakohinataso saadaan kaavasta:

$$N = k \cdot T \cdot B \cdot F, \text{ jossa } F \text{ on kohinakerroin ja } B \text{ on kohinakaistanleveys.}$$

Jos kaista ilmaistaan megahertseinä ja kohinaluku desibeleinä, saadaan kohinataso dBm:nä kaavasta:

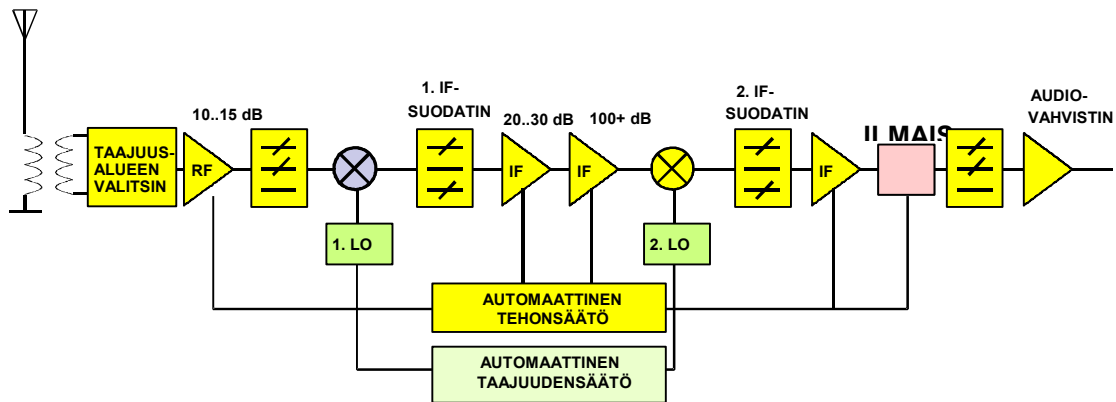
$$N = -114 + 10 \cdot \lg(B_{\text{MHz}}) + F_{\text{dB}} \text{ [dBm]}$$

Kohinakaista riippuu vastaanottimen toteutuksesta. Ideaalitapauksessa se on sama kuin välitaajuuskaistan leveys (B_{IF}), mutta joissakin vastaanottimissa se voi olla jopa $1,5 \cdot B_{\text{IF}}$.

- Kohinaluku (noise figure) kertoo, kuinka paljon laite aiheuttaa signaaliin lisäkohinaa. Kohinaluku ilmoitetaan desibeleinä ja sitä vastaa lähtö- ja tulosignaali-kohinasuhteiden suhteena ilmoitettava kohinakerroin (noise factor).
- Peilitaajuuden vaimennuksella tarkoitetaan sitä, kuinka paljon peilitaajuudella oleva antenniliittimestä tuleva signaali vaimenee ennen ilmaisinta.
- Selektiivisyydellä (selectivity) tarkoitetaan vastaanottimen kykyä ottaa vastaan vain kulloinkin toimittavalla kanavalla oleva signaalienergia ja hylätä muiden kanavien mahdollisesti voimakkaatkin lähteet. Selektiivisyys määräytyy pääosin IF-suodattimesta, joka estää kanavan ulkopuolisen signaalin pääsyn eteenpäin.
- Viereisen kanavan vaimennus (adjacent channel rejection) kuvaa IF-suodattimen kykyä heikentää viereisellä signaalikanavalla olevaa tehoa ennen ilmaisinta. Asia voidaan ilmaista myös suurimpana siedettynä signaalitasona viereisellä kanavalla.
- Dynaaminen alue (dynamic range) kuvaa suurimman ja pienimmän signaalin välistä eroa, eli sitä signaalitasoa, jolla vastaanotin kykenee toimimaan ilman erillistä vaimennusta tai signaalin esivahvistusta.. Dynaamisen alueen alapää määräytyy laitteen herkkyyden mukaan. Yläpää, eli suurin siedettävä signaali, määräytyy IF-suodatinta edeltävien komponenttien epälineaarisuuden mukaan. Sekoittimen sekä vahvistinten epälineaarisuus korostuu suurilla signaalitasoilla ja tämän vääristymän sieto asettaa ylärajan tulosignaalin

tasolle. Tyypillisesti käytetään 1 dB kompressiopistettä, joka kertoo sen kuinka suurella tulosignaalitasolla lähtösignaali eroaa 1 dB (eli 10%) lineaarisesta optimivasteesta.

- Kyky ilmaista erilaisia modulaatioita (AM, DSB, SSB, FM jne.) on nykyaikana tärkeä erilaisten radiojärjestelmien suuren lukumäärän vuoksi.



Kuva 92: Esimerkki kahdella välitaajuudella varustetun vastaanottimen lohkoakaaviosta.

Edellä on kuvattu yksinkertaisen supervastaanottimen toimintaperiaate ja rakenne varsin yleisellä tasolla. Käytännössä vastaanotin voi sisältää useampia tuloasteita eri taajuusalueille, taajuusalueiden vaihtopiirit, useita välitaajuuksia¹⁵, kohinasalvan¹⁶ sekä radion ohjaukseen, kuten tehon ja taajuuden säätöön, antennin viritykseen yms. tarvittavia piirejä.

Ohjelmistoradio

Ohjelmistoradiolla (software radio) tarkoitetaan radiolaitetta, jossa toiminnot, kuten taajuuden muodostus, signaalin suodatus yms. on toteutettu ohjelmistollisesti, eikä kiinteillä elektronisilla piireillä niin kuin perinteisissä radioissa. Ohjelmistoradion laitteisto (hardware) perustuu yksinkertaisiin, mutta erittäin nopeisiin signaaliprosessoreihin (DSP, Digital Signal Processor) ja analogia/digitaalimuuntimiin (ADC, Analog-to-Digital Converter), digitaal/analogiamuuntimiin (DAC, Digital-to-Analog Converter). Radiosignaalin muodostaminen tehdään digitaalisella signaalinkäsittelyllä. Täydellisessä ohjelmistoradiossa signaali muunnetaan suoraan radiotaajuisesta digitaaliseen muotoon. Myös laitteen analogisten piirielementtien, kuten vahvistimien ja antennisovitinpiirien ominaisuudet ovat ohjelmistollisesti muunneltavissa. Ohjelmoitavassa radiossa (software defined radio) toiminta perustuu ohjelmistollisesti asetettaviin logiikkapiireihin.

Digitaalitekniikan tämänhetkinen taso (2013) mahdollistaa rajoitetusti suoran radiotaajuisen signaalin digitoinnin, joskin radiolaitteen riittävän dynamiikan säilyttämiseksi digitointi toteutetaan yhden tai kahden välitaajuuden (IF) kautta. IF-aste on vastaanottimen ensimmäinen

¹⁵ Esimerkiksi kahta välitaajuutta käytettäessä (double conversion) signaali sekoitetaan ensin useita megahertsejä olevalle välitaajuudelle ja sitten noin 1 MHz taajuudelle. Ensimmäinen korkea välitaajuus siirtää peilitaajuuden mahdollisimman kauas toimintataajuudelta, millä saavutetaan hyvä peilitaajuuden vaimennus. Toinen välitaajuus on pieni hyvän selektiivisyyden ja kanavien erottelukyvyn aikaansaamiseksi.

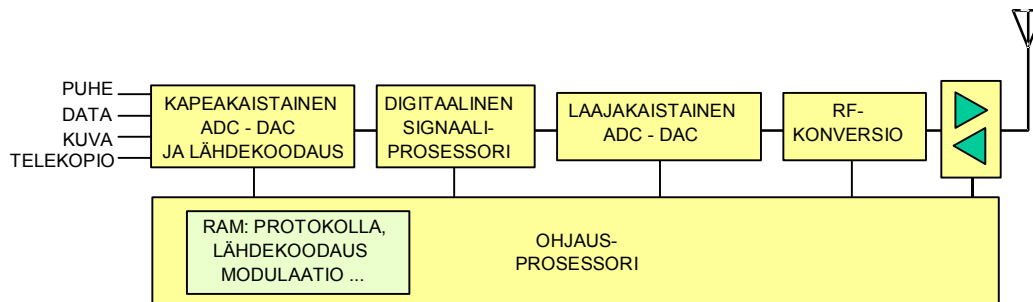
¹⁶ Kohinasalvalla tarkoitetaan piiriä, joka estää signaalin vahvistuksen, mikäli kantoaalto puuttuu. Tällä estetään automaattisella vahvistuksen säädöllä varustetuissa vastaanottimissa vahvistuksen kasvaminen signaalin puuttuessa ja lisätään paristoilla varustettujen vastaanottimien toiminta-aikaa pakottamalla vastaanotin lepotilaan silloin kun tulevaa signaalia ei ole.

digitaalinen komponentti, joka pitkälti määrittää radion suorituskyvyn. Tulevaisuuden kehitystyön pyrkimyksenä on muuttaa signaali suoraan digitaalisesta muodosta radiotaajuiseksi ja radiotaajuisesta digitaaliseksi.



Kuva 93: Vasemmalla ohjelmistoradiodemonstraattorin laitteisto ja oikealla radion adaptiivinen antenni kiinnitettynä tilapäisvirityksin rannikkolinnakkeelle mittauksia varten. [Elektrobit]

Ohjelmistoradion etuna on sen joustavuus: kaikki sen tärkeimmät ominaisuudet voidaan muuttaa ohjelmistollisesti. Siten radion siirtokapasiteettia, siirtokaistaa, käytettyä modulaatiota ja muita ominaisuuksia voidaan muuttaa ilman laitteistomodifikaatioita. Radiossa voi olla useita eri toimintakaistoja ja toimintatiloja, joten sitä voidaan käyttää monipuolisesti erilaisiin tarkoituksiin (multiband, multimode, multirole). Uusi toiminto voidaan ottaa käyttöön suoraan radion sisäisenä toimenpiteenä, ladata älykortilta tai siirtää radioteitse. Radio kykenee siten toimimaan samanaikaisesti useilla eri aaltoalueilla ja useissa eri radiojärjestelmissä. Toinen keskeinen tekijä on radion modulaarisuus: radion osia ja toimintoja voidaan vaihtaa toisiin ilman tarvetta rakentaa uutta radiota tai kehittää ohjelmistoa kokonaan uudelleen .



Kuva 94: Digitaalitekniikalla toteutetun ohjelmistoradion karkea lohkokaavio.

Ohjelmistoradion kognitiivisuus perustuu signaaliympäristön laajaan havainnointiin sekä älykkäisiin itseoppiviin algoritmeihin. Se ei kuitenkaan ole ohjelmistoradioteknologian ominaisuus, vaan toiminnallisuus, jonka ohjelmistoradioteknologia mahdollistaa. Kognitiivisuus mahdollistaa aaltomuodon parametrien sovittamisen tiedonsiirtotarpeita ja ympäröivää sähkömagneettista spektriä vastaavaksi. Sovittautumistarpeet voivat perustua esimerkiksi suojautumiseen radiotiedustelua ja havaitsemista vastaan. Tällöin esimerkiksi hypytysnopeutta kasvattamalla tai hajoituskoodin chippinopeutta kasvattamalla parannetaan suojausta. Toisessa tilanteessa sovittautumisen tavoitteena voi olla toimintavarmuus häiriöllisessä tai häirityssä ympäristössä. Tällöin virheenkorjausta vahventamalla parannetaan suojausta, mutta samalla tiedonsiirron hyötynopeus pienenee. Jotta ohjelmistoradioista saadaan kaikki hyöty irti, myös radioverkkojen toiminnallisuudet, toimintatavat sekä tekniikat on suunniteltava niitä hyödyntäviksi.

Ohjelmistoradioiden mahdollistama eri radioiden välinen yhteensopivuus ja yhteentoimivuus ovatkin ensisijaisesti poliittinen ja vasta toissijaisesti teknologinen kysymys. Nykyaikana käytettävä teknologia ja toteutustapa mahdollistavat kaiken sen mitä poliittisella tasolla kyetään sopimaan.

VHF-kenttäradiot

Kenttäradio on liikkuvaan sodankäyntiin tarkoitettu liikkeessä toimiva sotilasradio. Kenttäradiot toimivat tyypillisesti alemmalla 30-88 MHz välisellä VHF-kaistalla, jossa on saavutettu hyvä kompromissi eri vaatimusten (koko, paino, kantama, tiedonsiirtonopeus ja tehonkulutus) suhteen. Radiolta vaadittu pitkä kantama edellyttää pientä etenemisvaimennusta, eli suhteellisen matalan taajuuden käyttämistä. Toisaalta koko, paino ja siirtokapasiteetti puoltavat korkean taajuuden käyttämistä. Alemmalla VHF-kaistalla on voitu saavuttaa useiden kymmenien kilometrien kantama kannettavilla lähetimillä, joiden toiminta-aika mukana kannettavalla paristolla on riittävän pitkä. Siirtokapasiteetti on jäänyt toissijaiseksi tekijäksi; järjestelmät on rakennettu yhden puhujan tunnistamiseen riittävän puheyhteyden mukaan.

Valmistaja	Tyyppi	Maa	Taajuus	Nopeus	Kanavia	Lähtöteho	EPM	Salaus	GPS
ASELSAN	PRC-9600	Turkki	30 – 108	16 kbps	3120	100 μ W- 5 W	FH	on	ei
ASELSAN	VRC-5111	Turkki	225 – 400	64 kpbs	11	50 W	SS	on	on (4)
Datron	PRC2100V	USA	30-88	57,6 kbps	4640	10 – 75 W		on	on
Harris	PRC117D	USA	30 – 420 (1)	16 kbps	8	10 W	PWR	on	ei (2,3)
Harris	RF5800	UK	30 – 108	64 kpbs	100	10 – 50 W	FH	on	on
ITT	AN/VRC-90	USA	30 – 87,975	16 kpbs	6 ohjelm	4,5 W	FH	on	on
Rohde&S	XV3088	Saksa	30-88	16 kbps	2320	25 – 50 W		on	ei
Tadiran	PRC710	Israel	30 – 87,98	4,8 kbps	2320	5 W	FH	on	ei
Tadiran	ASARS	Israel	225 – 299,9	16 kbps	3000	1 W	SS		on
Thales	PR4G	Ranska	30 – 88	16 kbps	7 ohjelm.	40 W	FH	on	ei

Selityksiä:
Taajuus Esitetty MHz:na.
Nopeus Kanavan maksimi nettosiirtonopeus datansiirrossa. Yleensä 16 kpbs käsittää FEC-suojattoman synkronisen datan, FEC-suojatun ja asynkronisen datan siirtonopeus on tästä puolet tai alle).
Kanavia Kanavien lukumäärä taajuusalueella tai radioon ohjelmoitavien kanavien määrä.
Lähtöteho Suurin lähetysteho. Tyypillisesti alle 10 W teho tarkoittaa kannettavaa lähetintä ja 10-50 W teho ajoneuvoasenteista lähetintä.
EPM Elektroninen suojausmekanismi: FH = taajuushypintä, SS = suorasekvenssi, PWR = automaattinen lähetystehon säätö.
GPS Integroidun GPS-vastaanottimen olemassaolo.

(1) kolmessa esivalittavassa kaistassa, (2) SATCOM-yhteensopiva, (3) SINGARS-yhteensopiva, (4) ATM-verkkoliityntä

Taulukko 3: Esimerkkejä eri kenttäradioiden toiminnallisista ominaisuuksista [Lähde: Don Herskovitz: *A Sampling of Tactical Transceivers*. Journal of Electronic Defense 1998, Vol 21, Nro 4].

Nykyisin suuri osa radioista asennetaan ajoneuvoihin, jolloin kannettavan pariston koko ja paino ei rajoita radion suurinta lähtötehoa. Myös komponenttitekniikan kehitys mahdollistaa lähetystehojen nostamisen. Nykyisissä VHF-kenttäradioissa maksimi lähetysteho on 5 W luokkaa kannettavissa versioissa ja 40-50 W ajoneuvoasenteisissa. Suuri lähetysteho ei ole aina toivottavaa, sillä se helpottaa järjestelmän havaitsemista ja paikantamista. Eri tyyppisten kenttäradioiden toiminnallisia ominaisuuksia on esitetty taulukossa 3.

Havaitsemisen vaikeuttamiseksi radioiden tulisi olla niin sanottuja LPI-laitteita (Low, Probability of Interception), mikä tarkoittaa käytännössä mahdollisimman pienen lähetystehon käyttämistä sekä hajaspektritekniikoiden soveltamista. Suorasekvenssimenetelmän ongelmien vuoksi nykyisin palveluskäytössä olevat hajaspektrikenttäradiot perustuvat taajuushypintään. Hypintänopeus on noin 200 - 300 hyppyä sekunnissa. Vaikka tekniikka mahdollistaa suuremman hyppynopeuden, on muutama sata hyppyä sekunnissa yleensä katsottu riittäväksi häirinnän väistämiseen käytettäessä radioita massamaisesti.

Suurin järjestelmän sietämä bittivirhesuhde riippuu radiosta ja yhteyden tyyppistä; yleisen käsityksen mukaan puheenssiirrossa nykyiset kenttäradiot kykenevät sietämään noin 40% kanavista olevan häirittyjä. Radiovalmistajat pitävät tarkkaa raja-arvoa salaisena tietona, joten häirittyjen kanavien siedon voitaneen olettaa vaihtelevan 30 – 50 % välillä. Teknisesti voidaan toteuttaa järjestelmiä, joiden häirinnänsieto on tätä huomattavastikin parempi, mutta tällöin yhteyden nettosiirtonopeus laskee olennaisesti.

Suomal. nimi	Taajuusalue	Lähetysteho	Tyypillinen kantama*
LV217		30 – 76 MHz	1-4 W
LV317			30 W
km (LV217+tehonvahvistin)			6-8 km / 15-30 km
LV217M	30 – 88 MHz	0,3 / 2 / 5 W	8-9 km / 22 km
LV317M			50 W
(LV217+tehonvahvistin)			50 km
LV 190		47-57 MHz	0,25 / 1 W
LV665		1,5-30 MHz	5 / 50 W

Taulukko 4: Tärkeimpien Suomessa käytettävien analogisten kenttäradioiden ominaisuuksia.

Nykyisissä digitaalisissa sotilasradioissa puhe on koodattu CVSD-modulaatiolla (Continuous Slope Variable Delta) 16 kbps nopeudella, joka on muodostunut digitaalisissa sotilastietoliikennejärjestelmissä vastaavaksi standardiksi kuin 64 kbps pulssikoodimodulaatio (PCM, Pulse Code Modulation) siviilijärjestelmissä. Datan siirrossa nettosiirtonopeus FEC-virheenkorjauksen jälkeen on yleensä 9600 bps tai pienempi. Yhteensopivuuden takaamiseksi vanhoihin analogisiin kenttäradioihin digitaaliset kenttäradiot kykenevät liikennöimään myös kiinteällä taajuudella analogisella FM-modulaatiolla.

Hyppivätaajuiset kenttäradiot kykenevät ylläpitämään verkkotahdistusta myös radiohiljaisuuden aikana. Ennen pitkää radion sisäinen kello ajautuu kuitenkin eri aikaan ja radion on saatava uusi tahdistus tulevasta läheteestä. Hyppysynkronin säilyvyys radiohiljaisuuden aikana voi olla taattu esimerkiksi 48 tunniksi. Ennen lähetyksen tai vastaanoton alkua radio synkronoituu muuhun verkkoon. Synkronoitumisaika riippuu siitä, kuinka pitkä aika edelliseen läheteeseen on kulunut. Tunnin hiljaisuuden jälkeen synkronoitumisaika on muutamia satoja millisekunteja, mutta jos kellon tahdistus on täysin menetetty, se voi olla jopa kymmeniä sekunteja.

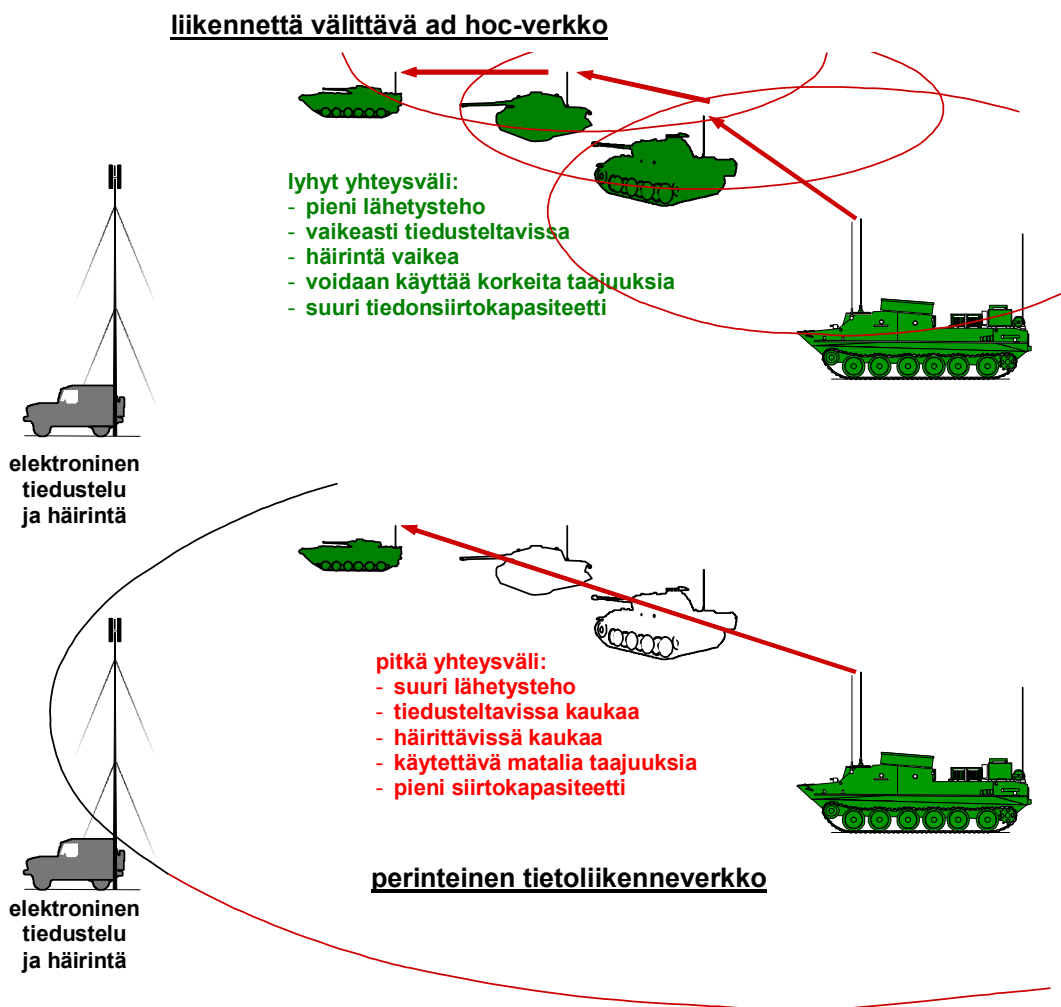


- taajuushypintä: salattu puhe ja data
- kiinteä taajuus: selväkielinen tai salattu puhe
- taajuusalue 30,000 - 107,975 MHz
- 3120 puhe- ja datakanavaa (kanavajako 25 kHz)
- Akku NiCd 12 V tai ulkoinen virtalähde

Kuva 95: Tadiranin hyppivätaajuinen PRC-990 VHF-kenttäradio tärkeimpine ominaisuuksineen [SA-kuva]

Radioiden määrä taistelukentällä on kasvanut, jolloin keskimääräinen kahden radion välinen etäisyys on supistunut. Lyhyempi toimintaetäisyys mahdollistaa korkeamman taajuuden käyttämisen, mikä puolestaan mahdollistaa radioiden siirtokapasiteetin lisäämisen. Yhdessä prosessointikapasiteetin kasvamisen myötä tämä mahdollistaa välitystoiminteen lisäämisen kenttäradioihin. Liikennettä välittävä kenttäradio voi toimia solmuttoman verkon reititys- ja välityselementtinä.

Tietoliikennejärjestelmiltä edellytetty toiminnallinen ja fyysinen hajauttaminen johtaa kohti pienempiä ja älykkäämpiä reitityskykyisiä soluja (SaF, Store-and-Forward). Näistä soluista muodostuu niin sanottu solmuton verkko, jossa kaikki verkon radiolaitteet ovat sekä tiedon lähettäjiä, välittäjiä että vastaanottajia. Pakettiradiotyypisessä kommunikoinnissa yhteys ei muodostukaan kaukana toisistaan sijaitsevien tiedon lähettäjän ja vastaanottajan välille, vaan kaikki yhteysvälillä sijaitsevat radiot osallistuvat informaation välittämiseen. Tällöin keskimääräinen yhteysväli on lyhyempi, mikä mahdollistaa pienempien lähetystehojen käyttämisen, jolloin radioita on vaikeampi havaita ja paikantaa. Pienempi yhteysväli tuo lisäksi suojaa häirintää vastaan. Esimerkiksi viidennekseen supistettu yhteysväli pakottaa häirintälähtetimen lisäämään häirintätehoa 28 dB (yli 600-kertaiseksi) tai siirtymään vastaavan matkan kohti häirittävää järjestelmää. Ilmassa oleva häirintälähtetin joutuu vastaavasti lisäämään tehoaan 14 dB (25-kertaiseksi) tai siirtyä lähemmäs häirittävää kohdetta.



Kuva 96: Välityskykyisillä kenttäradioilla voidaan pienentää yhteysväliä, jolloin suoja tiedustelua ja häirintää vastaan paranee verrattuna perinteisiin radiojärjestelmiin.

Yhtenä solmuttoman verkon ongelmana on se, ettei lähettäjän ja vastaanottajan välille muodostuva yhteys ole lähettäjän eikä vastaanottajan hallittavissa tai keskitetysti ohjattavissa. Tällöin on tärkeätä, että verkon arkkitehtuuri kykenee tarjoamaan riittävän palvelun muuttuvissa verkoissa. Palvelun laadun kannalta olennaisia ovat kuljetus- ja verkkokerroksen ominaisuudet. Kuljetuskerroksen on hallittava sovellusten välinen päästä-päähän tapahtuva palvelun laadun (nettosiirtonopeus, maksimiviive, viipeen sallittu vaihtelu, virheenkorjaus) neuvottelu ja valvonta. Lisäksi kuljetuskerroksen on kyettävä muodostamaan ja hallitsemaan tilaajaryhmiä sekä ryhmäyhteyksiä yhteyden muodostavalta sovellukselta yhdelle tai useammalle vastaanottavalle sovellukselle. Verkkokerroksen tehtäväksi jää sovitun palvelun laatukriteerin täyttäminen joko varaamalla yhteydelle sen tarvitsema kapasiteetti tai priorisoidulla eri yhteydet ja siirtämällä kulloisenkin tilanteen mukaan vain tärkein informaatio. Verkkokerros vastaa lisäksi siirtokaistan optimaalisesta hyödyntämisestä reitittämällä informaatiota tasaisesti eri verkkoelementtien kautta ja hylkäämällä sellainen aikakriittinen informaatio, jota ei voida siirtää sovittujen laatukriteerien mukaisesti.

Radiolta vaadittavan siirtokapasiteetin kasvu johtuu kasvaneista data- ja kuvansiirtovaatimuksista sekä aikomuksista toteuttaa pakettiradiotyyppejä solmuttomia kenttäradioverkkoja. Siirtokapasiteetin lisääminen edellyttää käytännössä toimintataajuuden nostamista. Suurempi taajuus lyhentää radioiden teknistä kantamaa, mutta tuo toisaalta suojaa häirintää vastaan, mikäli häirintälähetin sijaitsee kauempana kuin lähetävä kenttäradio. SaF-kenttäradiot käyttävät joko ylempää VHF-kaistaa tai suurikapasiteettisissa järjestelmissä UHF-kaistaa. Esimerkiksi amerikkalainen murrosajan dataradio NTDR (Near-Term Data Radio) toimii UHF-alueella ja tarjoaa 144 kpbs siirtonopeuden 12 km kantamalla.

GPS-satelliittipaikannusjärjestelmän suosion myötä järjestelmän vastaanotinten hinta on laskenut, ja GPS-järjestelmää hyödyntävien sovellusten määrän kasvamisen myötä on todennäköistä, että yhä useammat radiot varustetaan integroidulla GPS-paikantimella. GPS-vastaanottimella varustettu SaF-radio voi välittää sijaintitietoja automaattisesti esimerkiksi taistelunjohtamis- ja omatunnistusjärjestelmien käyttöön.

Tulevaisuudessa on nähtävissä, että joukkue- ja ryhmätasan yhteydet perustuvat todennäköisesti kaupallisella tekniikalla toteutettuihin keveisiin ja halpuihin lähiradioihin, jotka toimivat verrattain korkeilla taajuuksilla. Korkea taajuus mahdollistaa kuvan siirron taistelujalta toiselle sekä suojaa elektroniselta tiedustelulta ja häirinnältä. Komppania-prikaatitason sekä asejärjestelmien yhteyksissä tukeuduttaneen tulevaisuudessakin suurehkoihin kannettaviin ja ajoneuvo-asenteisiin VHF/UHF-kenttäradioihin.

Joidenkin kehitysvaihtoehtojen mukaan VHF-kenttäradioiden muodostamien SaF-komento-verkkojen yhdistämiseen käytettäisiin suurikapasiteettisia UHF-dataradioita, jolloin kumpikin voitaisiin optimoida omaan käyttötarkoitukseensa. Tällöin jouduttaisiin kehittämään kaksi erilaista radiota, mikä supistuvien hankintakehysten aikana vaikuttaa epärealistiselta vaihtoehdolta. Toisaalta kaupallisen tekniikan hyväksikäyttö voi johtaa erityyppisiin käyttötarkoituksiin optimoitujen radioiden leviämiseen taistelukentälle ja toisaalta ohjelmistoradio-konseptin myötä samaa radiolaitetyyppiä voitaisiin käyttää sekä runko- että liityntäyhteyksien toteuttamiseen.

HF-radiot

HF-radion kantama on pitkä HF-taajuuksien pienen etenemisvaimennuksen ja suuren käytettävissä olevan lähetystehon vuoksi. Kuten jo luvussa *sähkömagneettinen spektri* todettiin,

ionosfääri heijastaa HF-taajuuksia, jolloin voidaan toteuttaa jopa useiden tuhansien kilometrien yhteysvälejä ilman toistimia.

- liikennöintimuodot:
 - kiinteä taajuus: selväkielinen ja salattu
 - kaksitaajuuskäyttö: selväkielinen ja salattu
 - taajuushypintä
 - puhe, sähkötytys (CW), purskedata, data, dig CW
- modulaatio: USB, LSB, AM, CW
- taajuusalue 1,5000 - 29,9999 MHz
- kanavia 2 850 000 (10 Hz:n välein)
- Akku NiCd 5,5 Ah 12 V (LV641) tai ulkoinen virtalähde (LV441)



Kuva 97: Tadiranin PRC-6020 HF-kenttäradio tärkeimpine ominaisuuksineen. [SA-kuva]

Ylin HF-järjestelmässä käytettävissä oleva taajuus (MUF, Maximum Usable Frequency) riippuu ionosfäärin ominaisuuksista sekä säteen ja ionosfäärin välisestä kohtauskulmasta ($MUF = F_N / \cos\theta$). Taajuuden pienentyessä ionosfääriheijastukseen perustuvan yhteyden vaimennus kasvaa ionosfääriheijastuksen tapahtuessa alempana. Samalla kohinataso nousee. Alin mahdollinen taajuus (LUF, Lowest Usable Frequency) määräytyykin suurimman sallitun etenemisvaimennuksen ja kohinatason mukaan. Siten LUF riippuu lähetystehosta (EIRP), mutta MUF vain ionosfääristä ja kohtauskulmasta. Koska yhteysvälin vaimennus kasvaa taajuuden pienessä verrannollisena taajuuden neliöön, on mahdollisimman korkea toiminta-taajuus suotavaa. Yleensä optimaalisena toimintataajuutena (OWF, Optimum Working Frequency) pidetään 85% MUF:sta. Yöllä käyttötaajuudet ovat 4-6 MHz luokkaa ja päivällä $\approx 26-30$ MHz. Laajan kaistan vuoksi myös antennien on oltava laajakaistaisia ja antenni-sovitin on tehtävä huolella.

HF-järjestelmien ongelmina on yhteyden kapeakaistaisuus, epäluotettavuus, vaihteleva laatu sekä kaukaa tulevat häiriöt. Matala taajuus johtaa suurikokoisiin ja kalliisiin antenniratkaisuihin. Lisäksi ionosfäärin häiriötilat voivat haitata tai jopa estää viestiliikenteen tiettyinä ajanhetkinä.

Vastaanotetun radiosignaalin taso vaihtelee häipymisen vuoksi. Osa häipymisestä johtuu ionosfäärin aiheuttamasta signaalin vaiheen vaihtelusta, osa polarisaation muutoksista ja osa taajuusselektiivisistä häipymisistä. Jälkimmäinen johtuu siitä, että signaalin heijastuskorkeus ja signaalipolku riippuu taajuudesta. Tämän vuoksi HF-järjestelmässä SSB-sivukaistamodulaatio toimii DSB:tä paremmin. Häipymisen kompensoimiseksi käytetään erilaisia diversiteettitekniikoita, kuten kahta kaukana ($\approx 10\lambda$) toisistaan sijaitsevaa antennia, taikka useampaa taajuutta, polarisaatiota tai lähtökulmaa.

HF-alueella ilmakehän (lähinnä salamien aiheuttama) kohina on useita kertaluokkia elektrooniikan lämpökohinaa suurempaa. Esimerkiksi HF-alueen alapäässä ilmakehän kohina on 40-80 dB lämpökohinatasa ($=dBkT_0$) ylempänä. Taajuuden kasvaessa ilmakehän kohina vaime-

nee, esimerkiksi 30 MHz alueella se on vain noin 20 dBkT₀. Tämän vuoksi vastaanottimen omalla kohinalla ei ole niin suurta merkitystä kuin korkeammilla taajuuksilla.

Radiolinkit

Nimitystä radiolinkki (radio relay) käytetään Suomessa suurikapasiteettisesta (yleensä) useita kanavia siirtävästä radiojärjestelmästä. Radiolinkit voidaan jakaa

- tekniikkansa puolesta aikajakoisiin (TDM; Time Division Multiplexing) ja taajuusjakoiisiin (FDM; Frequency Division Multiplexing), tai näiden muodostamaan hybridiin.
- siirrettävyytensä puolesta kiinteisiin ja siirrettäviin linkkeihin sekä kenttälinkkeihin
- käyttötarkoituksensa mukaan esimerkiksi runkoverkon linkkeihin, tilaajalinkkeihin ja kenttälinkkeihin.

Kenttälinkit toimivat UHF - EHF taajuuksilla. Sotilasjärjestelmissä on perinteisesti käytetty verrattain matalia taajuuksia pitkän yhteysvälin tavoittelemiseksi. Kuitenkin matala taajuus yhdistettynä taktisen käytön sanelemaan pieneen kokoon johtaa antenniratkaisuihin, jotka eivät ole optimaalisia elektronisen sodankäynnin ominaisuuksien kannalta, sillä sivukeilatavat kasvavat epätoivottavan suuriksi. Moderneissa radiolinkeissä käytetään aikajakotekniikkaa ja vanhemmissa taajuusjakoa. Taulukossa 5 on esitetty eräiden Suomessa käytettävien sotilasradiolinkkien ominaisuuksia.

Radiolinkki	taajuusalue	lähetysteho	antenni	
PL-70	400 MHz	2-10 W	jagi, 14 dB	4, 12 tai 24 kanavaa
FM 200	800 MHz	1-10 W	dipolimatto, 14-15 dB	4-24 kanavaa
RL 420	610-910 MHz	1-15 W	kulmaheijastin, 11 dB	512 tai 1024 kbps
MH 313	1,35-1,85 GHz	1-7 W	paraboliheijastin, 22 dB	256, 512, 1024, 2048 kbps

Taulukko 5: Erilaisten kenttälinkkien ominaisuuksia.

Viestijärjestelmien solmumäärän kasvu on pienentänyt keskimääräisiä yhteysetäisyyksiä. Tämä puolestaan mahdollistaa lyhyen kantaman (20 km) linkkien käyttämisen viestijärjestelmän runkoverkon toteuttamiseen. Mielenkiintoinen kysymys on, voitaisiinko siviilikäyttöön tarkoitettuja SHF-linkkejä hyödyntää myös taktisissa järjestelmissä. COTS-linkit olisivat olennaisesti halvempia kuin sotilaslaitteet, ja ne kykenisivät tarjoamaan taktisen ATM:n ja uusien johtamisjärjestelmien kaipaaman siirtokapasiteetin.

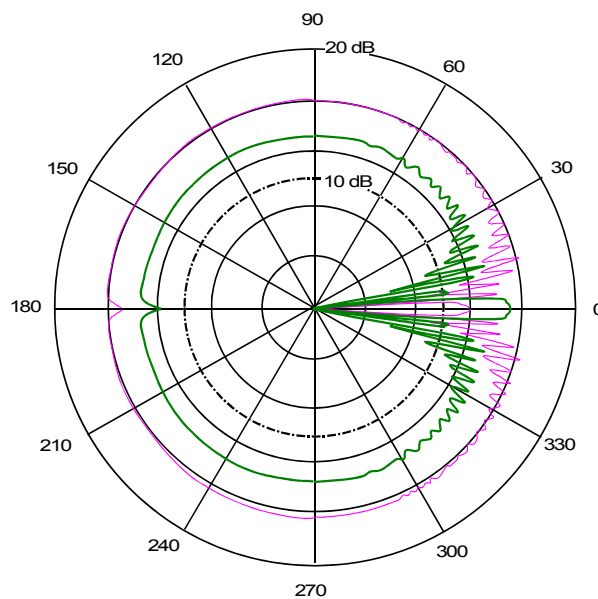
Sääilmiöiden aiheuttamat lisävaimennukset määräävät suurimman käytännöllisen toimintataajuuden. Sopiva taajuus voisi olla esimerkiksi 18 GHz. Pienikokoisella noin 30 cm paraboliheijastinantennilla voidaan saavuttaa 18 GHz:lla 30-35 dB antennivahvistus sekä 50-55 dB etutakakeilasuhde. Toteutettavissa oleva yhteysväli olisi maksimissaan 20 km luokkaa Eurooppalaisessa ilmastossa huonojen sääolosuhteiden vallitessa.

60 GHz taajuusalue on sopiva erittäin lyhyen kantaman radiolinkkisovelluksiin happimolekyylin absorptiopiikin ansiosta. 60 GHz taajuudella ilmakehän ominaisvaimennus on noin 14 dB/km. Tällaisella alueella (58 GHz) toimivan kaupallisen radiolinkin lähtöteho on noin 5 dBm ja integroidun tasoantennin vahvistus 34 dB. Käytännössä hypyn pituus, eli kahden linkin väli, on 1 km luokkaa. Linkkiyhteyden häiritsemiseen pääkeilan suunnassa 5 km etäi-

syydeltä tarvitaan noin 109 dBm EIRP-teho (2,5 W syötettynä 3 m paraboloidiantenniin), joten tällaisen viestijärjestelmän voidaan ajatella olevan suhteellisen hyvin turvassa häirinnältä.

Kuvassa 93 on esitetty erään kaupallisen radiolinkin häiritävyyssektorit häiritessä linkkiä taktisella 30 W häirintälähettimellä. Häirintäjärjestelmä kykenee vaikuttamaan noin ± 18 asteen sektorissa pääkeilaan nähden. Mikäli televerkko sijoitetaan siten, että linkit ovat hieman vinottain rintamatasaan nähden, taktinen häirintälähetin ei kykene lamauttamaan kuin pienen osan linkkijänneistä. Lennokkihäirintäkään ei pure linkkiverkkoon, koska lennokka kykenee häiritsemään vain yhtä tai korkeintaan muutamaa linkkijännettä yhdestä paikasta.

Edellä kuvatun linkin häirintä on mahdollista pääkeilan suunnasta, mutta mikäli pääkeila kyetään suunnittelemaan riittävän kapeaksi, ongelma on vähäinen. Koska häirinnän onnistuminen on epävarmaa, on tärkeätä ettei häirintäjärjestelmä saa palautetta häirinnän toimivuudesta. Tämän vuoksi linkissä tulee olla mahdollisuus asettaa lähetysteho käsin. Automaattinen tehonsäätö ei kuitenkaan pärjäisi tehokilpailussa häirintälähettimelle, mutta paljastaa nopeasti häirinnän tehoamisen. Sateen ja sumun aiheuttama etenemisvaimennuksen kasvu lyhentää suurinta saavutettavissa olevaa yhteysväliä, mutta tuo myös suojaa häirinnältä. Kasvavasta vaimennuksesta on hyötyä aina mikäli häirintälähetin on hyötylähetintä kauempana.



Kuva 98: 10 km päässä oleva 30 W häirintälähetin pystyy pienentämään hyötysignaalin suhteen häirintäsignaaliin alle 12 dB:n vain noin 36 asteen sektorissa linkin pääkeilan suunnassa. Paksumpi vihreä kuvaaja esittää tilannetta, kun linkkijänne on 20 km pitkä ja ohuempi punainen 10 km yhteysväliä.

Elektronisen sodankäynnin kannalta on edullista valinta mahdollisimman korkea toiminta-taajuus, koska tällöin

- pienikokoisilla rakenteilla on saavutettavissa suuria antennivahvistuksia
- antennien suuret sivu- ja takakeilasuhteet tuovat suojaa häirintää vastaan
- yhteysvälivaimennus häirintälähettimeen päin kasvaa

Sääilmiöiden aiheuttamat lisävaimennukset määräävät suurimman käytännöllisen toiminta-
taajuuden, joka taktisilla linkeillä on noin 15 -20 GHz. Sateen ja sumun aiheuttama
etenemisvaimennuksen kasvu lyhentää suurinta saavutettavissa olevaa yhteysväliä, mutta tuo
myös suojaa häirinnältä. Kasvavasta vaimennuksesta on hyötyä aina mikäli häirintälähetin on
hyötylähetintä kauempana.

Elektronisen sodankäynnin asettamat suojavaatimukset sekä ennen kaikkea suunnatun
energian aseiden uhan korostuminen on lisännyt kiinnostusta transmissioyhteyksien toteutta-
miseen laserlinkeillä. Niiden häirintä on vaikeata, vaikei mahdotonta, ja ne tarjoaisivat
erittäin suuren siirtokapasiteetin lyhyen kantaman järjestelmiin. Niiden keskeinen heikkous
on vaatimus täydellisestä näköyhteysreitistä ja aallonpituudesta riippuva herkkyys ilma-
kehässä oleville erilaisille partikkeleille.

SATELLIITTIKOMMUNIKAATIOJÄRJESTELMÄT

Satelliitteja on käytetty sotilasviestiliikenteeseen 50-luvun lopulta saakka, jolloin amerikka-
laiset kokeilivat SaF-tyyppistä SCORE-toistinsatelliittia (Signal Communication Orbiting
Relay Experiment). Nykyisin satelliittiviestijärjestelmiä on käytössä useilla suurvalloilla,
joista esimerkkeinä mainittakoon Britannian Skynet, USA:n MILSTAR (MILlitary, Strategic,
Tactical And Relay system) ja Ranskan Syracuse-järjestelmä.



Kuva 99: COTS-radiolinkki soveltuu hyvin sotilaskäyttöön hyvän ympäristönkeston, luotettavuuden, kapean keilan ja hyvän sivukeilatason sekä halvan hinnan vuoksi. Kuvassa kaksi Ericssonin Minilinkkiä sotilaskäytössä. [SA-kuva]

Pitkän kantaman yhteyksiä voidaan toteuttaa myös ELF- ja LF-alueella, mutta pitkän aallon-
pituuden vuoksi alue ei sovellu taktiseen käyttöön. Taktisesti käyttökelpoiset HF-järjestelmät
mahdollistavat myös pitkiä yhteysvälejä, mutta niiden siirtokaista ja siirtonopeus ovat pieniä
ja yhteys on luonteeltaan epäluotettava. VHF/UHF-alueella puolestaan on käytettävä toistin-

asemia tai rakennettava suurikokoisia ja kalliita troposfäärisironta-järjestelmiä. Tietoliikennesatelliiteilla voidaan saavuttaa pitkiä yhteysvälejä ilman toistimia, toteuttaa laajoja alueita kattavia informaation jakelujärjestelmiä sekä rakentaa koko maapallon kattavia liikkuvan tilaajan järjestelmiä. Satelliittijärjestelmällä voidaan yhdistää suuresta siirtokaistasta johtuva suuri tiedonsiirtokapasiteetti pitkään kantamaan, jonka LOS-yhteys kahden satelliitin tai satelliitin ja maa-aseman välillä mahdollistaa. Toisaalta satelliitin rakennus- ja laukaisukustannukset ovat huomattavan suuria ja satelliittien suhteellisen pieni määrä edustaa riskitekijää.

Satelliitin tuhoaminen on sekä kallista että vaikeaa. Tällä hetkellä vain USA:lla on todistettavasti jonkinlainen matalalla lentävien satelliittien torjuntakyky korkealla lentävistä lentokoneista laukaistavin ASAT-ohjuksin sekä kokeiluja suurteholaserin käyttämisestä satelliittien torjuntaan. Satelliittijärjestelmien lamauttaminen joko iskemällä maassa oleviin ohjausaseisiin tai satelliittilinkkiin elektronisen häirinnän keinoin on satelliitin tuhoamista realistisempi uhkakuva. Satelliittien lamauttaminen tai pysyvä vaurioittaminen voi olla mahdollista toteuttaa HPM-aseella, johon palataan myöhemmin kirjan *asejärjestelmät* –luvussa.

Satelliittien radat voidaan jakaa:

1. Radan säteen perustella esimerkiksi:

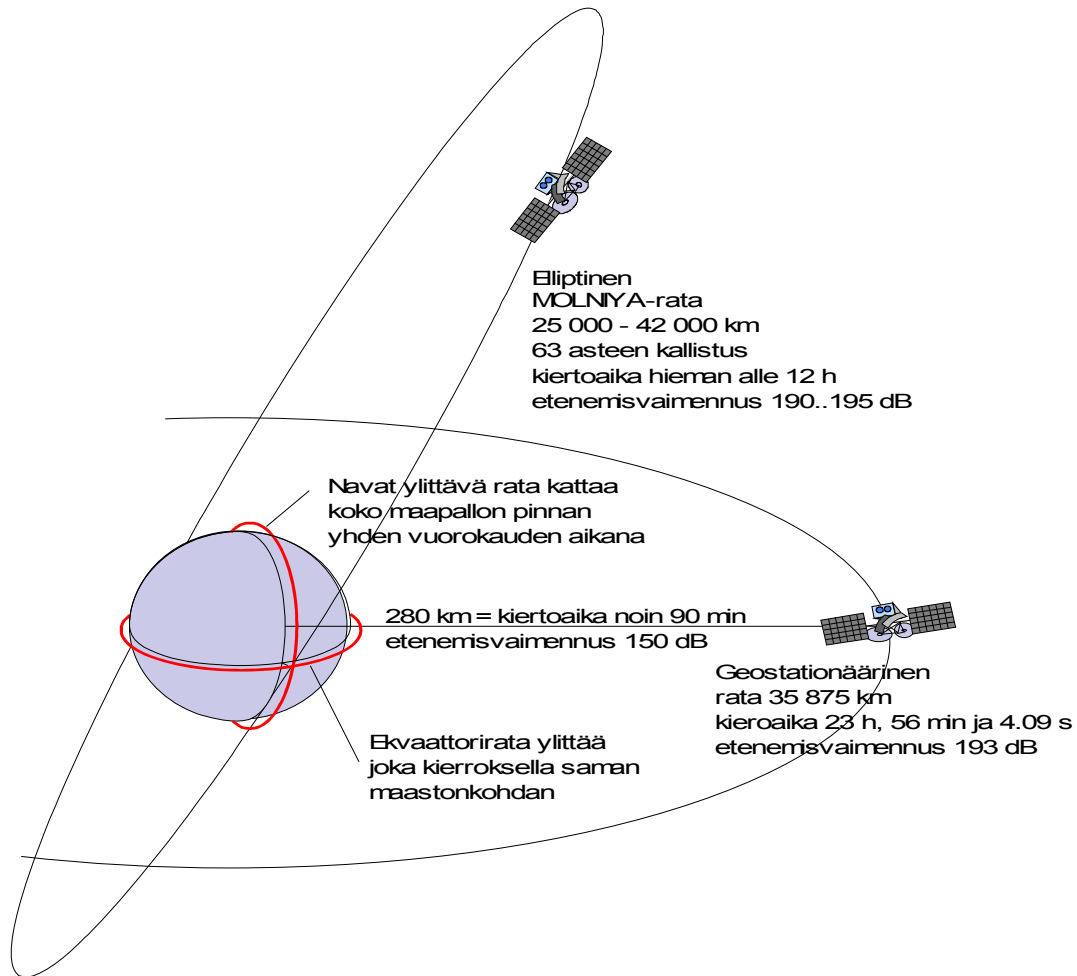
- matala LEO-rata (Low Earth Orbiting), jolla satelliitin kulkuaika maapallon ympäri on vain muutamia tunteja, esimerkiksi 280 km korkeudella 1.5 h. Matalan radan etuna on lyhyestä yhteysvälistä johtuva pienehkö vaimennus, mutta haittana satelliitin pieni peittoalue ja sen vuoksi suuri tarvittavien satelliittien lukumäärä. Lisäksi matala lentokorkeus lisää ilmakehän kitkan vaikutusta, mikä lyhentää LEO-satelliitin elinikää.
- geosynkroninen ekvaattorirata (GEO) noin 36 000 km korkeudella, jossa satelliitti näyttää maasta katsottuna pysyvän paikallaan. Etuna on suuri peittoalue ja se, ettei satelliitin ja maa-aseman välille synny dopplersiirtymään. Haittana puolestaan on suuresta yhteysvälistä johtuva siirtoviive ja etenemisvaimennus.
- MEO-radalla (Medium Earth Orbit) voidaan saavuttaa kompromissi LEO- ja GEO-ratojen ominaisuuksien suhteen. Noin 10.000 km korkeudessa lentävien satelliittien peittoalue on laajempi ja elinikä pidempi kuin LEO-satelliittien, mutta tarvittavien satelliittien määrä on suurempi kuin GEO-radalla.

2. Radan kallistuskulman perusteella:

- Ekvaattorirata (kallistus 0°), jolla satelliitti kulkee aina saman maastonkohdan ylitse
- Naparata (kallistus 90°), jolla satelliitti ylittää kierroksensa aikana sekä pohjois- että etelänavan. Radalla voidaan kattaa koko maapallon pinta.
- Kallistettu rata, jossa satelliitti ylittää joka kierroksella edellistä kierrosta lännempänä sijaitsevan kohdan.

3. Radan muodon perustella:

- Ympyrän muotoinen, jolloin satelliitti on aina samalla etäisyydellä maapallosta. Tällä radalla satelliitin peittoalue ja kulkuaika pysyy vakiona. Tietoliikennesatelliitit kulkevat yleensä ympyrärataa.
- Elliptinen, jolloin satelliitin kulkuaika ja peittoalue vaihtelee. Kun satelliitti on kauimpana maasta, sen nopeus on pienin ja peittoalue suurin. Tätä voidaan käyttää hyväksi tiedustelusatelliiteissa, jotka voidaan saada pysymään pidempään kohdealueellaan.



Kuva 101: Esimerkkejä satelliittien eri tyypisistä radoista.

GEO-satelliittijärjestelmistä tunnetuin on Inmarsat, jonka M-järjestelmän päätelaitteet ovat suhteellisen suurikokoisia ja jonka antenni on suuren yhteysvälivaimennuksen vuoksi suunnattava satelliittia kohti. Inmarsat-P:n satelliitit ovat MEO-radalla, ja päätelaitteiden koko on suuren matkapuhelimen luokkaa. LEO-satelliittien päätelaitteiden koko saadaan pienennettyä nykyisten matkapuhelinten kokoluokkaan.

Liityntämenetelmänä voidaan käyttää FDMA:ta, TDMA:ta tai CDMA:ta. Tällä hetkellä FDMA ja TDMA ovat yleisimmät liityntämenetelmät, mutta CDMA on yleistymässä nimenomaan sotalastietoliikenteessä. TDMA:sta on kehitetty PRMA-protokolla (Packet Reservation Multiple Access) satelliittipuhelinten käyttöön. Siinä jokaiselle maa-asemalle välitetään tieto kunkin kehyyksen aikavälin varauksesta. Maa-asema voi koettaa ottaa käyttöönsä tyhjän aikavälin lähettämällä siinä dataa. Jos datan siirto onnistuu, on kehys otettu onnistuneesti käyttöön. Kun käyttäjä ei lähetä dataa aikavälillä, hän menettää sen varauksen ja aikaväli vapautuu muiden liikennöitsijöiden käyttöön.

Ionosfääri ja maan magneettikenttä kääntävät radioaallon polarisaatiota, minkä vuoksi satelliittijärjestelmissä käytetään yleensä ympyräpolarisaatiota. Ympyräpolarisaatiolla ei ole polarisaatiokulmaa, joten ionosfäärin anisotrooppisuus ei haittaa.

Satelliittijärjestelmän kaksi teknistä ongelma-aluetta on pitkistä yhteysvälistä johtuva suuri etenemisvaimennus sekä satelliitin rajallinen lähetysteho. Geostationäärinen satelliittien yhteydessä myös signaalin etenemisviive on huomattava.

Satelliittiliikenteessä käytettävät päätaajuudet ovat

- L-kaista 1,5 GHz/1,6 GHz
- S-kaista 2 GHz (NASA)
- C-kaista 4 GHz/ 6 GHz
- X-kaista 7-9 GHz (sotilasjärjestelmät)
- Ku-kaista 12 GHz/ 14 GHz
- K-kaista 12,2-17,8 GHz (DBS, Direct Broadcast Satellite)
- Ka -kaista 20-30 GHz

Esimerkki satelliittijärjestelmän linkkibudjetista:

Satelliittikommunikointijärjestelmä toimii 5 GHz taajuudella. Maa-aseman antennina käytetään 60 cm paraboliheijastinta. Aseman lähetysteho on 10 W ja yhteydellä siirretään 4 kappaletta 64 kbps puhe- tai datayhteyksiä TDMA-kehyksessä. Kehystys- ja merkinanto sekä kehyksen virheenkorjaus lisäävät siirtonopeutta 16 kbps.

Satelliitti on noin 20 000 km korkeudessa, millä saavutetaan 12 tunnin pyörähdysaika. Kukin satelliitti kulkee siten kaksi kertaa vuorokaudessa horisontin ylitse. Satelliitissa on 1,5 metriä halkaisijaltaan oleva heijastinantenni ja satelliitin lähtöteho on 10 W.

Maa-aseman antennin vahvistus saadaan kaavasta: $G_g = \frac{4\pi \cdot A_{ge}}{\lambda^2}$

jossa A_{ge} on antennin tehollinen pinta-ala: $A_{ge} = 0.65 \cdot A_g$

A_g on antennin fyysinen pinta-ala: $A_g = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$ ja d on antennin halkaisija 60 cm.

Maa-aseman antennin vahvistukseksi saadaan 28 dB. Vastaavasti $D=1,5$ m läpimittaisen satelliitin antennin pinta-alaksi saadaan:

$A_s = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$ ja teholliseksi sieppauspinta-alaksi $A_{se} = 0.65 \cdot A_s$, jolloin

antennivahvistus $G_s = \frac{4 \cdot \pi \cdot A_{se}}{\lambda^2}$, mikä on noin 36 dB.

Satelliitin EIRP ≈ 40 kW ja maa-aseman noin 6 kW. Jos maa-aseman, satelliitin ja ilmakehän yhteyshäviöiksi oletetaan $L_{sys}=9$ dB, niin satelliitin vastaanottaman maa-aseman signaalin tehotasoksi saadaan:

$$P_{gs} = P_g \cdot G_g \cdot G_s \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 \cdot \frac{1}{L_{sys}}$$

mikä on noin $-127,7$ dBW. Vastaavasti satelliitilta maa-asemalle tuleva teho-taso on:

$$P_{sg} = P_s \cdot G_s \cdot G_g \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 \cdot \frac{1}{L_{sys}}$$

joka parametrien samankaltaisuuksien vuoksi on luonnollisesti sama kuin satelliitin vastaanottama teho. Kanavalla olevan kohinan taso voidaan arvioida olettamalla kohinakaistaksi siirtonopeutta vastaava kaista $B \approx 1/T_s = R_s$. Mikäli vastaanottimen kohinaluku on $NF=3$ dB ja antennin kohinalämpötila maata katsottaessa $T_A=300$ K, saadaan kohinan tehotasoksi:

$$N = k \cdot T_{sys} \cdot B, \text{ jossa } T_{sys} = T_A + (F_{sys} - 1) \cdot T_o$$

Tämä vastaa $-146,4$ dBW kohinatasa, joten signaali-kohinasuhteeksi vastaanottimella saadaan -128 dBW $- (-146$ dBW) = $18,7$ dB, mikä on täysin riittävä hyvälaatuisen yhteyden muodostamiseen.

Edellisessä esimerkissä ilmakehän vaimennus oletettiin vakioksi. Todellisuudessa se ja maa-aseman antennin ekvivalentti kohinalämpötila riippuvat satelliitin kulmasta maanpintaan nähden. Yhteys matalalla lentävään satelliittiin kulkee pidemmän matkan ilmakehässä kuin pystysuorassa näkyvään satelliittiin. Samalla antennin pääkeila tai suurimmat sivukeilat valaisevat 'kuumaa' maata ja kohinataso nousee. Avaruudessa sijaitsevan satelliitin kohinataso riippuu satelliitin lämpötilasta, resistiivisistä häviöistä sekä maan kohinalämpötilasta.

Satelliittiyhteys on suojattava häirinnältä. Häirintä voidaan kohdistaa ylös-linkkiin, jolloin kaikki satelliittijärjestelmän piirissä toimivat päätelaitteet saadaan lamautettua tai alas-linkkiin, jolla voidaan vaikuttaa vain osaan päätelaitteista. Mikäli häirintä suoritetaan maasta, voidaan alas-linkin häirinnällä yleensä häiritä vain lähellä sijaitsevia päätelaitteita. Ilmasta häirinnän ulottuvuus on huomattavasti parempi. Ylös-linkin häirintä on käytännössä suoritettava satelliitin pääkeilasta, mikä ei yleensä ole vaikeata, koska satelliittijärjestelmät on suunniteltu nimenomaisesti hyvän maantieteellisen kattavuuden aikaansaamiseksi. Häirintätehon on kyettävä peittämään maa-aseman lähetysteho ja mahdollinen prosessointivahvistus. Alas-linkin häirinnässä häirintälähttimen ja vastaanottimen etäisyys on olennaisesti pienempi kuin häirintälähttimen ja satelliitin välinen matka. Siten pienitehoinen häirintäsignaali voi kyetä kilpailemaan kaukaa satelliitista tulevan hyötylähetteen kanssa. Ongelmana on saada häirintäsignaali ylöspäin suunnatun päätelaitteen antennin pää- tai sivukeilaan. Tämä on mahdollista korkealla lentävällä lentokoneella tai taistelukentän yläpuolella kiertävällä lennokilla. Jos sekä 3 km korkeudessa lentävä lennokki että $20\,000$ km korkeudessa oleva satelliitti ovat päätelaitteen antennin pääkeilassa, on satelliittijärjestelmän prosessointivahvistuksen ja satelliitin EIRP:n oltava

$$20 \cdot \log\left(\frac{20000}{3}\right) = 76 \text{ dB suurempi kuin lennokin EIRP:n.}$$

Jos lennokin antennivahvistus on 3 dB ja satelliitin 21 dB (vastaa sitä avaruuskulmaa, jossa maa näkyy 20000 km etäisyydeltä) ja satelliitin lähetysteho on kolminkertainen (5 dB) lennokin häirintätehoon verrattuna, on järjestelmän prosessointivahvistuksen oltava:

$$76 + 3 - 21 - 5 = 53 \text{ dB.}$$

Esimerkin hajotuskoodilla voidaan saavuttaa 19 dB prosessointivahvistus, joten alas-linkki yhteys olisi tässä tapauksessa häiritävissä. Varsinkaan satelliitin lähetystehon lisääminen häirinnän kompensoimiseksi ei yleensä ole mahdollista. Tehokkaana, mutta toistaiseksi kalliina vastatoimenpiteenä voidaan käyttää adaptiivisia antennoja, joilla voidaan saavuttaa 40 dB luokkaa olevia vaimennuksia häirintälähtetimen suuntaan. Toinen vaihtoehto on laskea siirtonopeutta tai lisätä levityskaistaa. Kummassakin tapauksessa prosessointivahvistus kasvaa vastaavassa suhteessa.

Tässä luvussa käytiin aluksi läpi viestijärjestelmien toteuttamisen kannalta merkittäviä tietoliikenneteknisiä perusteita ja esiteltiin sitten lyhyesti keskeisiä taistelukentän viestijärjestelmiä. Seuraavassa luvussa käsitellään digitaalisen taistelukentän toista elementtiä, eli sensorijärjestelmiä.

SENSORIJÄRJESTELMÄT

JOHDANTO

Sensoreiden luokittelu

Sensorijärjestelmät perustuvat maalin herätteen, eli maalin lähettämän tai maalista heijastuvan fysikaalisen suureen vastaanottoon ja tulkintaan¹⁷. Mitattava suure voi olla mekaaninen aaltoliike (seismiset ja akustiset sensorit), paine, kemiallinen emissio, magneettisuus tai kohteesta tuleva sähkömagneettinen säteily. Tässä kirjassa keskitytään sähkömagneettisiin sensoreihin. Sensorit voidaan jakaa monin eri perustein luokkiin, kuten:

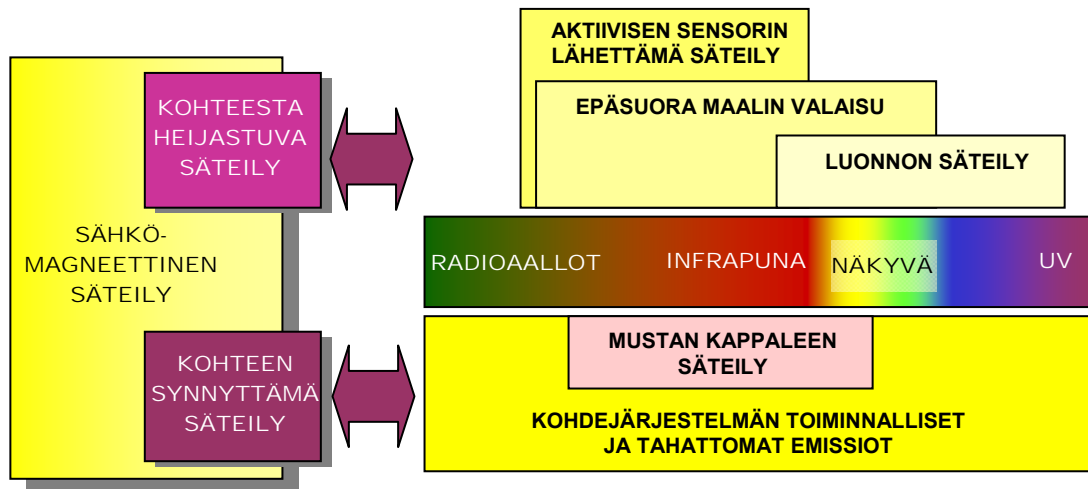
- Millä spektrin alueella sensori toimii (RF, infrapuna, näkyvä valo, ultravioletti).
- Mihin sensorilta saatavaa tietoa käytetään (valvonta, tiedustelu, maalin paikannus, maaliin hakeutuminen, varoitus),
- Perustuuko toiminta sensorin itsensä lähettämään säteilyyn, vai vain vastaanottamaan säteilyyn (aktiiviset ja passiiviset sensorit).
- Muodostaako sensori kohteesta tulkittavissa olevan kuvan vai ilmaiseeko vain kohteen olemassaolon tai sijainnin (kuvaavat ja ei-kuvaava sensorit).
- Muodostaako sensori kuvaa muutamalla sensorielementillä pyyhkäisemällä (scanning) vai tuijottamalla yhtäaikaaisesti koko kohdealuetta (staring).
- Mille alustalle sensori on asennettu (ajoneuvo/kontti, lennokki, lentokone, satelliitti yms.).

Sensorin toiminta perustuu joko maalin itsensä säteilemään tai maalista heijastuvaan säteilyyn. Kaikki taistelukentän kohteet heijastavat osan niihin osuvasta säteilystä. Tämä säteily voi tulla luonnosta, kuten auringosta, kuusta tai tähtitaivaalta, tai se voi olla peräisin sensorista itsestään (aktiiviset sensorit) tai muista sotilas- tai siviilijärjestelmistä, kuten tutkista tai yleisradiolähetyksistä.

Kuten spektrin käsittelyn yhteydessä jo todettiin, kaikki absoluuttista nollapistettä lämpimämmät kappaleet lähettävät sähkömagneettista säteilyä, jota kutsutaan mustan kappaleen säteilyksi. Sen intensiteetti ja sitä vastaava aallonpituus riippuu kohteen lämpötilasta.

¹⁷ **Heräte** tarkoittaa kohteesta saatavaa signaalia, jonka perusteella kohde voidaan havaita, paikantaa tai tunnistaa. Heräte voi olla peräisin kohteen omasta emissiosta tai heijasteesta. Signaali tarkoittaa tässä yhteydessä sähkömagneettista, akustista (välittävässä materiaalissa paineaaltoina etenevää), magneettista tai sähköstaattista signaalia. **Kohteen emissio** syntyy esimerkiksi mustan kappaleen säteilystä, ammusaseiden suuvalähdyksistä, ohjusten lähtökiihdytyksestä, valaisimista, elektroniikan ja polttomoottoreiden hajasäteilystä, tietoliikenne-, paikantamis- ja etäisyydenmittauslaitteista sekä aktiivisista sensoreista. **Kohteen heijast** syntyy kohteesta heijastuvasta signaalista, joka tyypillisesti on akustinen (esim. sonar) tai sähkömagneettinen. Säteilylähde voi olla esimerkiksi taivaankappale (aurinko joko suoraan tai kuun kautta heijastuneena tai muut tähdet), valaisukranaatti, aktiivinen sensori (tutka, laser) tai peukalokyytitutka.

Taustalämpötilaa lähellä olevien kappaleiden säteilyn maksimi on infrapuna-alueella, mutta kappaleet lähettävät säteilyä myös millimetri- ja näkyvän valon alueella.



Kuva 102: Sähkömagneettiset sensorit voivat käyttää hyväksi maalista heijastuvaa säteilyä tai maalin itsensä aikaansaamaa (tahatonta tai tahallista) säteilyä.

Taistelukentän järjestelmät sisältävät paljon elektroniikkaa ja muita sähköisiä komponentteja, jotka lähettävät sekä tahallisesti että tahattomasti sähkömagneettista säteilyä. Tahallisia säteilylähteitä ovat muun muassa sensori-, tietoliikenne- ja omatunnistus- sekä häirintäjärjestelmät. Näiden järjestelmien elektroniikka synnyttää usein myös tahatonta säteilyä, jota kutsutaan hajasäteilyksi. Se on järjestelmästä vuotavaa säteilyä, jota ei käytetä järjestelmässä hyväksi. Vaikka säteily ei sinänsä ole yleensä haitallista, vaarallista siitä tekee se, että vihollinen saattaa kyetä paljastamaan sen avulla järjestelmien olemassaolon, sijainnin, toimintaperiaatteen, järjestelmässä kulkevaa informaatiota yms. Merkittävimpiä hajasäteilyn lähteitä ovat ajoneuvojen ja generaattoreiden sytytysjärjestelmät, suojaamattomissa kaapeleissa kulkevat järjestelmien sisäiset signaalit ja tietokoneiden monitorit sekä esimerkiksi tutkien lämmityspiirien virrat.

Sensorin toiminnan vaiheet

Sensoreiden toiminta voidaan jakaa useaan vaiheeseen, joita kutakin varten sensorijärjestelmässä voi olla oma sensorinsa tai sama sensori voi siirtyä toimintatilasta toiseen. Seuraavassa sensorin toiminta on jaettu viiteen jaksoon:

1. maalin havaitseminen (detection)
2. maalin paikantaminen (location)
3. maalin tunnistaminen (recognition)
4. maalin yksilöinti (identification)
5. maalin seuranta (tracking)

Maalin **havaitsemisella** tarkoitetaan sitä, että sensori ilmaisee sotilaallisesti mielenkiintoisen kohteen olemassaolon. Havaintoon tarvittava tietomäärä on suhteellisen pieni; usein riittää se, että sensori vastaanottaa tietyn tyyppistä säteilyä (esimerkiksi laservaroitusjärjestelmä, ESM-sensori) tai havaitsee riittävän suuren kontrastin tarkasteltavalla alueella, tai poikkeaman taustakuviossa.

Havaintoa voidaan käyttää hyväksi havainnon tehneen tai jonkin toisen sensorin huomion kiinnittämiseksi tai vaikkapa vastatoimenpiteiden käynnistämiseen. Tällöin on pystyttävä **paikantamaan** maali joko kahdessa dimensiossa (suunta elevaatio- ja atsimuuttikulmina), kolmessa dimensiossa (suunta ja etäisyys) tai neljässä dimensiossa (maalin geometrinen sijainti sekä maalista tulevan säteilyn ominaisuudet). Paikantamisen jälkeen sensori kykenee lisäämään maalin valaisua (esimerkiksi kohdistamalla siihen useampia tutkapulsseja), jolloin signaalikohinasuhde paranee, eli maali erottuu selkeämmin taustastaan kuin silloin kun sensori suoritti laajemman alueen valvontaa. Tällöin maalin paikannustarkkuus paranee.

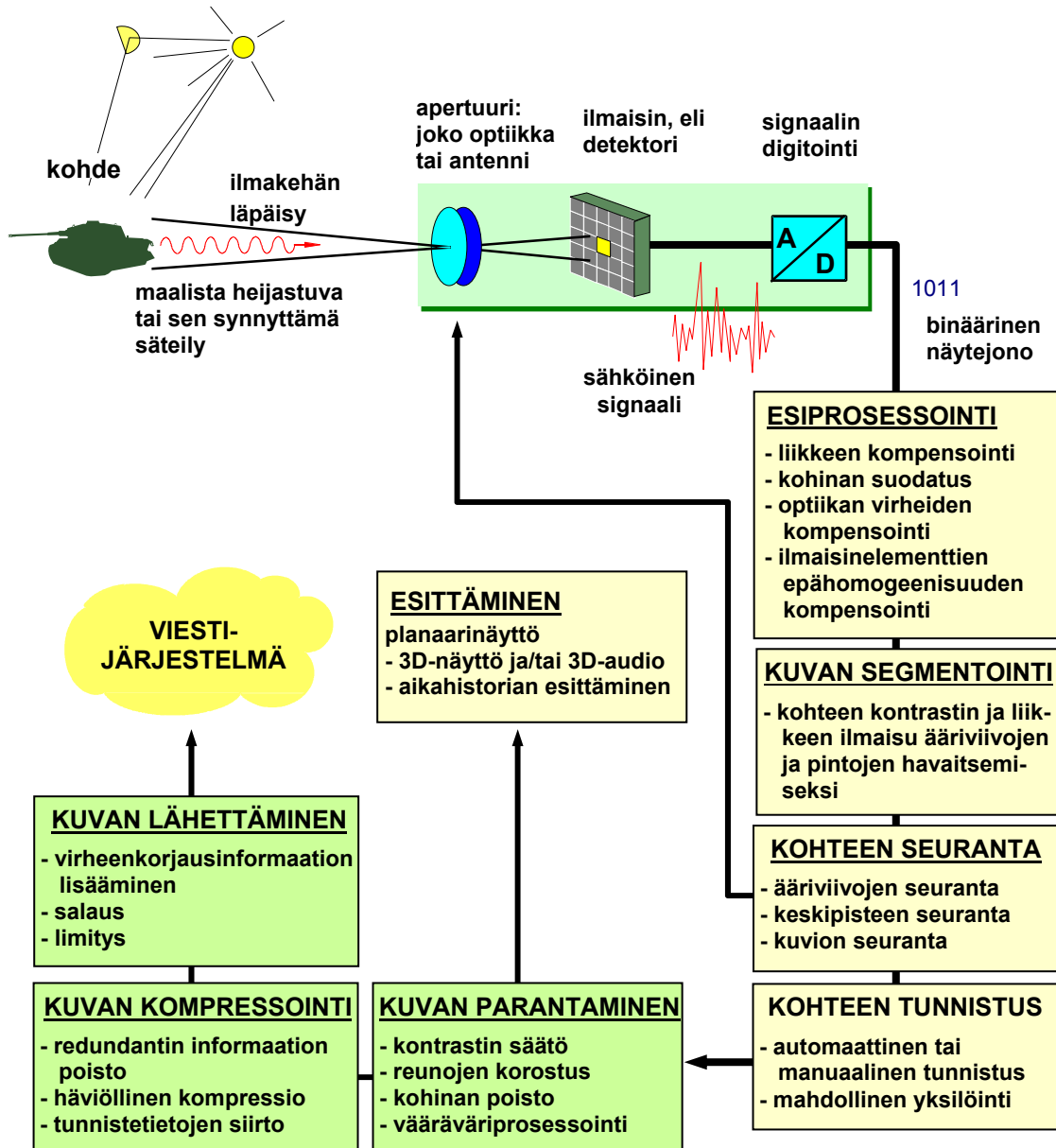
Tunnistaminen tarkoittaa maalin luokittelua esimerkiksi tela- tai pyöraajoneuvoksi, rynnäkö- tai hyökkäysvaunuksi jne. Maalin tunnistaminen voi perustua maalista tulevan säteilyn ominaisuuksiin tai maalin käyttäytymiseen. Edellisessä voidaan hyödyntää tietoja maalin koosta ja muodosta tai muista maalin ominaisuuksista, kuten maalin lämpötilasta ja lämpötilajakaumasta, dopplerspektrin indikoimista liikkuvista osista (kuten suihkumoottoreiden turbiinin siivet; JEM, Jet Engine Modulation) yms. Maalin tunnistaminen edellyttää parempaa signaali-kohinasuhdetta kuin pelkkä maalin havaitseminen (esim. JEM noin 40 dB). Tämä tarkoittaa sitä, että joko tunnistusetäisyys on olennaisesti pienempi kuin havainto-etäisyys, tai sitten sensorin on havainnon jälkeen seurattava maalia riittävät pitkään, jotta saatava signaali kyetään integroimaan. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että sensorin on jätävä 'tuijottamaan' havaitsemaansa maalia. Tietoa maalin käyttäytymisestä, kuten nopeudesta ja liikeradasta, kiihtyvyyksistä yms. voidaan hyödyntää mahdollisten eri tunnistamisvaihtoehtojen pois sulkemiseen.

Maalin **yksilöinti** tarkoittaa maalin tyyppin määrittelyä sekä maalin luokittelua viholliseksi tai omaksi. Yksilöinti perustuu usein maalin detaljien (rungen ääriviivat, pyörien tai roottorin lapojen lukumäärä yms.) tarkasteluun, joten se edellyttää tarkkaa kuvaa maalista ja erittäin hyvää signaali-kohinasuhdetta. Mikäli sensorin erottelukyky pituus- ja/tai poikittaissuuntaan sekä signaali-kohinasuhde ovat riittävät, sensorilla voidaan kyetä tekemään havaintoja esimerkiksi maalin asekuormasta (payload discrimination), antennien määrästä (johto- tai rivivaunu) ja muista maalien priorisoimisen kannalta tärkeistä seikoista.

Yksilöinnin perusteella voidaan tehdä päätös siitä, pitääkö maalia ryhtyä seuraamaan vai voidaan se jättää huomiotta. Seurannalla tarkoitetaan prosessia, jolla sensori ylläpitää maalitietoja, kuten maalin tunnistetietoja, sijaintia, liikerataa. Sensori voi itse seurata maalia tai antaa sen toisen sensorin tehtäväksi. Esimerkiksi maastonvalvontatutka seuraisi todennäköisesti itse maalia tarkkailemalla hieman tarkemmin jo havaittujen maalien lähiympäristöä, mutta ilma- ja maanvalvontatutka saattaisi antaa seurannan erillisen seurantatutkan tehtäväksi. Järjestelmien kehittymisen myötä valvonta- ja seurantasensoreiden tehtävät on yhdistetty ns. monimuotosensoreiksi. Monimuotosensori kykenee seuraamaan maaleja samalla kun se jatkaa tilan valvontaa (track while scan) ja lisäksi se saattaa käyttää lähetettään informaation välittämiseen esimerkiksi ammuttavalle ohjukselle.

Sensorin rakenne

Sensorin ensisijaisena tehtävänä on muuttaa kohteesta mitattava fysikaalinen suure, kuten radiotaajuinen säteily, lämpösäteily tai valo digitaaliseksi näytejonoksi. Tätä varten sensorissa on taajuusalueesta riippuen optiikka tai antenni aaltojohtoineen sieppaamassa maalista tulevasta säteilystä mahdollisimman suuren osan ja siirtämässä sen ilmaisimelle. Ilmaisimen (detektorin) tehtävänä on muuntaa maalista tuleva säteily sähköiseksi signaaliksi. Ilmaisimen jälkeen signaalista otetaan näytteitä ja nämä näytteet digitoidaan AD-muuntimessa (ADC, Analog-to-Digital Converter). Kvantisoinnin ja äärellisen näytteenottonopeuden vuoksi osa signaalin informaatiosta menetetään, mutta signaalia on toisaalta helpompi käsitellä.



Kuva 103: Esimerkki nykyaikaisen sensorin rakenteesta ja sensorilla muodostetun kuvan käsittelyvaiheista.

Saatu digitaalinen signaali esiprosessoidaan ennen maalin tulkitsemista. Esiprosessoinnin tehtävänä voi olla kohteen liikkeen kompensointi, taustakohinan poisto ja ilmaisinelementtien epähomogeenisuuden tasaaminen. Lisäksi esiprosessoinnissa kompensoidaan virheet, jotka aiheutuvat siitä, että ilmaisimatriisi ei ole pallopinnan muotoinen vaan tasapintainen levy.

Esiprosessoinnin jälkeen automaattisen maalin havaitsemis- ja tunnistustoiminnon sisältävissä sensoreissa kuva segmentoidaan, eli lohkotaan osiin, joiden sensorin tietokone uskoo sisältävän mielenkiintoisia kohteita. Yksinkertaisimmillaan segmentointi perustuu kohteen ja taustan väliseen kontrastiin, mutta älykkäämmissä sensoreissa voidaan hyödyntää myös kohteen liikettä, toistuvia kuvioita tai muutoksia taustalla olevan kuvion jatkumisessa. Kohteen havaitsemistodennäköisyys riippuu sensorin näkökentästä ja resoluutiosta sekä maalin kontrastista. Lisäksi tietoisuus ympäröivän taistelukentän tapahtumista nopeuttaa maalien havaitsemista, sillä niitä osataan odottaa oikeista suunnista.

Kun kohde on kyetty erottamaan taustastaan segmentoinnilla, sitä voidaan ryhtyä seuraamaan. Tietokonepohjaiset automaattisen seurantajärjestelmät voivat seurata kohteen ääri- viivoja, kohteen keskipistettä tai taustaansa vasten liikkuvaa kuviota.

Kohteen tunnistuksessa voidaan käyttää apuna operaattoria tai tunnistus voidaan tehdä automaattisesti. Johtamisprosessissa halutaan usein tarkastella sensorilta saatavaa kuvaa, minkä vuoksi se on tehtävä ihmissilmälle paremmin hahmotettavaksi. Tämä voi sisältää esimerkiksi kontrastin säätöä, ääri viivojen korostusta, kuvan rakeisuuden suodatusta ja näkyvän valon aallonpituusalueen ulkopuolella toimivissa sensoreissa kuvan väärä värisävyttämistä. Väärä värisävytyksessä kuvan eri osat voidaan värittää esimerkiksi kohteen lämpötilan, tutkaheijastuksen yms. perusteella.

Kuvan laadun parantamisen jälkeen kuvan siirtämiseen ja esittämiseen vaadittavaa bittimäärää vähennetään. Tässä yhteydessä on erotettava toisistaan häviötön tiivistäminen, jossa informaatiota ei katoa ja häviöllinen kompressointi, jossa osa alkuperäisen kuvan sisältämästä informaatiosta häviää. Edellisestä voidaan mainita esimerkkinä RLE (Run-Length Encoding) ja jälkimmäisestä diskreettiin kosinimuunnokseen (DCT) perustuva JPEG sekä fraktaalij- ja aalokekoodaukset. JPEG:llä voidaan kuva kompressoida kuvan sisällöstä riippuen noin 15-75 prosenttiin alkuperäisestä. Fraktaalikoodauksella voidaan päästä vieläkin parempiin tiivis- tyssuhteisiin.

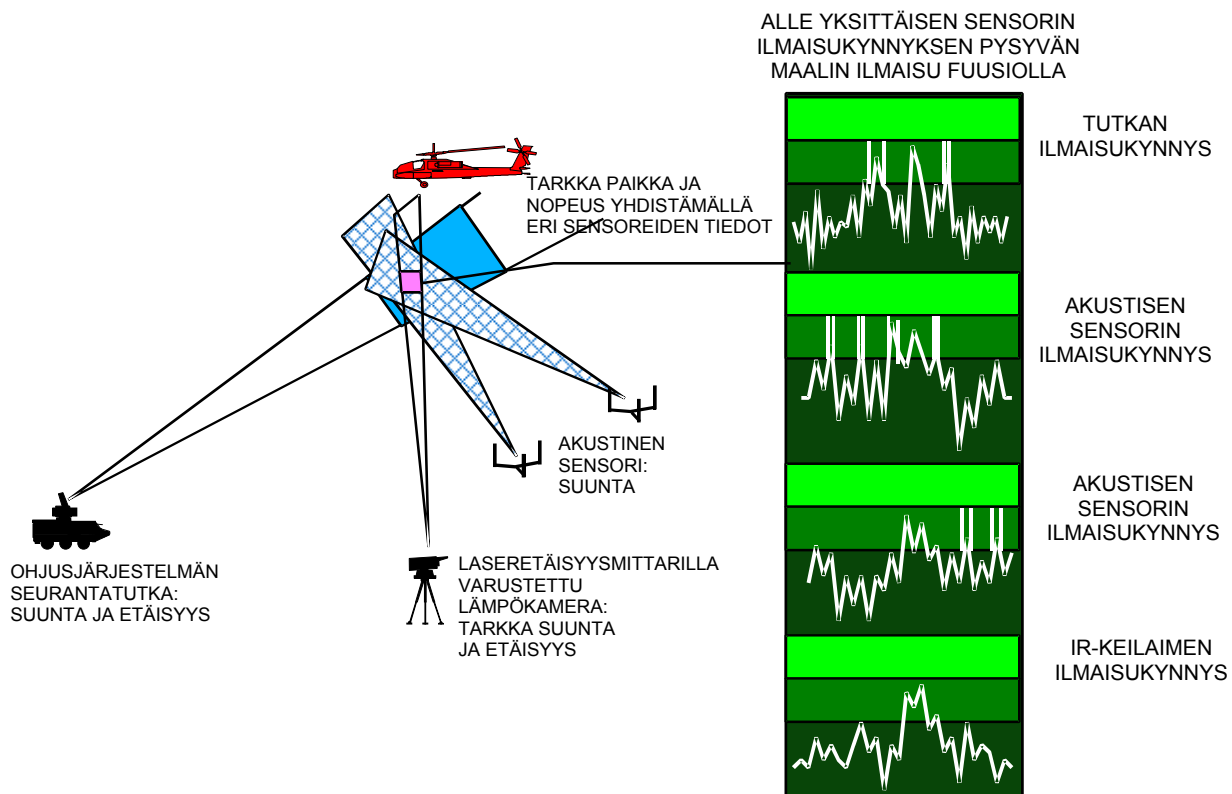
Sensorifuusio ja päätöksenteko

Sensorifuusiolla tarkoitetaan eri sensoreilta saatavan tiedon yhdistämisen perusteella tehtävää päättelyä vihollisesta. Sensorifuusiota voidaan käyttää hyödyksi yksittäisten maalien etsinnästä ja seurannasta mahdollisimman kattavan vihollistilannekuvan muodostamiseen koko yhtymän alueelta. Sensorifuusio sisältää maalien luokittelun, korreloinnin ja maalien aikahistorian muodostamisen käyttäytymisen, liikeradan yms. perusteella. Korreloinnilla tarkoitetaan prosessia, jolla tunnistetaan mitkä havainnot liittyvät samaan maaliin. Sillä estetään ylimääräisten olemattomien maalien syntyminen.

Sensorilla oleva informaatio voidaan yhdistää ennen maalin havaintopäätöksen tekemistä, tai sen jälkeen. Edellisessä mahdollistetaan alempi havaintokynnys, mutta joudutaan samalla välittämään huomattavasti isompia tietovirtoja. Jälkimmäisessä puolestaan ei kyetä löytämään maalia, jota yksi tai useampi sensori ei ole havainnut, mutta toisaalta sensoreiden

välillä tai sensoreiden ja niiden johtokeskusten välillä ei tarvitse siirtää kuin tiedot havaituista maaleista.

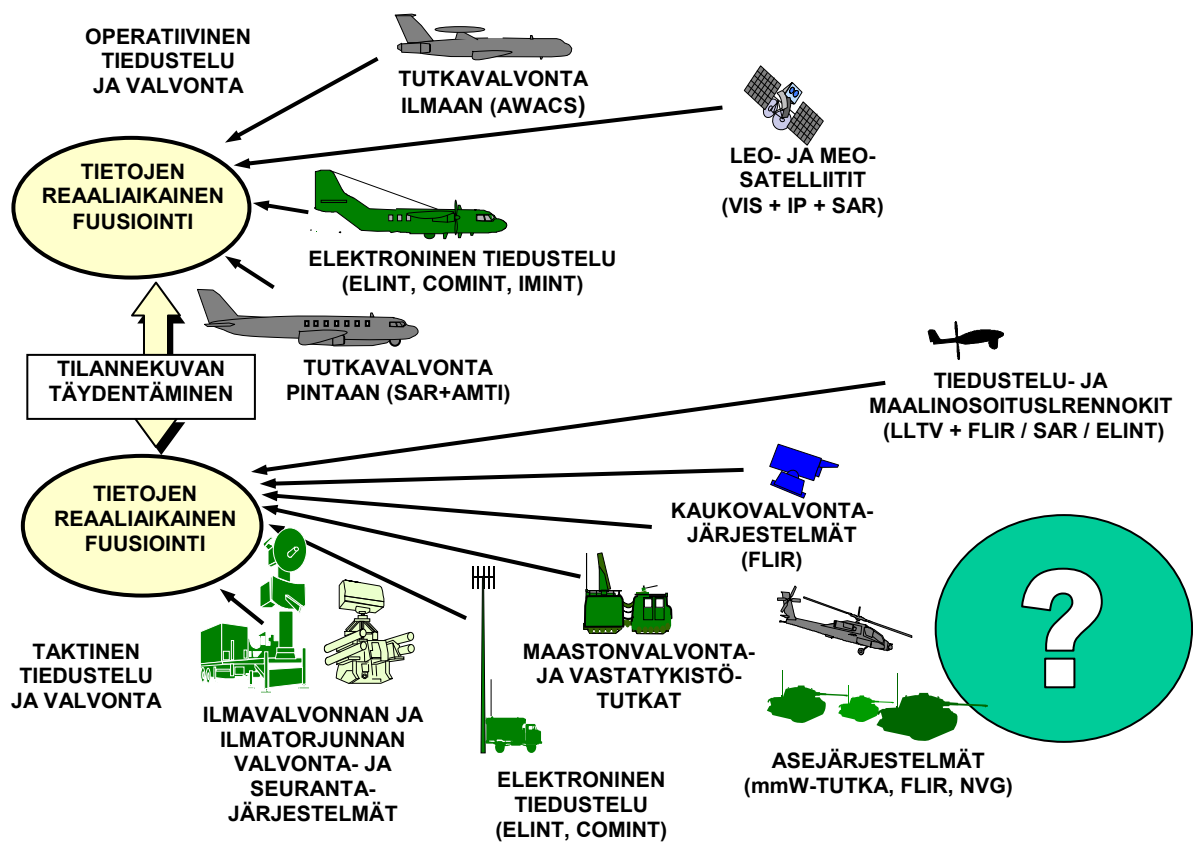
Kuvassa 104 on esitetty esimerkki, jossa häivemaali liikkuu erilaisten sensoreiden näkökentässä. Maalista tuleva tutka- ja lämpösignaali sekä akustinen signaali ovat alle kunkin erillisen sensorin päätösrajan. Yksikään sensoreista ei siten ilmaise nähneensä maalia, vaan tulkitsee maalista saatavan pienen signaalin taustakohinaksi tai tutkavälkkeeksi. Mikäli sensoreiden antamat maalitiedot yhdistetään tässä vaiheessa, maali jää edelleen havaitsematta. Sensoreiden havaintorajaakaan ei voida laskea, koska tällöin ne antaisivat jatkuvasti vääriä hälytyksiä luonnollisen kohinan vuoksi. Mikäli sensorit sen sijaan lähettävät tietoja myös alle havaintorajan olevista maaleista, voidaan tietoa kohinan satunnaisesta luonteesta hyödyntää fuusioinnissa: yksittäisen sensorin antama tieto voi olla tutkavälkettä tai muuta kohinaa, mutta jos kaksi sensoria, esimerkiksi lämpökamera ja tutka, tai tutka ja akustinen sensori, havaitsee jotakin mahdollisesti mielenkiintoista samaan aikaan samassa pisteessä, on varsin epätodennäköistä, että kyseessä olisi sattuma.



Kuva 104: Sensorifuusion hyödyntäminen häivemaalien havaitsemiseen ja paikantamiseen ennen maalin ilmaisu.

Siirrettävän tietomäärän laajuuden vuoksi sensorifuusiota on lähdeytetty toteuttamaan yhdistämällä sensoreilta tulevia jo prosessoituja maalitietoja. Seuraava sensorifuusion kehitysvaihe on hyödyntää sumeaa logiikkaa, jossa maalin olemassaolo ja ominaisuudet ilmaistaan todennäköisyyksinä. Nämä todennäköisyydet voidaan muodostaa jo sensoreilla (esimerkiksi sen mukaan kuinka paljon mahdollisesta maalista tuleva signaali eroaa taustakohinasta) tai vasta fuusiointivaiheessa.

Yksittäisten häivemaalien havaitsemista tärkeämpää on luoda sensorifuusion avulla kattava kuva taistelukentästä ja esittää se johtajille siten, että näille muodostuu mahdollisimman oikea, kattava ja ajantasainen tilannetietoisuus. On havaittu, että sensorijärjestelmien maalin havaitsemiseen tarvitsema aika riippuu paitsi sensorin näkökentästä ja resoluutiosta sekä maalin kontrastista, myös sensorin käyttäjän tilannetietoisuudesta. Tähän liittyen sensorifuusiota täydennetään datafuusiolla. Datafuusio käsittää sensorifuusion lisäksi tilanneanalyysin, uhka-analyysin sekä päätöksenteon tuen. Tällöin fuusiointijärjestelmän on kyettävä käsittelemään epävarmaa, epätäydellistä, ristiriitaista ja jopa täysin väärää informaatiota, joka osin on hyvin aikakriittistä. Lisäksi tiedustelujärjestelmän on siedettävä harhaanjohtamista ja tahallista häirintää. Keskeisiä ongelma-alueita ovat fuusiointialgoritmit, hajautettujen tietokantojen toteuttaminen ja tiedonsiirtokapasiteetin sovittaminen siirtoverkon kulloiseenkin suorituskykyyn.



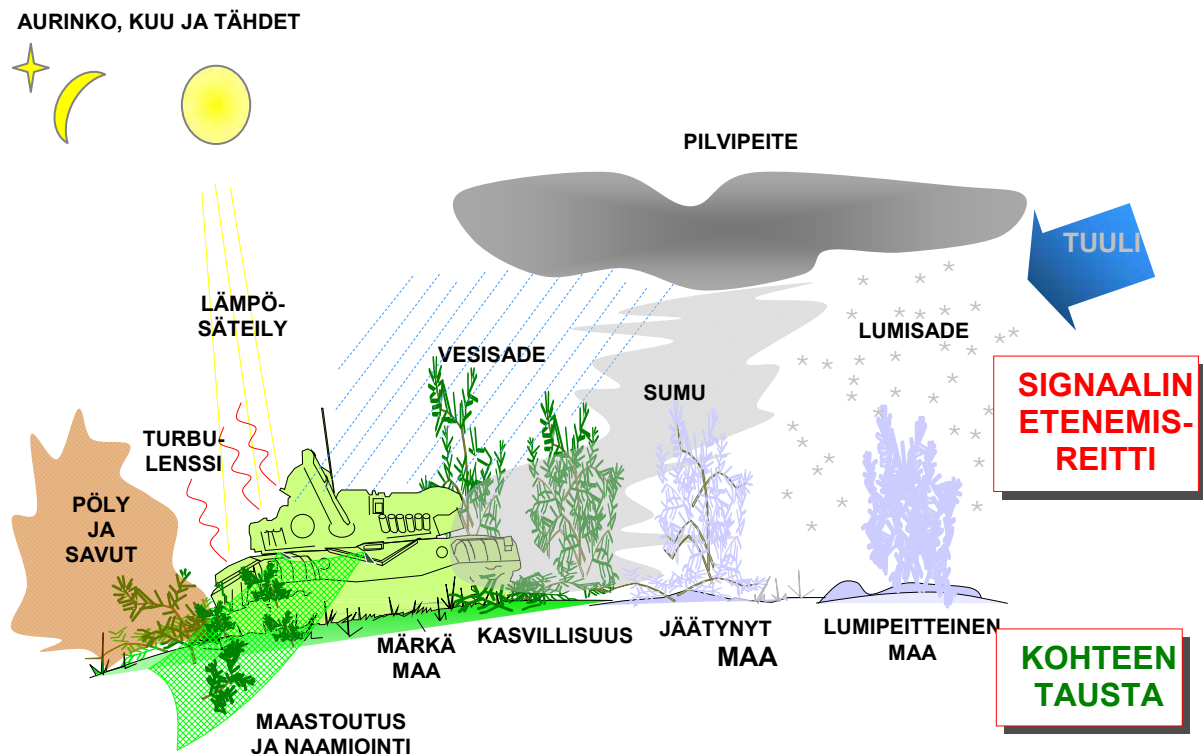
Kuva 105: Yhtymän vastuualueella toimii tai sitä valvoo ja tiedustelee useita erityyppisiä sensorijärjestelmiä, jotka yhdessä kykenevät muodostamaan hyvin kattavan kuvan sekä omista että vihollisen joukoista ja sen aikeista. Erillisinä näistä sensoreista on vain rajallisesti hyötyä.

Monisensorifuusiolla voidaan luoda kattava neliulotteinen (sis. sähkömagneettisen spektrin) *tilannekuva*, joka sisältää vihollisen lisäksi myös omat joukot ja järjestelmät. Tekemällä tämän tilannekuvan pohjalta tilanne- ja uhka-analyysit saavutetaan päätöksenteon perusteeksi riittävä *tilannetietoisuus*. Tilannetietoisuus käsittää siten sekä senhetkisen tilannekuvan, että käsityksen siitä, miten tähän tilanteeseen on tultu ja mitä seuraavaksi todennäköisesti tapahtuu. Siten tilannetietoisuus liittyy tilannekuvaan syy-seuraus-suhteet ja johtopäätökset

sekä ennusteet. Tilannetietoisuuden luominen edellyttää siten älykästä sensorifuusiota ja sopivia menetelmiä, kuten tiedon louhintaa, hahmontunnistusta, kykyä hakea suuresta yhteiskäyttöisestä tietomassasta olennainen informaatio ja liittää se sopiviin uhka- ja toimintamalleihin.

SENSORIN TOIMINTAYMPÄRISTÖ

Sensorin toimintaan vaikuttaa sensorin sisäisten ominaisuuksien lisäksi kohteen ja sen taustan ominaisuudet ja signaalin etenemisreitillä oleva väliaine. Sensorin kannalta kriittiset kohteen ominaisuudet voivat sensorin tyypistä riippuen olla esimerkiksi tutkapoikkipinta-ala, lämpöheräte, radiotaajuiset lähetteet tai optiset heijastusominaisuudet. Myös kriittiset taustan parametrit riippuvat siitä millä aallonpituusalueella sensori toimii: elektronisen tiedustelun sensoreiden kannalta keskeistä on luonnollisesti radiotaajuinen taustakohina, häiriöt ja muut spektrissä näkyvät järjestelmät. Optisen ja millimetriaaltoalueen sensorin kannalta myös kasvillisuuden määrä ja tyyppi, maan kosteus ja peitteisyys yms. ovat merkittäviä.

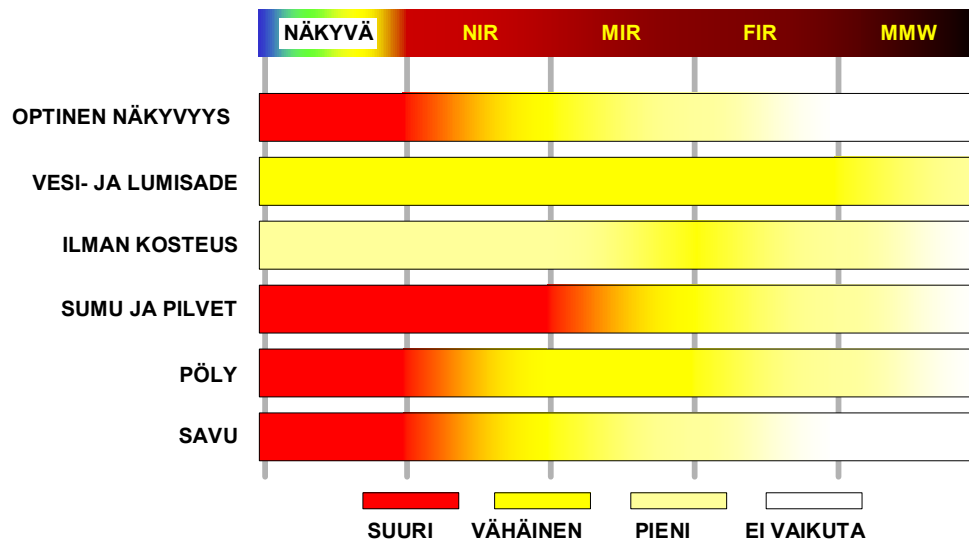


Kuva 106: Sensorin toimintaan vaikuttavat taustan ja signaalin etenemisreitillä olevan väliaineen keskeiset tekijät. Näiden merkitys riippuu paitsi sensorin toiminta-aallonpituudesta, myös sensorin käyttötarkoituksesta.

Väliaineen vaikutukseen kuuluu ilmakehän ainesosien, ilmaston, vuodenajan, vuorokaudenajan ja säätilan lisäksi tilanteen mukaiset tekijät, kuten pöly ja erilaiset savut – sekä kohteiden laukaisemat suojasavut, että taistelun myötä syntyneet palosavut.

Kuvassa 107 on esitetty eri tekijöiden vaikuttavuutta erityyppisten sensoreiden toimintaan. Kuvasta nähdään, että säätila vaikuttaa merkittävästi vain optisten ja optronisten sensoreiden toimintaan. Lisäksi sillä on jonkin verran vaikutusta lyhyen kantaman millimetriaaltoalueella

toimiviin sensoreihin. Vaikka asia ei kuvasta täysin hahmotu, sää vaikuttaa myös pidemmällä aallonpituuksilla, *jos kantama on riittävän pitkä*. Sade esimerkiksi estäisi pitkän kantaman millimetrisensorin toiminnan täysin, mutta tällä ei ole merkitystä sen vuoksi, että millimetrisensoreita ei käytetä pitkän kantaman sovelluksissa.



Kuva 107: Signaalin etenemisreitit eri parametrien vaikutus eri aallonpituusalueilla toimivien sensoreiden toimintaan.

Luvun seuraavissa osissa käsitellään keskeisiä taistelukentän sensoreita, tutkaa, elektronisen tiedustelun sensoreita ja optronisia sensoreita. Näistä esitetään toimintaperiaate, keskeiset toimintaan vaikuttavat luonnonilmiöt ja keinot sekä vaikuttaa näihin sensoreihin elektronisen sodankäynnin menetelmin että mahdollisuudet suojata sensoreita elektroniselta sodankäynniltä.

TUTKA

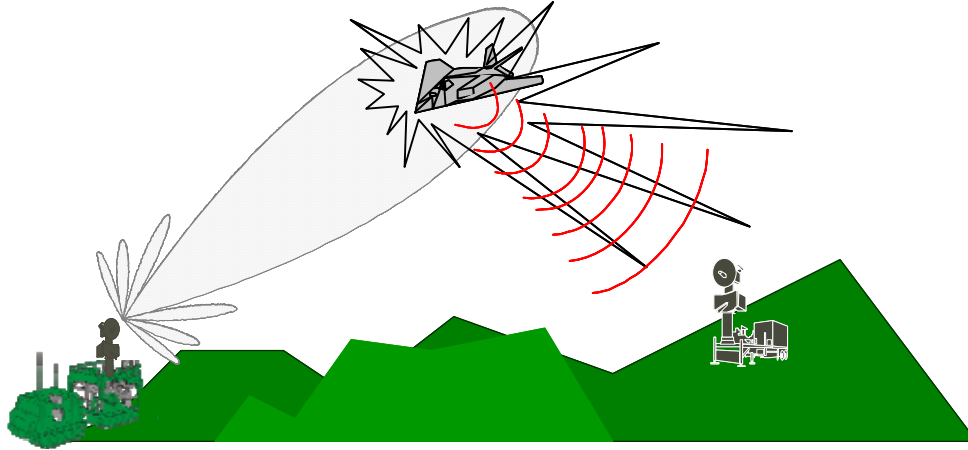
Tutkan englannin kielen nimitys radar tulee sanoista Radio Detecting And Ranging, eli radioaaltoihin perustuva havainnointi ja etäisyydenmittaus. Tutkan toiminta perustuu sähkömagneettisen säteilyn suuntaamisen ja lähettämiseen, jolloin kohteesta heijastunut sekä sironnut säteily vastaanotetaan niin, että sen perusteella voidaan määrittää kohteen suunta ja etäisyys. Pelkistettynä tutkan tehtävät ovat:

1. Ilmaista maalin olemassaolo aistimalla maalista heijastunutta säteilyä.
2. Määrittää maalin etäisyys.
3. Selvittää maalin suunta kapeakeilaisella antennilla.
4. Paikantaa maalin sijainti etäisyyden ja suunnan perusteella.
5. Arvioida maalin nopeus dopplertaajuuden avulla.

Tutkatyypit

Tutkat voidaan luokitella useiden eri periaatteiden mukaisesti. Sotilastutkat jaetaan: ennako-
varoitus-, valvonta-, seuranta-, tulenjohto-, kartoitus-, navigointi- ja säätutkiin sekä hakupää-
tutkiin. Tutkat voidaan jakaa myös lähettimen ja vastaanottimen sijoituspaikan perusteella.
Tällöin tutkat jaetaan mono-, bi- ja multistaattisiin sovelluksiin.

Monostaattisella (yksipaikkatutka) tarkoitetaan tutkaa, jonka vastaanotin ja lähetin on sijoitet-
tu samaan laitteistotilaan, vaikka ne käyttäisivätkin eri antennoja.



Kuva 108: Kaksipaikka- ja monipaikkatutkien tutkien etuina ovat yksipaikkatutkia parempi häirinnän sieto ja kyky havaita häivemaaleja, jotka on suunniteltu sirottamaan ja heijastamaan tutkan lähettämän pulssin muualle kuin tulosuuntaan.

Bistaattisessa tutkassa (kaksipaikkatutka) lähetin ja vastaanotin sijaitsevat eri paikoissa. Niiden välinen etäisyys voi vaihdella muutamista sadoista metreistä tuhansiin kilometreihin. Kaksipaikkatutkan suurin etu on erinomainen suoja elektronista hyökkäystä vastaan. Vaikka vihollinen paikantaisi lähettimen, sen häirintä on aivan turhaa, sillä vastaanotin sijaitsee muualla ja vihollinen paljastaa ainoastaan oman häirintäjärjestelmänsä, joka puolestaan voidaan suuntia kaksipaikkatutkan vastaanottimella. Toisena etuna voidaan pitää suurempaa todennäköisyyttä mitattaessa häivemaaleja, jotka yleisesti on suunniteltu sirottamaan ja heijastamaan pulssi muualle kuin tulosuuntaan. Bistaattisen tutkan vastaanottimen ja lähettimen synkronoiminen on merkittävä ongelma, koska vastaanottimen on tiedettävä valonnopeudella etenevän pulssin lähetys hetki etäisyyden mittaamiseksi. Yksi esimerkki bistaattisesta tutkasta on puoliaktiivinen valaisuun hakeutuva ohjus. Multistaattinen tutka on periaatteessa bistaattisen tutkan laajennettu versio, jossa voi olla useampi lähetin ja vastaanotin. Tavallisen tutkatoiminnan lisäksi multistaattinen tutka kykenee paikantamaan kohteen ristisuuntimalla.

Antennin ohjauksen mukaan jako voidaan suorittaa mekaanisesti ja elektronisesti keilaaviin tutkiin tai nämä molemmat tekniikat sisältävään hybridiin. Mekaanisesti keilaavalla tutkalla tarkoitetaan järjestelmää, joka suuntaa lähetettävän tehon kääntämällä antennia mekaanisesti haluttuun suuntaan. Mekaaninen keilaus voidaan toteuttaa sekä vaaka- että pystytasossa. Tämä kombinaatio on kuitenkin harvinainen muissa kun hävittäjien tai ilmatorjunnan seurantatutkissa. Mekaanisesti keilaavan tutkan perusongelmana on hitausmomentista johtuvat rajoitukset keilan suuntaamisessa.



Kuva 109: Vasemmalla F/A-18 Hornetin mekaanisesti keilaava APG-73 hävittäjätutka. Oikealla Joint Strike Fighterin elektronisesti keilaava tutka, jonka antenni on asetettu vinoon tutkapaikkipinta-alan minimoimiseksi. edestäpäin katsottaessa. [Raytheon ja Jane's IDR]

Tutkat, jotka keilaavat vaakatasonkin elektronisesti vaiheohjauksisella antenniryhmällä, siirtävät antennikeilan nopeasti paikasta toiseen – huomattavasti nopeammin kuin käytettäessä mekaanista pyyhkäisyä, jossa antennin hitausmomentti rajoittaa liikenopeuden muutoksia. vaiheohjauksisen antenniryhmän vahvimpana puolena on salamannopea pääkeilan suunnan muuttaminen: näin mahdollistetaan mielenkiintoisen kohteen pidempi valaisu sekä säteilykuvion minimin suuntaaminen häirintäsignaalia kohti samalla kun tutka valvoo koko avaruutta. Vaiheohjattuja antennejä käytetään uusissa nykyaikaisella tekniikalla toteutetuissa valvontatutkissa, kuten Ericssonin Erieye-tutkassa.

Tutkaa, jonka antennia ohjataan sekä mekaanisesti että elektronisesti kutsutaan hybridiksi. Antennin atsimuuttitaso keilataan mekaanisesti ja elevaatio elektronisesti. Tällä mahdollistetaan kolmiulotteinen paikannus, jonka perusteella voidaan ohjata esimerkiksi ilmatorjunta-ohjuksia. Esimerkkejä hybriditekniikkaa käyttävistä tutkista ovat Thomson Rac 3D ja Ericsson AMB.

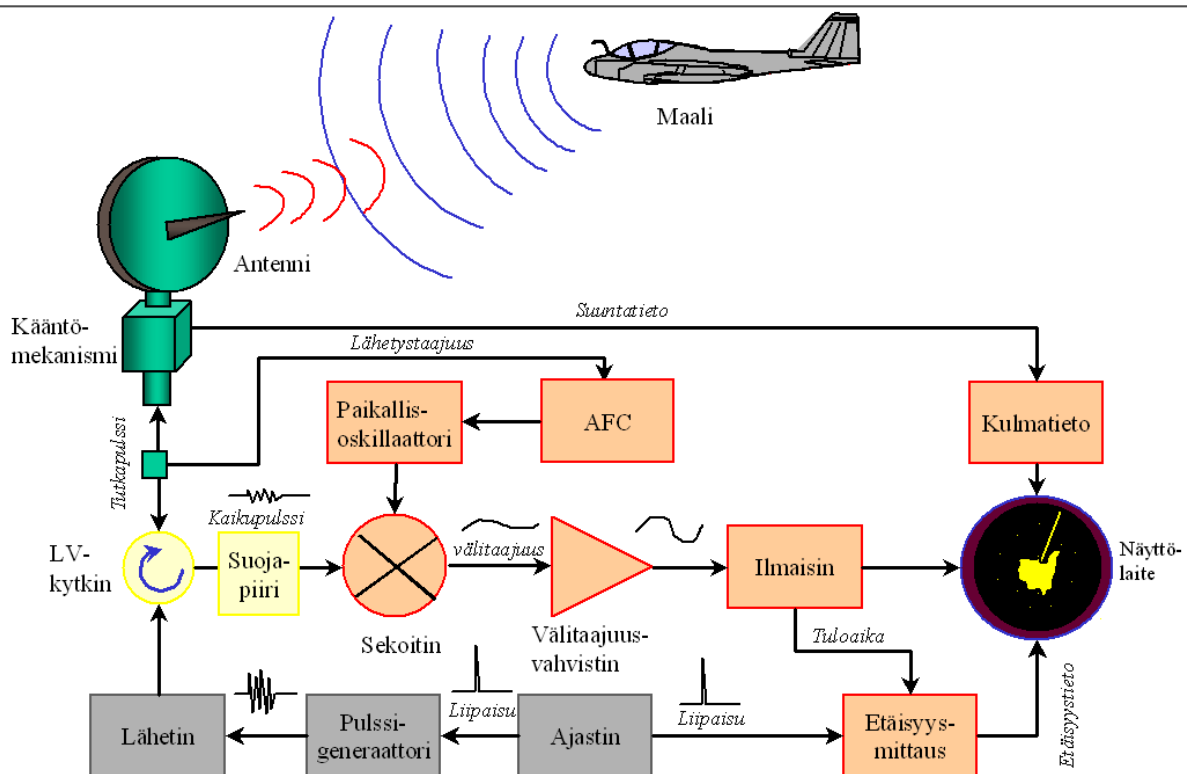
Ominaisuus	Kaukovalvonta	Valvonta	Seuranta	Tulenjohto	Hävittäjä	Maastonvalvonta
Esimerkkitutka	YLC-4		EricssonAMB	Crotale	F-18 APG-73	EricssonARTHUR
Taajuusalue [alue/GHz]	UHF0,3-1	S,2,4	C,4,8	X,8-20	X,8-20	X,8-10
Teoreettinen kantama[km]	350-500	50-100	40-60	10-20	1-200	20-40
Mittausetäisyys (suurin yksikäsitteinen) [km]	400-600	80-150	50-80	15-30	185	30-50
Huipputeho [kW]	40-1000	400-1000	30-100	200-400	10	0,004-0,010
Keskimääräinen teho [kW]	2,5	5-15	1-2	3-7	0,5	0,001-0,005
Antennivahvistus [dBi]	20-30	25-35	20-35	25-35	20-30	25-35
Antennin keilausnopeus [RPM]	10-40	20-40	30-60	30-90	loka.30	10-30
Pulssintoistotaajuus [Hz]	300-800	400-1500	4000-6000	5000-8000	1000-300000	3500-6000
Keilanleveys[°]	0,1-0,5	0,2-0,6	1-4	1-3	0,1-1,5	3-4
Pulssin pituus [us]	2-10	4-12	6-12	0,05-0,20	5-16	17-30
Etäisyysresoluutio [m]	300-1500	600-1800	900-1800	10-30	100-30000	100-200

Taulukko 7: Eri tutkatyypeille tyypillisiä ominaisuuksia.

Moderneimmissa tutkissa sekä atsimuutti- että elevaatiotason keilaus on toteutettu elektronisesti vaihesiirron avulla. Vanhemmissa elektronisesti keilaavissa tutkissa elevaatiotaso keilaetaan taajuuden avulla ja atsimuuttitaso vaihesiirrolla. Tällöin ei voida käyttää taajuuspyyhkäisyä esimerkiksi pulssikompressioon, koska antennin keilan pystysuunta muuttuisi taajuuden muuttuessa.

Tutkan rakenneosat

Tutkaa voidaan tekniikkansa osalta pitää koko taistelukentän monimutkaisimpana laitteena. Vaikka tutka on suuri, monimutkainen ja kallis järjestelmä, sen voidaan ajatella koostuvan radiotekniikan peruslohkoista. Tutkassa nämä pienet lohkot on integroitu yhdeksi saumattomasti toimivaksi kokonaisuudeksi. Kuvassa 110 on pulssitutkan yksinkertaistettu lohko-kaavio.



Kuva 110: Tutkan yksinkertaistettu rakenne, jossa lähettimeen, vastaanottimeen ja lähetin-vastaanottovaihtopiiriin kuuluvat lohkot on merkitty erivärisinä.

Lohkokaavioitasolla tutka sisältää lähettimen, vastaanottimen, LV-kytkimen (lähetysvastaanottovaihtokytkin eli duplekseri), antennin, ilmaisimen, näyttölaitteen ja ajastimen. Ajastin generoi tutkajärjestelmän liipaisusignaalit, jotka käynnistävät sekä tutkan lähettimen, että etäisyyden mittausjärjestelmän. Tavallisesti ajastimen lähettämien liipaisupulssien väliaika voidaan ohjelmoida tai muodostaa satunnaisesti eri pituisiksi, jolloin on kyse pulssin-toistotaajuuden harituksesta. Oletetaan esimerkkitutkan mikroaaltolähteeksi kulkuaaltovahvistin eli TWT (travelling wave tube). Tässä tapauksessa pulssigeneraattori synnyttää korkeajännitteisen ja halutun pituisen pulssin tutkan lähettimeen, joka synnyttää suuritehoisen *tutkapulssin*, joka suurtaajuuspulssi ohjataan LV-kytkimen kautta antenniin. Kulkuaaltovahvistimena lähettämä suuritehoinen tutkapulssi kestää pulssigeneraattorin synnyttämän pulssin ajan.

LV-kytkin on yleisesti kolmiporttinen, aaltoputken kaltainen komponentti, joka päästää sisään tulleen signaalin ainoastaan sisääntuloportin vasemmanpuoleiseen ulostuloon. Näin lähetetty tai vastaanotettu signaali voidaan johtaa haluttuun aaltoputkeen ja sitä pitkin haluttuun lohkoon. Täten lähettimestä tuleva tutkapulssi johdetaan antenniin ja antennin vastaanottama *kaikupulssi* johdetaan vastaanottimeen. LV-kytkimessä on usein suojapiiri, joka estää lähetyspulssin vuotamisen vastaanottimeen. Vaikka LV-kytkimen vaimennus on suuri, se ei yksinään riitä eristämään useiden kilowattien lähetyspulssia herkästä vastaanottimesta, joka on suunniteltu ilmaisemaan nano-pikowattiluokan signaaleita.

Antennin sieppaama kaikupulssi johdetaan LV-kytkimen kautta vastaanottimeen, joka ilmaisee maalin olemassaolon. Vastaanottimen etupää koostuu sekoittimesta ja paikallisoskillaattorista. Usein ennen sekoitinta edeltää suurtaajuusvahvistin. Sekoittimessa vastaanotetun kaikupulssin ja paikallisoskillaattorin taajuuksien erotuksena syntyy *välitaajuus* (Intermediate Frequency). AFC:n (Automatic Frequency Control) avulla sekoittimen jälkeinen välitaajuus pidetään vakiona. Paikallisoskillaattorin taajuutta muutetaan sopivasti, jolloin esimerkiksi hyppivätaajuisen lähetteen ja paikallisoskillaattorin taajuuksien sekoittimessa synnyttämä välitaajuus pysyy aina samana lähetystaajuudesta riippumatta. Sekoitin on vastaanottimessa syntyvän kohinan suurin aiheuttaja.

Vastaanottimen välitaajuusvahvistin sisältää välitaajuuteen optimoidun kapeakaistaisen kaistanpäästösuodattimen, jonka tarkoituksena on rajoittaa muiden kuin halutulla välitaajuuskaistalla olevien signaalien pääsy ilmaisimeen. Välitaajuusvahvistimen ja kaistanpäästösuodattimen tarkoituksena on parantaa vastaanottimen selektiivisyyttä. Selektiivisyyden parantaminen vaatii sovitettua, kiinteällä taajuudella toimivaa vahvistinta ja sovitettua suodatinta, joiden käyttö ennen sekoitinta olisi mahdotonta varsinkin hyppivätaajuisista lähetettä käytävissä tutkissa.

Tutkan vastaanotin välittää etäisyyden mittauslaitteelle tutkakaiun *tuloajan*, jonka perusteella maalin etäisyys lasketaan. Tämän jälkeen antennin kääntömekanismista saatu tieto kaiun tulosuunnasta välitetään näyttölaitteeseen, jossa *suuntatieto* sekä *etäisyystieto* muutetaan maalin sijainniksi.

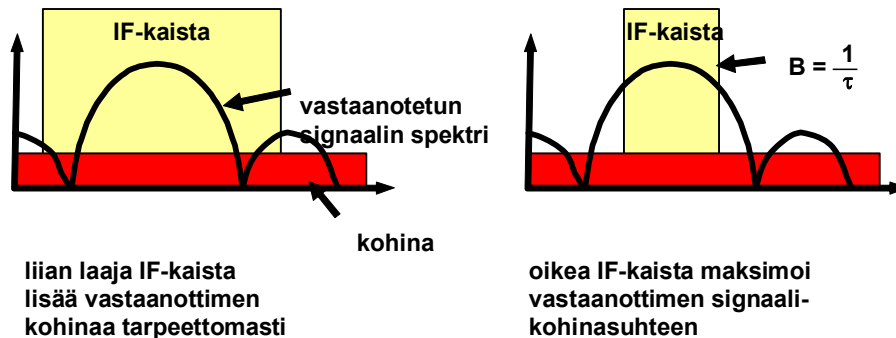
Vastaanottimen ilmaisin demoduloi kaikupulssin välitaajuudesta. Tämän jälkeen pelkkä pulssi vahvistetaan videovahvistimella ja välitetään näyttölaitteelle. Tässä yksinkertaistetussa esimerkissä näyttöyksikkö on PPI-tyyppinen (Plan Position Indicator). Näyttölaitteessa tutkaantenni on sijoitettu keskelle kuvaruutua ja havaitut maalit esitetään pisteinä tulosuunnan ja etäisyyden funktiona.

Sovitettu suodatin

Sovitetun suodattimen tarkoituksena on minimoida ilmaisimelle saapuva kohina suhteessa vastaanotettuun tutkakaiun energiaan. Sovitettu suodatin suunnitellaan ja toteutetaan siten, että sen taajuusvaste on yhtenäinen tutkapulssin spektrin kanssa. Suodatin sovitetaan siis aina tapauskohtaisesti lähetettävän pulssin ominaisuuksiin. Ideaalisessa tapauksessa sovitettu suodatin ei vaimenna vastaanotettua pulssia; käytännössä häviö on noin 1 desibeli. Sovitetun suodattimen teknisestä ratkaisusta ja sovelluksesta kerrotaan tarkemmin pulssikompression yhteydessä.

Ennen sovitetun suodattimen käyttöä vastaanottimen välitaajuuskaistanleveys tulee rajata mahdollisimman pieneksi pohjakohinatason minimoimiseksi. Kaistan rajaaminen väärissä

pulssin muotoa, mutta parantaa signaalikohina-suhdetta. Mikäli pulssin muoto halutaan säilyttää lähes vastaavanlaisena kuin lähetettäessä, välitaajuuskaistanleveyden tulee olla vähintään viisi kertaa niin suuri kuin pulssin kaistanleveys. Tämä ei kuitenkaan ole kovinkaan suositeltava vaihtoehto, koska viisinkertainen kaistanleveys pienentää signaalikohina-suhdetta noin 7 desibeliä.



Kuva 111: Vastaanottimessa signaalin spektri rajataan välitaajuussuotimella siten, että ilmaisimelle tuleva signaali-kohinasuhde maksimoiduu.

Teholähteet

Tutkissa käytetään erilaisia teholähteitä suuritehoisen pulssin muodostamiseksi. Suurimpana erona ovat niiden toiminnan peruseriaatteet. Teho-oskillaattorivahvistimet generoivat ja vahvistavat itse oman toimintataajuutensa värähtelemällä halutulla taajuudella sekä tehotasolla, joten ne eivät tarvitse erillistä pulssilähdettä. Tähän luokkaan kuuluvat erilaiset magnetronit sekä ristikenttävahvistimet.

Kulkuaaltovahvistin tarvitsee nimensä mukaisesti pulssilähteen tuottaman pulssin tuottaakseen vahvistetun signaalin. Kulkuaaltotyyppisiä vahvistimia ovat klystronit ja kulkuaaltoputket (Travelling Wave Tube).

Puolijohdevahvistimilla tarkoitetaan esimerkiksi FET-transistoreita käyttäviä RF-vahvistimia. Niitä käytetään yleisimmin vaiheohjauksissa antenneissa, mm-hakupäissä sekä pienimuotoisissa häirintälähettimissä. Elektronisesti keilaavassa tutkassa voi olla useita satoja tai jopa tuhansia vahvistimia, joiden yhteenlaskettu huipputeho yltää halutulle tasolle. Myös puolijohdevahvistimeen perustuva tutka tarvitsee erillisen signaalilähteen pulssien generoimiseen.

Tutkayhtälö

Tässä luvussa esitetään tutkan keskeisimmät toimintaan vaikuttavat parametrit ja niiden keskinäinen vuorovaikutus. Tutkan antennikeilansa suuntaan lähettämä teho (EIRP, Effective Isotropically Radiated Power) saadaan kertomalla tutkan lähetysteho P_t antennin vahvistuksella G_t :

$$\text{EIRP} = P_t \cdot G_t$$

Lähtimestä etäisyydellä R_t olevaan maaliin kohdistuva tehotiheys saadaan kaavasta:

$$P_{\text{inc}} = P_t \cdot G_t \cdot \frac{1}{4\pi \cdot R_t^2}$$

Maaliin osuvasta tehosta heijastuu takaisin tutkaan maalin tutkapoikkipinnasta σ riippuva teho P_{ref} :

$$P_{\text{ref}} = \sigma \cdot P_{\text{inc}}$$

Tutkan kannalta maali voidaan ajatella isotrooppiseksi säteilijäksi. Kun heijastunut säteily on edennyt matkan R_r vastaanottimen antennille, sen tehotiheys on siten

$$P_{\text{rad}} = P_{\text{ref}} \cdot \frac{1}{4\pi \cdot R_r^2}$$

Tästä antennille tulevasta tehotiheydestä tutka kykenee sieppaamaan antennin tehollisesta sieppauspinta-alasta A_e riippuvan osuuden:

$$P_r = P_{\text{rad}} \cdot A_e$$

Koska järjestelmistä määritellään yleensä antennivahvistus G eikä A_e :tä, voidaan A_e korvata vahvistuksella seuraavien kaavojen avulla:

$$A_e = G_r \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi} \Leftrightarrow G_r = \frac{4\pi \cdot A_e}{\lambda^2}$$

Tutkan vastaanottamaksi tehoksi saadaan siis

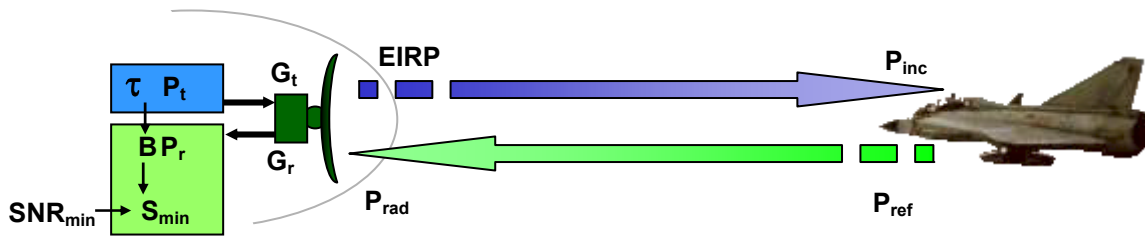
$$P_r = P_t \cdot G_t \cdot \frac{1}{4\pi \cdot R_t^2} \cdot \sigma \cdot G_r \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot \frac{1}{4\pi \cdot R_r^2} = \frac{P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4\pi)^3 \cdot R_t^2 \cdot R_r^2}$$

Monostaattisessa tutkassa lähtin ja vastaanotin on integroitu samaan paikkaan, joten $R_t = R_r$ ja yleensä $G_t = G_r$. Tällöin tutkayhtälö sievenee muotoon:

$$P_r = \frac{P_t \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4\pi)^3 \cdot R^4}$$

Mikäli pienintä vastaanotettavissa olevaa tehoa, jolla maali voidaan vielä havaita, merkitään $P_{r,\text{min}}$, niin tutkan maksimikantama:

$$R_{\text{max}} = \sqrt[4]{\frac{P_t \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4\pi)^3 \cdot P_{r,\text{min}}}}$$



Kuva 112: Tutkayhtälön keskeiset parametrit.

Edellä on kuvattu pelkistetty teoreettinen malli. Todellisuudessa on otettava huomioon tutkajärjestelmän häviöt (L_{sys}) ja yli 3 GHz:n taajuudella toimivissa tutkissa myös ilmakehän aiheuttama vaimennus (L_{atm}). Jos vaimentavat termit ilmaistaan läpäisykertoimina (suuruus alle yhden)¹⁸, niin vastaanotettavan tehon ja maksimietäisyyden kaavat voidaan kirjoittaa muotoon:

$$P_r = \frac{P_t \cdot G_t^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma \cdot L_{sys} \cdot L_{atm}}{(4\pi)^3 \cdot R^4} \quad R_{max} = \sqrt[4]{\frac{P_t \cdot G_t^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma \cdot L_{sys} \cdot L_{atm}}{(4\pi)^3 \cdot P_{r,min}}}$$

Pienin maalin havaitsemiseen tarvittava vastaanottoteho $P_{r,min}$ riippuu tutkan kohinatasosta N ja pienimmästä ilmaisuun tarvittavasta signaalikohinasuhteesta SNR_{min} . Tutkan kohinataso on järjestelmässä käytettävän kaistanleveyden B ja tutkajärjestelmän kohinan spektritiheyden N_0 tulo:

$$N = N_0 \cdot B = k \cdot T_{sys} \cdot B,$$

jossa T_{sys} on järjestelmän kohinalämpötila ja k Boltzmannin vakio. Kun tutkajärjestelmälle halutaan määrittää järjestelmän kohinalämpötila, on tapana redusoida kaikki kohinalähteet samaan pisteeseen, esim. antennin syöttöön. Tällöin järjestelmän kohinalämpötila on

$$T_s = T_a + T_r + L_r \cdot T_e,$$

jossa T_a on antennin kohinalämpötila, T_r on antennin syötön ja RF-vahvistimen välisen siirtojohtoon aiheuttama kohinalämpötila, L_r on em. siirtojohtoon häviökerroin ja T_e on vastaanottimen tuloon redusoitu kohinalämpötila. Antennin kohinalämpötila T_a riippuu mm. antennin korotuskulmasta, taajuudesta ja antennin fyysisestä lämpötilasta. Siirtojohtoon kohinalämpötila T_r on

$$T_r = T_{tr} (L_r - 1), \text{ jossa } T_{tr} \text{ on siirtojohtoon terminen lämpötila.}$$

Vastaanottimen redusoitu kohinalämpötila on:

¹⁸ Yleensä ilmakehän vaimennus ilmoitetaan desibeleinä kilometriä kohti, mutta laskuissa esitetään läpäisykertoimena, eli $L_{atm} < 1$. Järjestelmän häviöt puolestaan esitetään yleensä häviöinä, eli $L_{sys} > 1$. Tämän vuoksi on syytä olla erityisen tarkkaavainen siitä, kummasta on kyse. Erehdysten välttämiseksi on oltava systemaattinen häviötermien sijoittamisessa nimittäjään tai osoittajaan.

$$T_e = T_0(F - 1)$$

Vaadittu minimi signaali-kohinasuhde SNR_{\min} riippuu tutkajärjestelmästä edellytetystä todennäköisyydestä P_d ja virheilmaisutodennäköisyydestä P_{fa} . Mikäli havaitsemistodennäköisyys halutaan suureksi, joudutaan ilmaisukynnystä – eli sitä signaalitehoa, jolla järjestelmä hälyttää maalista – laskemaan. Ilmaisukynnyksen laskeminen johtaa siihen, että normaali taustakohina sekä esimerkiksi maastosta tuleva tutkakaiku ylittää entistä todennäköisemmin hälytysrajan. Tällöin virheilmaisujen määrä kasvaa. Käytännössä tutkajärjestelmille määritellään suurin sallittu virheilmaisujen määrä aikayksikössä (FAR, False Alarm Rate):

$$FAR = P_{fa} \cdot B_n$$

jossa B_n on järjestelmän kohinakaistanleveys, jota voidaan approksimoida sovitetun suodattimen kaistanleveydellä B . Siten virheilmaisujen ilmenemistäajuus FAR ja kaistanleveys B määräävät virheilmaisujen todennäköisyyden P_{fa} , joka puolestaan yhdessä järjestelmästä vaaditun ilmaisutodennäköisyyden P_d kanssa määrää pienimmän signaali-kohinasuhteen SNR_{\min} .

Tutkan vastaanottimen kaistanleveys voidaan yleensä approksimoida tutkapulssin pituuden τ perusteella:

$$B \approx \frac{1}{\tau}$$

Yhdistämällä edellä kuvatut kaavat tutkan kantamaksi saadaan:

$$R_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_t \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \tau \cdot \sigma \cdot L_{\text{sys}} \cdot L_{\text{atm}}}{(4\pi)^3 \cdot k \cdot T_{\text{sys}} \cdot SNR_{\min}}}$$

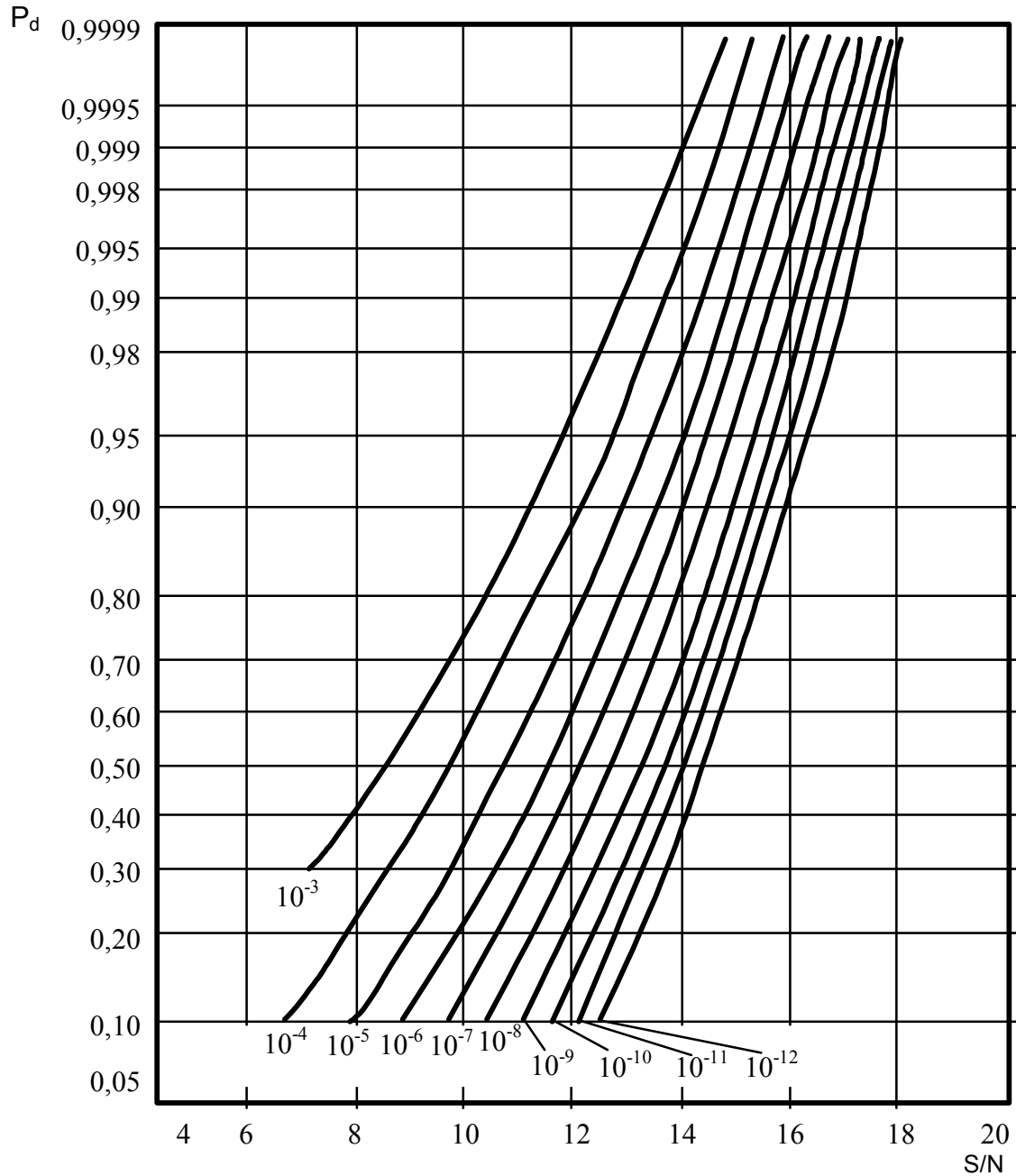
Kaavasta nähdään, että kantamaa voidaan kasvattaa:

a) lisäämällä

1. lähetystehoa (vaikutus $\propto \sqrt[4]{P_t}$)
2. antennivahvistusta (vaikutus $\propto \sqrt{G}$), mikäli aallonpituus ja integroitavien pulssien lukumäärä on vakio
3. pulssin pituutta (vaikutus $\propto \sqrt[4]{\tau}$)

b) vähentämällä

4. järjestelmän häviöitä (vaikutus $\propto \sqrt[4]{L_{\text{sys}}}$)
5. järjestelmän kohinalämpötilaa (vaikutus $\propto \sqrt[4]{T_{\text{sys}}}$)
6. pienintä sallittua signaalikohinasuhdetta (vaikutus $\propto \sqrt[4]{SNR_{\min}}$)



Kuva 113: Vaadittu yhden pulssin signaalikohinasuhde ennen integrointihyötyä ja ilman maalin häilyntää.

Lähetystehon lisääminen lisää etäisyyttä, jolta tutka paljastuu ja lisäksi käytetyt lähetin-komponentit sekä järjestelmän tarvitsema sähkö- ja jäähdytysteho asettavat lähetystehon lisäämiselle omat rajansa. Antennivahvistuksen määrää antennin fyysisen koon suhde aallonpituuteen, minkä vuoksi suuri antenni antaa paremman vahvistuksen. Tutkajärjestelmän maksimikoko ja paino määräävät antennin suurimmat sallitut mitat. Aallonpituuden pienentäminen johtaa myös suurimman saavutettavissa olevan lähetystehon pienenemiseen ja ilmakehän etenemisvaimennuksen kasvamiseen, minkä vuoksi em. termien kesken on saavutettava toimiva kompromissi. Pulssin pituuden kasvattaminen vähentää järjestelmän kohinatasoa kaventamalla kaistanleveyttä. Samalla pidempi pulssi toimittaa maaliin enemmän säteilyenergiaa kuin lyhyt. Pulssin pituuden kasvattaminen heikentää kuitenkin

etäisyysresoluutiota ja hidastaa tutkan pyyhkäisytaajuutta, joten näidenkin tekijöiden kesken on järjestelmäsuunnittelussa löydettävä oikea kompromissi. Järjestelmän häviöitä voidaan vähentää yksinkertaistamalla rakenteita ja käyttämällä häviöttömpiä – ja usein kalliimpia – komponentteja, mikä puolestaan lisää järjestelmän valmistuskustannuksia. Vähäkohinaiset vahvistimet ovat kehittyneet niin hyvin, ettei kohinalämpötilaa voida olennaisesti pienentää nykyisestä. Antennin kohinalämpötila riippuu lähinnä siitä, mihin antenni on suunnattu. Tämän vuoksi on huolehdittava siitä, etteivät pääkeilat ja tärkeimmät sivukeilat kohdistu suurikohinaiseen taustaan.

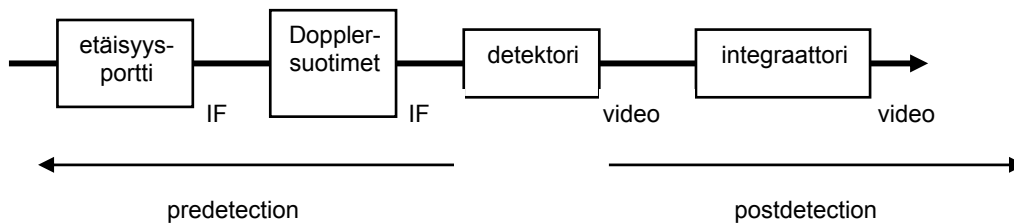


Kuva 114: Suomalaisen ilmatorjunnan johtoportaan maalinsoitustutka. [SA-kuva]

Ilmaisimen kannalta olennaista on maalista saadun signaalienergian suhde kohinaenergiaan. Tämän vuoksi pienintä sallittua signaali-kohinasuhdetta voidaan kasvattaa valaisemalla maalia pidempään joko pidentämällä pulssin pituutta τ tai lähettämällä useampia pulsseja ja integroimalla vastaanotettuja kaikupulsseja. Mikäli tutkajärjestelmä integroi pulsseja epäkoherentisti sovitettun suodattimen jälkeen, on integroinnin parannuskerroin

$$I(n) = n \cdot E_i \cdot (n) = 1,25 \cdot n^{0,75},$$

jossa n on integroitavien pulssien lukumäärä ja $E_i(n)$ on integroinnin tehokkuuskerroin. Pulssien pituus, suurin sallittu maalin etäisyys, keilanleveys sekä tutkan pyyhkäisy-nopeus asettavat ylärajan integroitavien pulssien lukumäärälle.



Kuva 115: Vastaanotettujen pulssien integrointi voidaan toteuttaa ennen ilmaisua (pre-detection integration) tai ilmaisimen jälkeen (post-detection integration).

Tutkan antennivahvistus voidaan approksimoida säteen keilanleveyden avulla:

$$G \approx \eta^{\theta \cdot \phi}, \text{ jolloin } t_d = \frac{4\pi \cdot t_0}{G \cdot \Omega}$$

Toisaalta $t_d = \frac{n}{\text{PRF}}$ ja keskimääräinen lähetysteho on

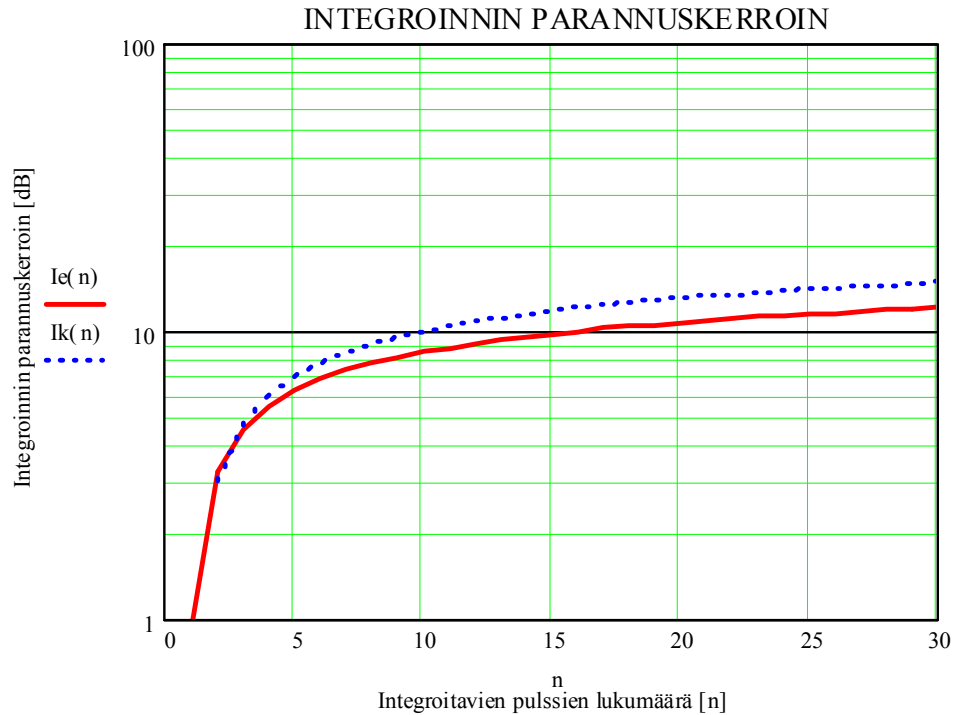
$$P_{av} = \tau \cdot \text{PRF} \cdot P_t$$

Tällöin valvontatutkan tapauksessa yhtälö saadaan muotoon

$$R_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_{av} \cdot A_e \cdot \sigma \cdot E_i \cdot t_0}{4 \cdot \pi \cdot T_{\text{sys}} \cdot \text{SNR}_1 \cdot L_s \cdot \Omega}}$$

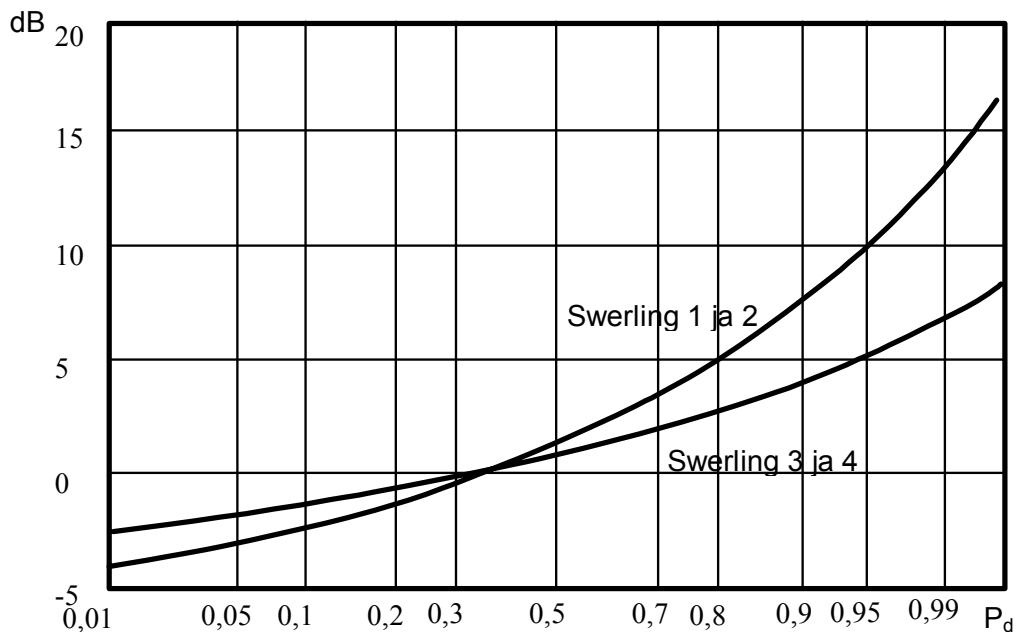
jossa SNR_1 on yhdeltä pulssilta vaadittu signaalikohinasuhde, L_s kokonaishäviöt, t_0 pyyhkäisy aika ja Ω keilaamiseen kuuluva kokonaisaika. Tarvittava signaali-kohinasuhde voidaan arvioida kuvasta 113 ja saavutettavissa oleva integrointihyöty kuvasta 116.

Tutkan kantama riippuu maalin tutkapaikkipinta-alasta. Tutkapaikkipinta-ala muuttuu sekä hitaasti maalin valaisukulman muuttuessa että nopeasti eri puolilta maalia heijastuneiden ja sironneiden aaltokomponenttien interferoidessa keskenään. Tätä tutkapaikkipinta-alan muutosta kutsutaan häilynnäksi. Maalin häilyntä on monimutkainen prosessi, jota on vaikea mallintaa. Siihen on kuitenkin kehitetty ns. Swerling-mallit. Swerling 0 on häilymätön maali. Swerling 1 ja 2 ovat useista riippumattomista samansuuruisista satunnaissirottajista koostuvia maaleja. Malli 1 soveltuu hitaan häilyntän mallintamiseen, esimerkiksi suurten suihkukoneiden mallintamiseen silloin kun pulssintoistotaajuus ja antennin pyörimisnopeus ovat riittävän suuria. Malli 2 soveltuu nopeasti häilyvien maalien mallintamiseen, erityisesti potkurikoneiden mallinnukseen, kun antennin pyörimisnopeus ja PRF ovat riittävän pieniä. Swerling 3 ja 4 malleissa on yksi dominoiva sirottaja ja useita pienempiä. Malli 3 soveltuu hitaaseen ja 4 nopeaan häilyntään. Malleja 3 ja 4 voidaan soveltaa sylinterimäisten maalien, esim. ohjusten mallintamiseen.



Kuva 116: Tutkapulssien integroiminen voidaan tehdä joko koherentisti tai epäkoherentisti. Kuvaajasta nähdään, että yli 10 pulssin epäkoherentti integrointi ei juurikaan enää paranna signaali-kohinasuhdetta. Vastaavasti koherentin integroinnin kustannustehokkuuden raja on noin 15 pulssia.

Häilynnän vaikutus tutkapoikkipinta-alaan ja havaitsemistodennäköisyyteen voidaan huomioida laskennallisesti lisäämällä vaadittua signaali-kohinasuhdetta. Tarvittava lisäys nähdään kuvasta 117.



Kuva 117: Maalin häilynnän huomioon ottamiseen tarvittava lisä signaali-kohinasuhteen eri häilyntämalleissa havaitsemistodennäköisyyden funktiona.

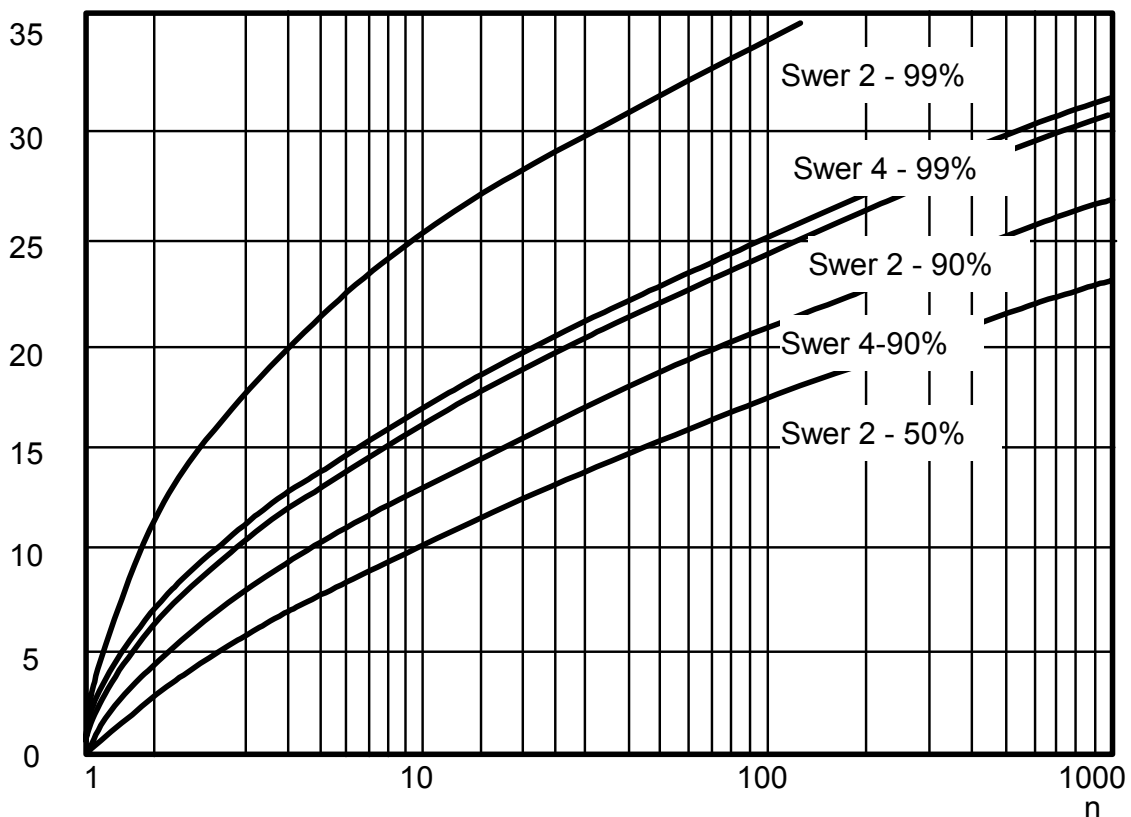
Maalin häilyntä vaikuttaa myös pulssien integrointihiyötysuhteeseen. Epäkoherentilla pulssien integroinnilla saatavissa oleva integrointihiyöty nähdään kuvasta 118.

Tutkan häviöt

Tutkan suorituskykyyn arvioitaessa ja laskettaessa erilaiset häviöt tutkan sekä elektronisissa komponenteissa että mekaanisissa osissa vaikuttavat oleellisesti lopputulokseen. Jotta tutkan suorituskyky voitaisiin arvioida laskennallisiin arvioihin perustuen, muun muassa ilmastoon vaikutus tulee huomioida radioaallon etenemiseen. Varsinaisesti suorituskykyyn vaikuttavat häviöt voidaan jakaa kahteen kategoriaan: järjestelmä- ja etenemishäviöihin. Joka tapauksessa molemmista kategorioista olevien kaikkien häviöiden arvioiminen ja huomioiminen saattaa olla useimmissa tapauksissa aivan tarpeetonta mutta jopa myös mahdotonta.

Etenemishäviöihin kuuluu kaikki ilmastoon kaasujen ja epäpuhtauksien sekä maastosta aiheutuvien monitie-etenemisten aiheuttamat signaalin vaimenemiset ennen kaikkien vastaanottoa. Etenemishäviöihin lasketaan myös vastaanotettavan kaiun pulssikohtainen amplitudivariaatio (skintilaatio), joka syntyy liikkuvan maalin valaisun aikana, jolloin maalin tutkakoikkupinta vaihtelee aiheuttaen kaiuun amplitudimuutoksia, joiden suuruus voi olla jopa 3 – 15 dB. Maalin häilyntä aiheuttaa myös etenemisvaimennusta, joka kuitenkin huomioidaan useimmiten signaali-kohinasuhdetta kasvattamalla Swerling-mallien avulla. Signaalin etenemisestä epähomogeenisessä ympäristössä on käsitelty tarkemmin *luvussa 2. Spektri*, josta saatavat fyysiset perusteet ovat helposti sovellettavissa myös tutkajärjestelmien signaalien etenemisten arvioinnissa.

$I(n)$ [dB]



Kuva 118: Epäkoherentilla integroinnilla saavutettava integrointihiyöty pulssin lukumäärän funktiona eri häilyntämalleissa.

Järjestelmähäviöt muodostuvat pääasiassa tutkan erilaisten komponenttien kuten radomin, antennin ja siirtolinjojen epäsovituksista, jotka aiheuttavat vaimennusta vastaanotettavaan kaikuun. Mikäli tutkan suorituskykyä laskettaessa kaikkia järjestelmähäviöitä ei tunneta riittävällä tarkkuudella tai valmistaja ei suostu ilmoittamaan niitä, voidaan ne arvioida alla olevan taulukon mukaisilla nyrkkisäännöillä.

Komponentti	Häviö [dB]
Radomin vaimennus	0.5 – 1
Antennin epäsovitus	0.5 – 1
Siirtolinjan siirtohäviöt	1 – 2
Kokonaishäviöt	2 - 4

Taulukko 8: Esimerkkejä tutkajärjestelmän eri osien tyypillisistä vaimennuksista.

Muita järjestelmähäviöitä aiheuttavia tekijöitä ovat tutkan mekaanisten osien kuluminen ja elektronisten komponenttien ikääntyminen, joiden aiheuttamien häviöiden ennustaminen on liian monimutkaista ja tarpeetonta ainakin tutka suorituskykyä arvioitaessa.

Tutkahäirintä

Tutkahäirinnällä ei kyetä estämään tutkan toimintaa kokonaan, eikä tähän edes pyritäkään. Häirinnan tavoitteena voi olla

- Estää suojattavan kohteen olemassaolon paljastuminen tutkavalvonnalle.
- Viivästä tutkaseurantaan joutumista. Tällä estetään yleensä ohjuksen laukaisu, vaikka tutkavalvonta olisikin havainnut kohteen valvomallaan alueella.
- Murtaa maalinseurantatutkan lukitus maaliin, mikä myös estää ohjuksen laukaisun tai tykin suuntauksen kohti suojattavaa kohdetta.
- Heikentää seurantatutkan tarkkuutta, jolla pyritään maksimoimaan maksimoida ohjuksen tai tykin ammusten ohitusetäisyys maalistaan.
- Estää ohjuksen tai aseiden herätesytyttimen optimaalinen toiminta, millä pyritään tuhoutumistodennäköisyyden pienentämiseen.

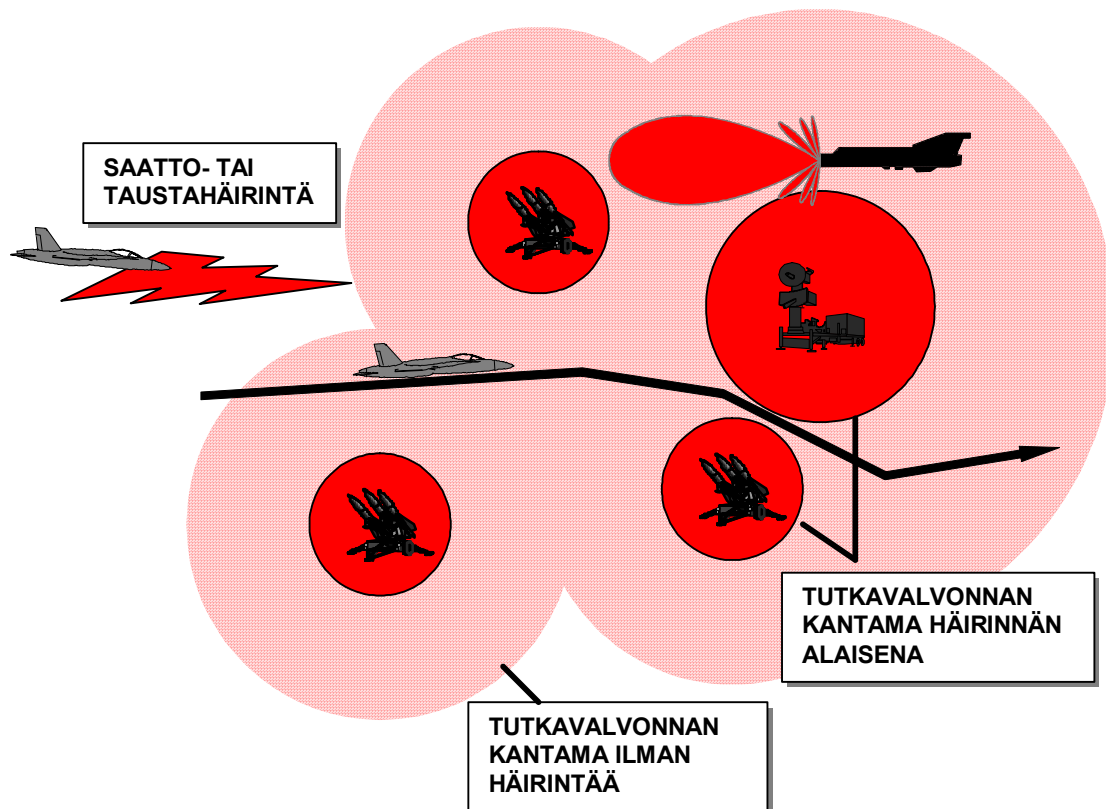
Esimerkiksi ilmapuolustuksen valvonta- ja seurantatutkien häirinnällä pyritään pienentämään valvonta- ja asejärjestelmien tehollista kantamaa niin paljon, että niitä vastaan voidaan hyökätä tutkan kantaman ulkopuolelta mutta oman asejärjestelmän sallimalta etäisyydeltä. Joissakin tilanteissa häirintä on riittävän tehokasta, jos sensori- ja asejärjestelmien kantamaa kyetään pienentämään niin paljon, että vihollisen puolustusjärjestelmään muodostuu aukko, jota se ei kykene valvomaan tai johon se ei kykene ampumaan ilmatorjuntaohjuksia. Tällaisen aukon synnyttäminen ja hyödyntäminen edellyttää omien järjestelmien herätteiden hallintaa, oikeata tilannekuvaa ja elektronisen vaikuttamisen koordinoitua käyttöä.

Häirinnan tehokkuutta voidaan mitata useilla eri kriteereillä:

- häirintä/hyötysignaali-suhde (J/S, Jamming-to-signal ratio)
- läpipolttotäisyys (etäisyys, jolla tutka kykenee ”polttamaan häirinnan läpi”)

- seurantavirhe (tracking error), eli virheellinen maalin kulmasuunta sensoriin nähden tai väärä mitattu etäisyys tai nopeus
- ohjuksen tai ammuksen ohitusetäisyys (miss distance)
- suojattavan kohteen selviytymistodennäköisyys (probability of survival)

Näihin palataan myöhemmin eri tutkatyyppien käsittelyn yhteydessä. Häirinnän mittarina käytetään yleisimmin J/S-suhdetta (JSR, J/S Ratio), jota käsitellään seuraavassa luvussa. On kuitenkin huomattava, että JSR ei aina kuvaa häirinnän onnistumista, esimerkiksi saavutettava seurantavirhettä.



Kuva 119: Mikäli kohteen – tässä rynnäkkökone – heräte on riittävän pieni, voidaan elektronisella vaikuttamisella pienentää vihollisen valvonta- ja asejärjestelmien tutkien kantamaa, jolloin yhtenäiseen peittoalueeseen muodostu aukkoja. Mikäli käytössä oleva tilannekuva on riittävän kattava ja reaaliaikainen, näitä aukkoja voidaan hyödyntää omissa operaatioissa.

Tutkahäirintäyhtälö

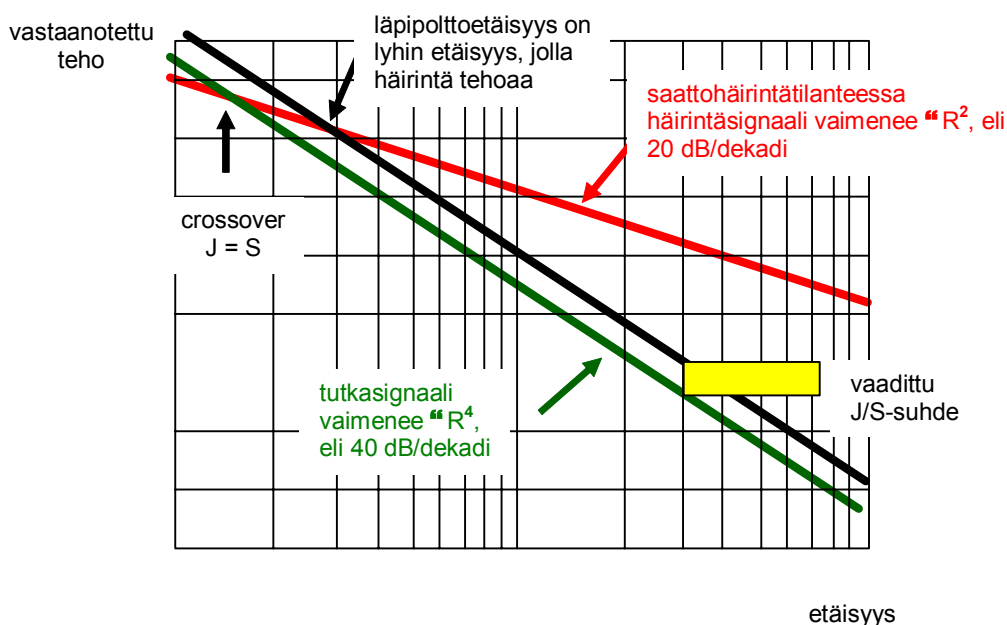
Tutkahäirintäyhtälö kuvaa hyöty- ja häirintäsignaalien suhdetta tutkan ilmaisimella. Tämä suhde määrittää maalin havaitsemisen todennäköisyyden. Tutkan suunnittelussa pyritään maksimoimaan hyötysignaalin, eli maalista tulevan kaiun suhde häiritsevään signaaliin. Aiemmin esitetyn mukaisesti maalista saatava signaaliteho on:

$$S = \frac{P_r G_r^2}{R_t^4} \cdot \sigma \cdot \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \cdot \frac{1}{L_r}$$

jossa P_r on tutkan lähetysteho, G_r antennivahvistus, R_t maalin etäisyys, σ maalin tutkapaikkipinta-ala, λ aallonpituus ja L_r tutkan häviötermi. Vastaavasti häirintäsignaalin teho tutkan ilmaisimella saadaan kaavasta:

$$J = \frac{P_j \cdot G_j \cdot G_{rj}}{R_j^2} \cdot \frac{\lambda^2}{(4\pi)^2} \cdot \frac{1}{L_j}$$

jossa P_j on häirintälähtetimen lähetysteho, G_j häirintälähtetimen antennivahvistus, G_{rj} tutkan antennivahvistus häirintälähtetimen suuntaan, R_j häirintälähtetimen etäisyys tutkasta ja L_j häirintälähtetimen häviöt. Kummankin signaalin osalta oletetaan etenemisen noudattavan vapaan tilan etenemistä, jolloin vaimennus voidaan laskea tehon isotrooppisen pienenemisen mukaisesti.



Kuva 120: Läpipolttoetäisyys on etäisyys, jolla häirintä ei enää tehoa, vaan tutka kykenee ”näkemään häirinnän läpi”. Crossover-etäisyys puolestaan on etäisyys, jolla tutkan vastaanottama kaiku on yhtä suuri kuin häirintäsignaali.

Mikäli häviötermeihin halutaan laskea myös ilmakehän aiheuttama vaimennus, kuten yli 10 GHz taajuuksilla tulee tehdä, on muistettava, että häirintälähtetimen signaali etenee vain yhteen suuntaan mutta tutkasignaali kokee kaksinkertaisen vaimennuksen ensin edetessään tutkalta maaliin ja sitten palatessaan takaisin tutkalle. Tutkan vahvistus häirintälähtetimen suuntaan G_{rj} on sama kuin tutka-antennin vahvistus G_r , mikäli häirintälähtetin toimii tutkan pääkeilassa. Tällöin tutkaan saapuva häirintäsignaali on suuren antennivahvistuksen vuoksi merkittävä kaukaakin tapahtuvassa häirinnässä. Pääkeilaan rajautuva tapahtuva häirintä ilmaisee kuitenkin häirinnän tulosuunnan, ja suojattavan kohteen on oltava samalla sektorilla (pääkeilan sisällä) kuin häirintälähtetimen. Näiden seikkojen vuoksi häirintälähtetin pyrkii vaikuttamaan tutkan sivukeilassa. Tällöin tutkalla on huonommat edellytykset tietää mistä häirintäsignaali tulee.

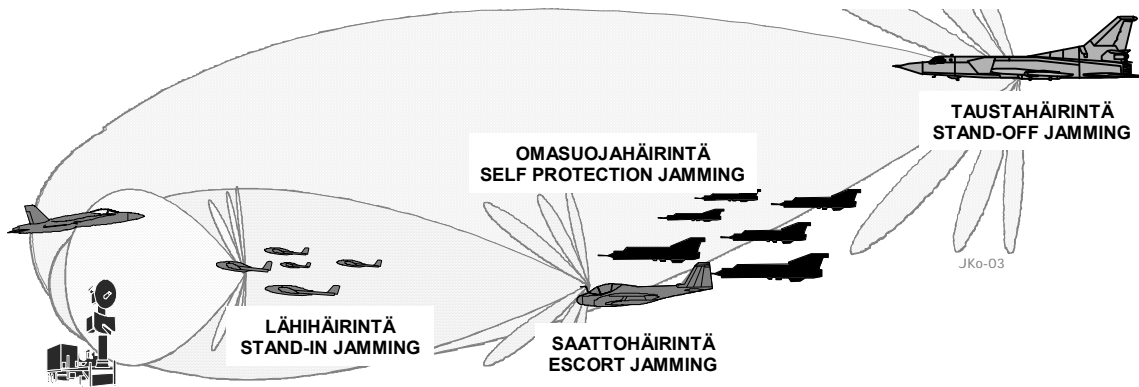
Vaikutettaessa sivukeilasta voidaan häirintäsignaalikaavassa G_{rj} korvata termillä G_r/SLL , missä SLL on tutkan sivukeilataso, joka kertoo kuinka paljon pääkeilan vahvistusta pienempi

on tutkan (yleensä keskimääräinen) sivukeilavahvistus. Tällöin hyöty/häirintä-signaali-suhteeksi saadaan:

$$\frac{S}{J} = \frac{P_r \cdot G_r^2 \cdot \sigma \cdot \lambda^2 \cdot L_j \cdot R_j^2 \cdot (4\pi)^2 \cdot SLL}{P_j \cdot G_j \cdot G_r \cdot \lambda^2 \cdot L_r \cdot R_t^4 \cdot (4\pi)^3}$$

Sievistettynä ja uudelleen ryhmiteltynä kaava saadaan muotoon:

$$\frac{S}{J} = \frac{P_r \cdot G_r}{P_j \cdot G_j} \cdot SLL \cdot \sigma \cdot \frac{R_j^2}{R_t^4} \cdot \frac{L_j}{L_r} \cdot \frac{1}{4\pi}$$



Kuva 121: Häirintägeometria vaikuttaa keskeisesti häirinnän tehoon ja vaadittavaan tehotasoon.

Kaavasta havaitaan, että hyöty- ja häirintäsignaalien suhteeseen vaikuttaa suoraan tutkan ja häirintälähtetimen ERP-tehojen suhde, tutkan sivukeilataso, maalin tutkapoikkipinta-ala sekä muut kuin etenemisestä johtuvat järjestelmien häviöt. Häirintägeometrian merkitys on huomattava, sekä suoraan isotrooppisen vaimennuksen

$$\propto \frac{R_j^2}{R_t^4}$$

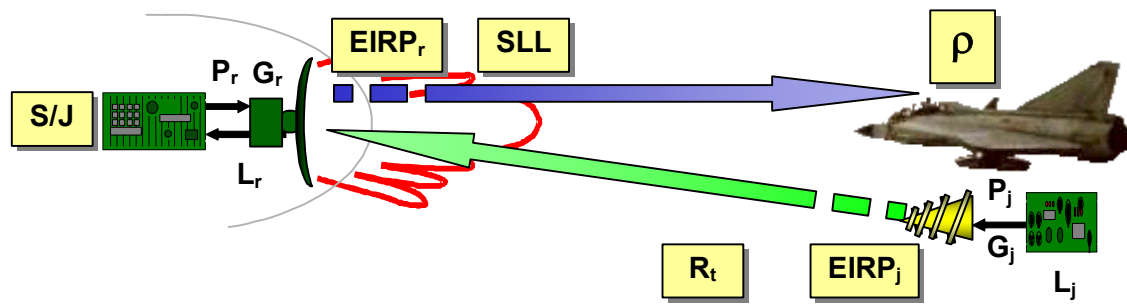
kautta, että korkeammilla taajuuksilla mukaan tulevan ilmakehän absorptio- ja sirontavaimennuksen kautta. Edellä kuvattu yhtälö kuvaa hyvin taustahäirintää. Saatto- ja omasuojahäirinnässä, jossa häirintälähtetin sijaitsee maalissa tai sen läheisyydessä, isotrooppinen vaimennustermi supistuu muotoon $1/R_t^2$, jolloin häirintäyhtälö on muotoa

$$\frac{S}{J} = \frac{P_r \cdot G_r}{P_j \cdot G_j} \cdot SLL \cdot \sigma \cdot \frac{1}{R_t^2} \cdot \frac{L_j}{L_r} \cdot \frac{1}{4\pi}$$

Häirintägeometrialla on edelleenkin voimakas merkitys. Tarkastellaan kahta esimerkitapausta: Ensimmäisessä pyritään suojaamaan iso RORO-alus voimakkaalla ilmasta tapahtuvalla taustahäirinnällä (ERP-teho 1000 kW) 50 km etäisyydeltä. Tutkan pulssitehoksi voidaan olettaa 200 kW, antennivahvistukseksi 30 dB ja sivukeilatasoksi 25 dB. Suuren laivan tutkapoikkipinta-ala on luokkaa 100.000 m². Jos häviötermit jätetään huomioimatta ja mikäli oletetaan tutkan tarvitsevan S/J-suhteeksi 10 maalin ilmaisemiseksi, saadaan etäisyydeksi, jolta tutka havaitsee maalin:

$$R_t = \sqrt[4]{\frac{P_r \cdot G_r}{P_j \cdot G_j} \cdot \text{SLL} \cdot \sigma \cdot \frac{R_j^2}{\text{SJR}} \cdot \frac{L_j}{L_r} \cdot \frac{1}{4\pi}} = \sqrt[4]{\frac{20 \cdot 10^3 \cdot 10^3}{100 \cdot 10^3} \cdot 10^{2.5} \cdot 10000 \cdot \frac{5000^2}{10} \cdot \frac{1}{4\pi}} = 18 \text{ km}$$

Taustahäirintä kärsii siis aina siitä, että häirintäsignaalin isotrooppinen vaimeneminen on merkittävä pitkän häirintäetäisyyden vuoksi. Mikäli tutkassa käytetään korkeata taajuutta, vaimenee häirintäsignaali vieläkin enemmän suhteessa tutkakaikuun.



Kuva 122: Tutkahäirintäyhtälön keskeiset parametrit. Sivukeilatasolla tarkoitetaan tässä sivukeilan tasoa pääkeilaan nähden, ei sivukeilan vahvistusta.

Omasuojahäirinnässä häirintägeometria on häirintälähtäjän puolella, sillä häirintäsignaali vaimenee verrannollisena etäisyyden neliöön, kun tutkan signaali vaimenee verrannollisena etäisyyden neljäänteen potenssiin. Oletetaan, että edellisen esimerkin tutkaa vastaan hyökkää rynnäkkökone, jonka omasuojajärjestelmän häirintäteho on 1000 W (ERP) ja tutkapoikkipinta-ala niinkin suuri kuin 5 m². Tällöin edellisen esimerkin olettamuksilla mittausetäisyydeksi häirinnän alla saadaan:

$$R_t = \sqrt{\frac{P_r \cdot G_r}{P_j \cdot G_j} \cdot \text{SLL} \cdot \sigma \cdot \frac{1}{\text{SJR}} \cdot \frac{L_j}{L_r} \cdot \frac{1}{4\pi}} = \sqrt{\frac{20 \cdot 10^3 \cdot 10^3}{1000} \cdot 10^{2.5} \cdot 5 \cdot \frac{1}{10} \cdot \frac{1}{4\pi}} = 1.6 \text{ km}$$

Rynnäkkökone voi siis lähestyä tutkaa asekantamansa sisäpuolelle ilman että tutka kykenisi havaitsemaan sitä. Tutka luonnollisesti havaitsee häirinnän, muttei sen tulosuuntaa tai häirintälähtäjän etäisyyttä. Seuraavassa tarkastellaan tutkan toimintaan vaikuttavia muita parametreja sekä niiden vaikutusta häirintäetäisyyksiin.

Tutkan toimintaan vaikuttavat parametrit

Edellä tutkanyhtälön yhteydessä esitettyjen lähinnä tutkan maksimikantamaan liittyvien parametrien lisäksi tutkan toimintaan vaikuttaa useita muita parametreja, joilla on keskeinen merkitys maalin havaitsemisessa ja paikantamisessa.

Tutkan teoreettiseen suorituskykyyn vaikuttavia parametreja ovat esimerkiksi lähetteen taajuus, pulssinpituus, pulssintoistotaajuus, antennin keilanleveys, maalin tutkapoikkipinta-ala, pulssisuhde ja pulssikompressiosuhde. Nämä ovat sidoksissa toisiinsa; esimerkiksi pulssinpituus vaikuttaa etäisyysresoluutioon, kohinakaistanleveyteen ja lyhimpään mittausetäisyyteen. Tämän vuoksi näiden kaavojen esittely selkeästi etenevässä järjestyksessä on hyvin vaikea tehtävä. Seuraavassa esitetään perusparametrit ja niihin sidonnaiset tekijät ja sen jälkeen keskitytään isompiin kokonaisuuksiin, kuten pulssikompressioon ja pulssintoistotaajuuden haritukseen.

Lähetetyn pulssin pituudesta τ voidaan approksimoida signaalin vaatima kaistanleveys B :

$$B = \frac{1}{\tau}$$

Aika-taajuus-tulo $B\tau$ riippuu tutkapulssin muodosta ja vastaanottimessa käytettävästä ilmaisimesta, mutta useimmissa järjestelmän suorituskykyä käsittelevissä laskuissa $B\tau = 1$ on täysin riittävä approksimaatio.

Pulssintoistotaajuus kertoo tutkan suurimman yksikäsitteinen havaintoetäisyyden R_{\max}

$$R_{\max} = \frac{c}{2 \cdot \text{PRF}}$$

Suurin yksikäsitteinen havaintoetäisyys tarkoittaa etäisyyttä, jolta tulevien kaikujen etäisyyden tutka kykenee määrittämään yksiselitteisesti.

Tutkan on periaatteessa odotettava, että kaikki tältä etäisyydeltä tulevat kaiut ovat saapuneet, ennen kuin se voi lähettää uuden pulssin. Jos kaiku saapuu tutkaan sen jälkeen kuin tutka on jo ehtinyt lähettää uuden pulssin, tutka ei voi tietää mistä pulssista kaiku saapui, joten se ei voi myöskään määrittää etäisyyttä kohteeseen. Tämän vuoksi pulssintoistotaajuus on sovitettava tutkan kantamaan. Yleensä tutkan todellinen kantama on noin 80% suurimmasta yksikäsitteisestä havaintoetäisyydestä, millä pidetään huolta siitä, ettei jakson takaa tule kaikuja.

Koska PRF on pulssivälin käänteisarvo, voidaan suurin yksikäsitteinen havaintoetäisyys laskea myös kaavasta

$$R_{\max} = \frac{\text{PRI} \cdot c}{2}$$

Pulssin pituuden ja pulssin toistotaajuuden avulla voidaan laskea lähettimen käyttämä pulssisuhde c_d (duty cycle):

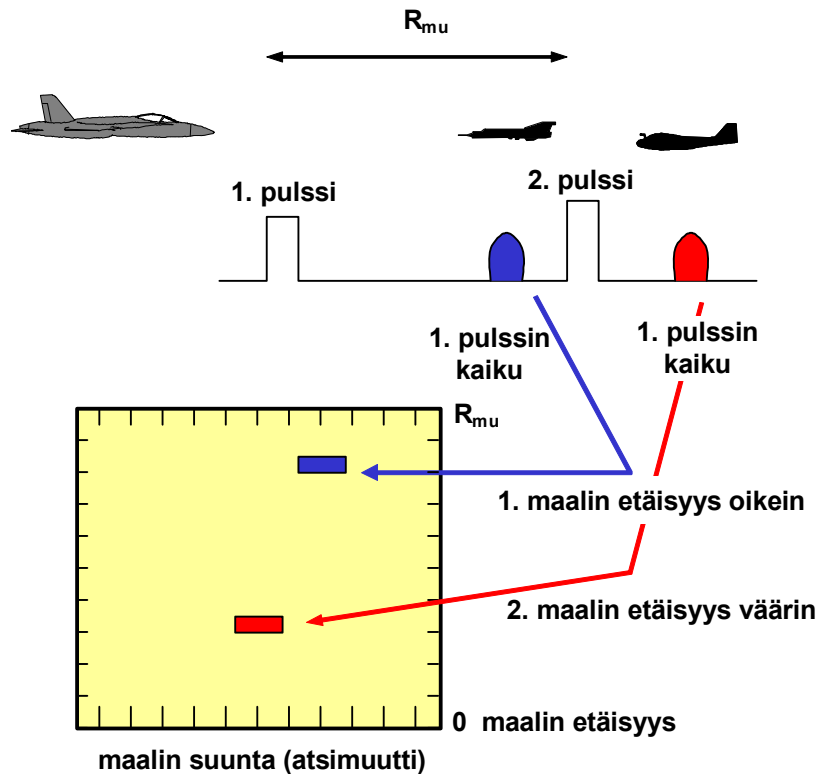
$$c_d = \text{PRF} \cdot \tau$$

Tämän ja lähettimen huipputehon P_t avulla saadaan laskettua tutkan keskimääräinen lähetysteho P_{avg} :

$$P_{av} = c_d \cdot P_t$$

Tutkan etäisyysuuntainen erottelukyky eli pienin erotettavissa oleva kahden maalin välinen etäisyys on

$$\delta r = \frac{c \cdot \tau}{2}$$



Kuva 123: Suurin yksikäsitteinen mittausetäisyys määräytyy sen mukaan, kuinka kaukaa tutka odottaa pulssin kaiun saapuvan ennen kuin se lähettää uuden pulssin. Uuden pulssin lähettämisen jälkeen tutka ei voi tietää tuleeko kaiku aiemmasta vaiko juuri lähettetyistä pulssista. Suurimman yksikäsitteisen mittausetäisyyden takaa tulevat kaiut näkyvät todellista etäisyyttä lähempänä.

Lisäämällä edelliseen kaavaan lähetysten loppumisen ja vastaanottimen suojapiirin kytkemisen välinen aika saadaan tutkan lyhin toimintaetäisyys R_{min} .

$$R_{min} = \frac{(\tau + t_{tr}) \cdot c}{2}$$

Tutkan antennin fyysisten mittojen tai keilanleveyksien perusteella voidaan laskea sen vahvistus. Liitteessä 1 on esitetty eri antenneja ja niiden ominaisuuksia. Tarvittaessa antennivahvistus G voidaan approksimoida kaavalla

$$G = \frac{30000}{\theta_{3dB} \cdot \phi_{3dB}}$$

jossa antennin pysty- ja vaakatason keilanleveydet ovat asteissa. Osoittajassa oleva luku vaihtelee antennin apertuurin muodon ja valaisun mukaan välillä 25000 – 36000.

Antennin atsimuuttitaso keilanleveyden perusteella voidaan laskea tutkan kulmaerottelukyky δ_a ,

$$\delta_a = \frac{\pi \cdot \theta_{3dB} \cdot R}{180}$$

joka kertoo kahden maalin lyhimmän etäisyyden toisistaan. Maalien välisen etäisyyden on oltava atsimuuttitasossa vähintään δ_a , jotta tutka pystyy erottelemaan ne kahdeksi eri maaliksi.

Kohteen nopeuden mittausta voi perustua mm. kohteesta heijastuneen pulssin dopplertaajuuteen, jonka muutos on verrannollinen käytettävään aallonpituuteen sekä kohteen säteittäiseen nopeuteen. Itse dopplertaajuudesta kerrotaan enemmän *sähkömagneettinen spektri* -luvussa. Radiaalisesti kulkevan kohteen nopeus saadaan laskettua kaavalla

$$v_r = \frac{f_d \cdot \lambda}{2},$$

jossa f_d on heijastuneen pulssin dopplertaajuus. Tutkan nopeusresoluutio lasketaan dopplersuodattimen kaistanleveyden B_{df} perusteella kaavasta

$$\delta_v = \frac{\lambda}{2} \cdot B_{df}$$

Mitä parempi nopeusresoluutio halutaan, sitä kapeampia dopplersuodattimia on käytettävä ja sitä enemmän niitä tarvitaan koko dopplerkaistan kattamiseksi. Dopplerkaistan leveys riippuu luonnollisesti sallituista maalien nopeuksista.

Virheilmaisutiheyden vakiointi, CFAR

Yksi tärkeimmistä vastaanottimen toiminteista on virheilmaisutiheyden vakiointi (CFAR, Constant False Alarm Rate), jota käytetään, kun halutaan vähentää kohinan, välkkeen tai häirinnän vaikutusta maalien ilmaisussa. CFAR:n avulla kohinatason ylittävien piikkien aiheuttamien virheilmaisujen määrä pidetään vakiona säätämällä ilmaisukynnysarvoa vallitsevan kohinatason mukaisesti. CFAR toteutetaan tavallisesti tarkkailemalla kohinatasoa etäisyyden resoluutiosoluissa, joita keskiarvoistamalla soluissa oleva keskimääräinen kohinataso saadaan määriteltä. Tällä tavalla muodostetaan välkekartta, jonka perusteella tutkan mittausalue jaetaan halutun kokosiin etäisyysalkioihin, joissa on yksilöllinen ilmaisukynnyksen asetusarvo.

Vakioitun ilmaisutiheyden käyttö nostaa ilmaisun kynnyksarvoa, jolloin heikoimpia maaleja ei ehkä havaita. Ongelmana saattaa olla myös kohinahäirintä, jolloin ilmaisun kynnyksarvo nousee liian korkeaksi ja operaattori ei havaitse olevansa häirinnän vaikutuksen alla, jolloin tutkan tehollinen kantama pienenee oleellisesti.

<p>Virheilmaisutiheyden vakioinnin positiiviset ominaisuudet</p> <ul style="list-style-type: none"> -Vähentää kohinan, välkkeen tai häirinnän vaikutusta maalien ilmaisussa - Virheilmaisujen määrä pidetään vakiona säätämällä ilmaisukynnysarvoa vallitsevan kohinatason mukaan. -Muodostaa välkekartta resoluutiosoluille, joiden perusteella mittausalue jaetaan etäisyysalkioihin
<p>Virheilmaisutiheyden vakioinnin negatiiviset ominaisuudet</p> <ul style="list-style-type: none"> -Nostaa ilmaisun kynnsarvoja, jolloin heikkojen maalikaikujen havaitseminen huononee -Kohinahäirintä nostaa ilmaisun kynnsarvoa siten, että operaattori ei havaitse häirintää

Taulukko 9. Virheilmaisun vakioinnilla saavutetaan enemmän hyötyä kuin haittaa. Suurimmat edut saavutetaan häirinnän, välkkeen tai kohinan minimoimisessa.

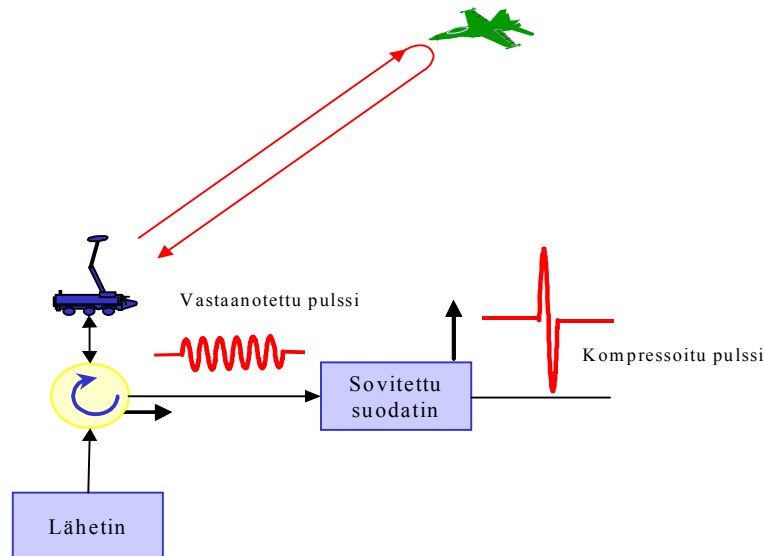
Tässä luvussa käytiin läpi yksinkertaistetun pulssitutkan rakenne ja toiminta. Seuraavissa kappaleissa käsitellään maalin havaitsemista sekä tutkan toimintaan vaikuttavia fysikaalisia suureita hieman tarkemmin ja myöhemmin kuvataan erilaisia taistelukentän tutkatyypppejä.

Pulssikompressio

Tutkan havaintoetäisyyttä voidaan kasvattaa lisäämällä lähettimen huipputehoa ja pidentämällä tutkapulsseja, mutta pulssin pituuden kasvattaminen huonontaa tutkan etäisyysresoluutiota. Pulssin pituuden lyhentäminen puolestaan vähentää maalista heijastuvan energian määrää ja siten lyhentää havaitsemistodennäköisyyttä. Pulssikompression ideana on lähettää mahdollisimman pitkä pulssi, joka mahdollistaa suuren pulssienergian, paremman signaali-kohinasuhteen ja pidemmän havaintoetäisyyden. Vastaanottimessa heijastunut kaikupulssi kompressoidaan aikatasossa lyhyemmäksi, jolloin saavutetaan hyvä etäisyysresoluutio sekä parempi signaali-kohinasuhde.

Pulssikompression yhteydessä puhutaan kompressiosuhteesta, jolla tarkoitetaan sitä, kuinka pieneksi lähetetty pulssi voidaan vastaanottimessa kompressoida. Oletetaan, että lähetetty tutkapulssi on 50 μ s ja vastaanotettu kaikupulssi on 0,5 μ s kompression jälkeen. Tällöin kompressiosuhteeksi saadaan 100. Ilman pulssikompressiota etäisyysresoluutio olisi 7500 metriä, mutta kompressio avulla se saadaan pienennettyä 75 metriin. Mikäli sama etäisyysresoluutio haluttaisiin ilman pulssikompressiota, olisi käytettävä 0,5 μ s pituista pulssia, joka pienentäisi pulssin energiaa sadanteen osaan.

Pulssikompressiotekniikat perustuvat yleensä sovitettuihin suodattimiin (matched filter), jolloin lähetettävä pulssi moduloidaan tietyllä koodilla ja kaikupulssi vastaanotetaan suodattimella, jonka aika-taajuus ominaisuudet vastaavat lähetetyn pulssin koodausta. Seuraavissa kappaleissa tarkastellaan kahta yleisintä kompressiotekniikkaa; lineaarista taajuusmodulaatiota sekä binääristä vaihemodulaatiota.



Kuva 124: Pulssikompression yksinkertaistettu periaate, jossa vastaanotettu kaikupulssi kompressoitaa sovitetun suodattimen avulla aikatasossa lyhyemmäksi. Pulssikompressiolla mahdollistetaan tarkempi etäisyysresoluutio sekä suurempi havaintoetäisyys.

Linearisessa taajuusmodulaatiossa lähetettävän pulssin taajuutta kasvatetaan lineaarisesti koko pulssin ajan. Suodatin viivästää enemmän kaikupulssin matalampia taajuuksia kuin korkeampia. Tällöin pulssissa käytetyt eri taajuudet saapuvat suodattimen lähtöön yhtä aikaa ja lähetetty pulssi on kompressoitu. Eri taajuudet summautuvat suodattimen lähdössä, jolloin yhteenlaskettu amplitudi kasvaa. Näin saavutetaan pulssi, jonka amplitudi on suurempi ja pituus lyhyempi kuin lähetyllä pulssilla. Suodatin voidaan toteuttaa analogisesti, dispersiivisen viivelinjan avulla tai digitaalisesti digitaalisen signaalinkäsittelyn avulla.

Linearisella taajuuspyyhkäisyllä saavutetaan resoluutio

$$\Delta R_c = \frac{c}{2 \cdot \Delta F}$$

jossa ΔF on pyyhkäisykaistanleveys [Hz]. Koska kompressoimattoman pulssin antama etäisyysresoluutio on

$$\Delta R_u = \frac{c \cdot \tau}{2}$$

niin kompressiosuhteeksi K saadaan

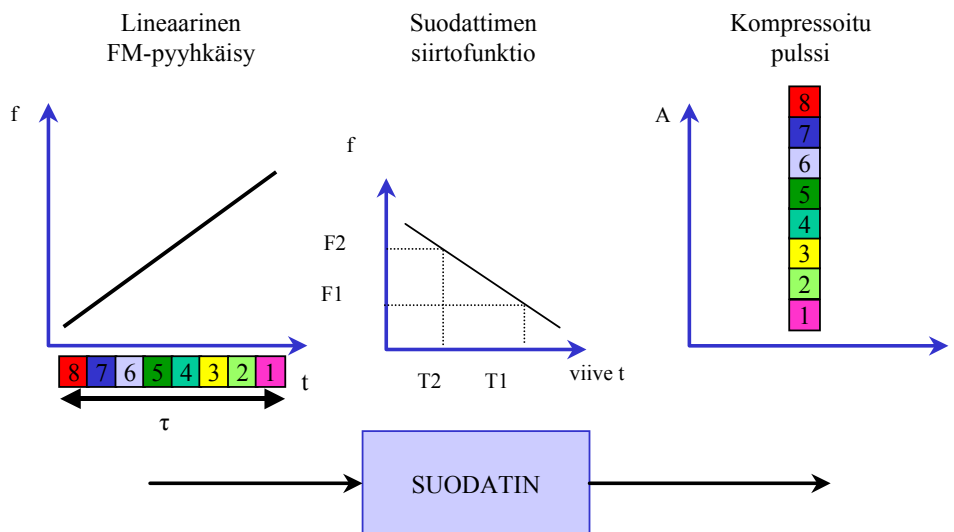
$$K = \frac{\Delta R_u}{\Delta R_c} = \tau \cdot \Delta F$$

Pulssikompressiossa tarvittava pyyhkäisykaista ΔF saadaan siten haluttavan kompressiosuhteen ja pulssinpitouden avulla:

$$\Delta F = \frac{K}{\tau}$$

Pulssikompressio voidaan toteuttaa lineaarisen taajuuskompression lisäksi pulssin sisäisellä binäärisellä vaihekoodauksella, jolloin pulssi jaetaan pienempiin yhtä pitkiin osiin, jotka koodataan PSK-tekniikalla. Yleisimmin käytetään PIK-avainnusta (phase inversion keying), jossa lähete koodataan 180° vaihe-eroina. Suodattimessa vastaanotettu kaikupulssi korreloidaan konvoluution avulla ja kompressoitu pulssi välitetään dataprosessointiin.

Vaihekoodatus pulssikompressiossa vastaanotetun signaalin koodia verrataan lähetetyn pulssin koodiin. Mikäli lohkoissa olevat koodit vastaavat toisiaan on tuloksena 1 ja vastaa- vasti -1 mikäli lohkojen koodit ovat erilaiset. Jos vertailtavassa lohkoissa ei ole vastaanotettua signaalia on tulona 0. Vertailun jälkeen lohkojen antamat tulot summataan yhteen kuvan 125 mukaisesti. Näin saadaan integroitua bn mukainen kuvaaja aikavälillä $t=0$ ja $t=2n \cdot \tau_{\text{koodi}}$, jossa n on pulssissa käytettyjen lohkojen lukumäärä ja τ_{koodi} on yhden koodilohkon pituus.



Kuva 125: Lähetetyn pulssin matalin taajuus saavuttaa vastaanottimen suodattimen ensimmäisenä ja korkein viimeisenä. Suodatin viivästää pulssin eritaajuisia komponentteja niin, että ne saavuttavat suodattimen ulostulon samaan aikaan. Kuvassa pulssin sisällä olevat taajuuskomponentit kuvattu eri väreillä.

Vaihekoodatus kompressiossa käytettävä kompressiosuhde saadaan koodauksessa käytettyjen lohkojen lukumäärästä N :

$$\Delta R_c = \frac{c \cdot \tau}{2 \cdot N}$$

Kuvan 126 kolmilohkoinen koodi kompressoii vastaanotetun pulssin kolmanteen osaan, jolloin etäisyysresoluutio paranee samassa suhteessa. Mikäli käytetään pitempää koodausta, saadaan myös parempi pulssikompressiosuhde.

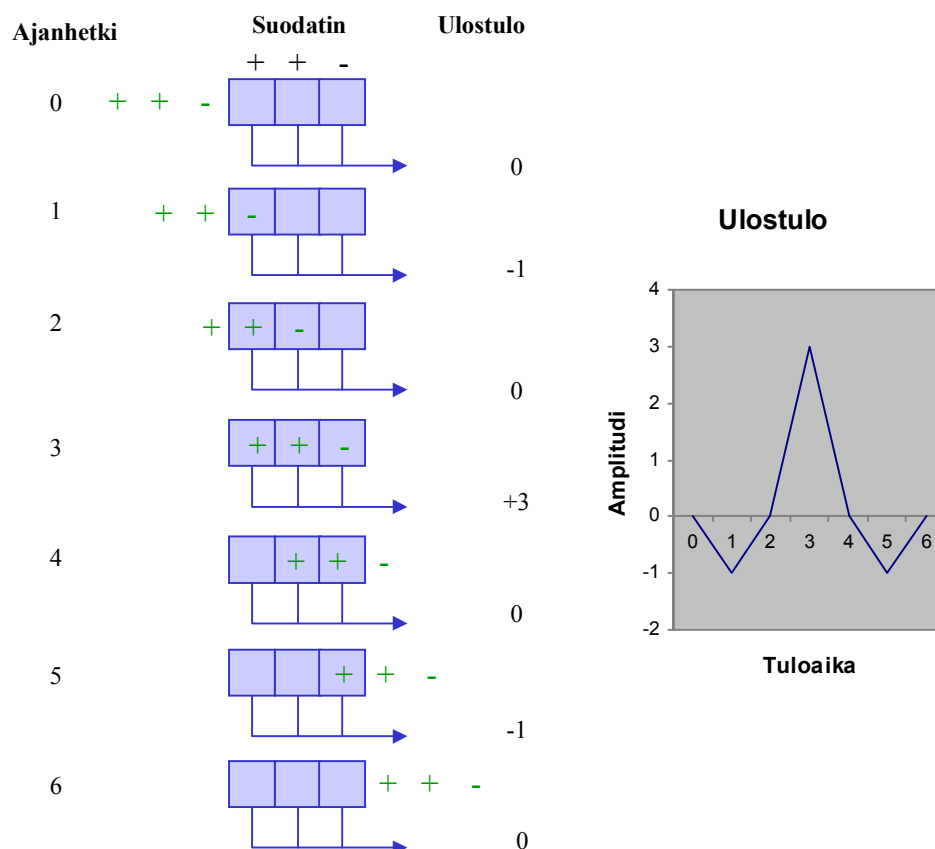
Eripituisia Barker-koodeja tai niiden eri kombinaatioita on 7 kappaletta, jotka ovat:

N	Barker-koodit
2	+ - tai + +
3	+ + -
4	+ - + + tai + - - -
5	+ + + - +
7	+ + + - - + -
11	+ + + - - - + - + -
13	+ + + + + - - + + - + - +

Näillä koodeilla on hyvin pieni sivukeilataso. Pisin tunnettu koodi, jonka sivukeilataso on lähestulkoon nolla, on ns. Barker13-koodi.

Periaatteessa vaihekoodattu pulssikompressio voidaan toteuttaa viestikommunikaatiosta tutulla monitasoisella vaihekoodauksella. Tällöin koodauksessa käytetään useampaa vaihetta ja näin pidemmän koodin muodostaminen on mahdollista. Useammalla vaiheella toteutettu pulssikompressio tarjoaa samat edut kuin binäärinen koodauskin; pulssikompressiosuhde on sama ja sivukeilataso on samaa luokkaa. Monitasoisen vaihekoodauksen käyttöä rajoittaa kuitenkin sen herkkyys vaihesiirtymille, jotka syntyvät kaikusignaalin dopplersiirtymästä. Mitä enemmän koodauksessa käytetään eri vaiheita, sitä suuremmat rajoitukset ovat sallitun dopplersiirtymän suuruudessa. Tämän vuoksi sotilassovelluksissa ei yleensä käytetä monitasoisia koodeja.

Verrattaessa lineaarista taajuuskompressiota ja vaihekoodattua pulssikompressiota voidaan todeta, että lineaarisella taajuuskompressiolla voidaan toteuttaa erittäin suuria kompressiosuhteita, kun taas vaihekoodatulla kompressiota käytettäessä kyetään toistohäirintä havaitsemaan ja estetään harhauttava häirintä. Kummankin tekniikan ongelmana on dopplersiirtymän synnyttämä virhe. Kohteesta heijastuneen kaukupulssin dopplersiirtymä aiheuttaa vaihekoodatussa pulssikompressiossa epätarkkuuksia, koska taajuussiirtymä synnyttää myös vaihesiirtymää. Linearisessa pulssikompressiossa dopplersiirtymä aiheuttaa etäisyysvirhettä, mikäli kompressiotekniikan lisäksi käytetään myös lineaarista etäisyydenmittausta (FM-ranging). Tällöin vastaanotin ei voi tietää aiheutuuko taajuudenmuutos dopplersiirtymästä, vai hieman pidemmästä havaintoetäisyydestä. Tämä ongelma voidaan tosin poistaa pyyhkäisemällä taajuuskaista ensin toiseen ja sitten toiseen suuntaan.

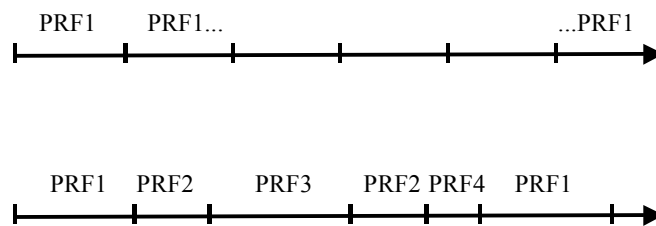


Kuva 126: Esimerkki kolmilohkoisen Barker 3-koodin kompressoimisesta.

Pulssivälin muuttaminen eli haritus

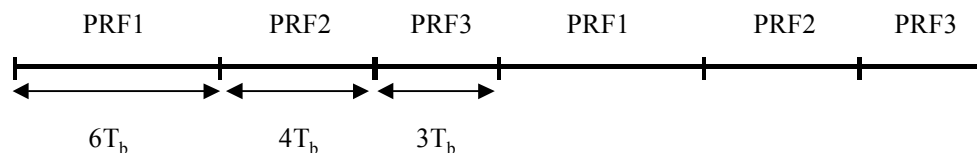
Harituksella tarkoitetaan peräkkäisten pulssien tai pulssiryhmien säännöllisen toiston muuttamista epäsäännölliseksi. Periaatteessa harituksella on kaksi tarkoitusta

1. Välttää jakson takaiset kaiut (second time around echo) eli poistaa yksiselitteisen havaintoetäisyyden takaa tulevien kaikujen aiheuttamat harhamaalit pidentämällä suurinta yksikäsitteistä havaintoetäisyyttä laskennallisesti
2. Parantaa tutkan kykyä väistää toistohäirintää, koska häirintälähetin ei valesatunnaisen harituksen vuoksi kykene päättämään oikeata pulssiväliä, mikä mahdollistaisi harhauttavan häirintäsignaalin luomisen.
- 3.



Kuva 127: Haritetun ja säännöllisen PRF:n ero aikatasossa.

Valesatunnaisella harituksella saavutetaan hyvä suoja pulssinpeittohäirintää sekä tutkan etäisyysportin ja nopeusportin murtamista vastaan. Toisaalta jokainen pulssintoistotaajuuden haritus vähentää pulssien integrointiaikaa ja näin ollen lyhentää tutkan mittausetäisyyttä. Tämän vuoksi eri mittaustilanteissa tulee miettiä tarvitaanko haritusta vai riippuen mm. vihollisen häirinnästä, pienimmästä havaittavasta maalista ja halutusta mittausetäisyydestä, jne. Yleensä haritukseen riittää kolme erillistä toistotaajuutta.



Kuva 128: Eri pituisten pulssivälien käyttäminen sokeiden nopeuspisteiden vähentämiseksi. Esimerkkikuvassa pulssivälien suhteet ovat niin, että pisin on 6 kertaa peruspituuden T_b mittainen ja lyhyin pulssiväli 3 peruspituuden T_b mittainen. Pulssivälien suhteet ovat tällöin 6:4:3.

Harituksella kyetään siirtämään myös pulssintoistotaajuuden tai sen monikerran synnyttämää sokeaa nopeuspistettä. Sokea nopeuspiste johtuu dopplerspektrin laskostumisesta doppler-prosessoinnissa. Tutka ei ilmaise maalin nopeutta mikäli kohde lentää sokealla nopeuspisteen nopeudella. Sokeat nopeudet saadaan kaavasta

$$v_{\text{blind}} = n \cdot \text{PRF} \cdot \frac{\lambda}{2},$$

jossa n on pulssintoistotaajuuden monikerta. Esimerkiksi 5,9 GHz:n taajuudella toimivan 4 kHz pulssintoistotaajuutta käyttävän tutka ei kykene havaitsemaan nopeuksia 101, 202, 303, ... m/s.

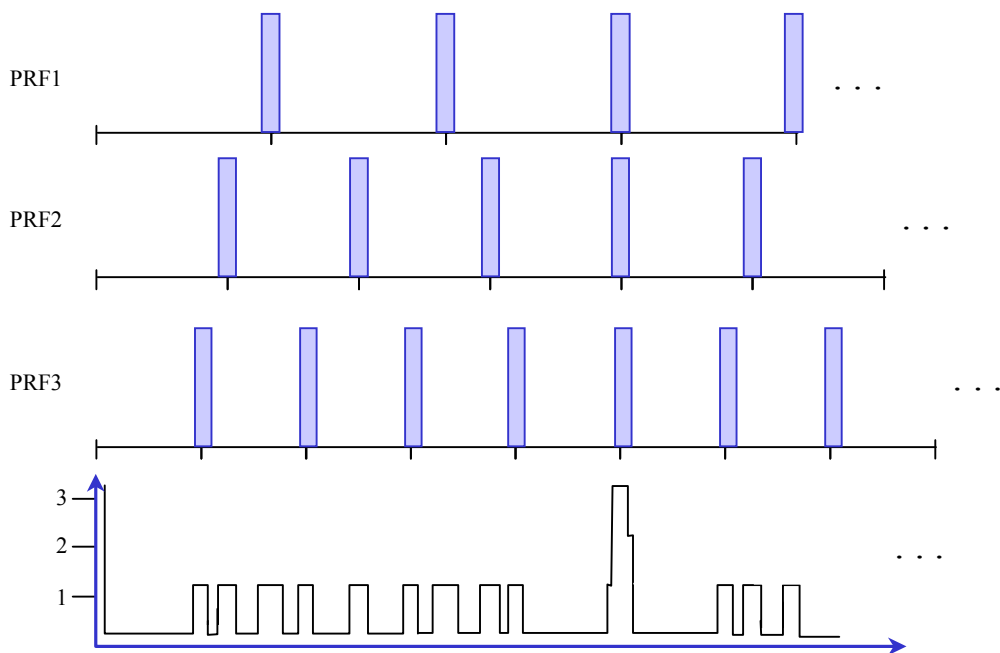
Pulssintoistotaajuuden tulisi olla riittävän suuri, jotta ensimmäinen sokea nopeuspiste saadaan suuremmaksi kuin maalien oletetut maksiminopeudet. Ongelmana tällöin on yksikäsitteisen havaintoetäisyyden lyheneminen. Mitä suurempi PRF, sitä suurempia ensimmäiset sokeat nopeudet ovat, mutta sitä lyhyemmäksi yksikäsitteinen havaintoetäisyys muodostuu. Pulssintoistotaajuuden harituksella saadaan siirrettyä ensimmäistä sokeaa nopeuspistettä nopeudelle

$$v_{Sblind} = \frac{k_1 + k_2 + k_N}{N} \cdot \frac{1 \cdot \lambda}{T \cdot 2}$$

jossa T on keskimääräinen pulssivälin pituus ja $k_1, k_2 \dots k_n$ ovat pulssintoisto-harituksien suhteet redusoituna alimpaan yhteiseen nimittäjään. Keskimääräinen pulssivälin pituus on

$$T = \frac{k_1 + k_2 + k_N}{N} \cdot T_b$$

jossa T_b on käytettävän PRI:n peruspituus.



Kuva 129: Esimerkki kolmen PRF:n käyttämisestä haritukseen.

Oletetaan että lentokonetutka käyttää kolmea toistotaajuutta harituksessa, joiden taajuudet ovat 16, 20 ja 24 kHz. Ilman haritusta tutkan suurin yksikäsitteinen mittausetäisyys olisi 9400 m. Harituksen avulla yksikäsitteinen mittausetäisyys kasvaa 185 kilometriin, joka voidaan laskea kaavalla

$$R_{mu} = \frac{R_{mu1} \cdot R_{mu2} \cdot R_{mu3}}{(R_{mu2} - R_{mu1}) - (R_{mu3} - R_{mu2})} = 185 \text{ km}$$

jossa R_{mu} on maksimaalinen mittausetäisyys ja $R_{mu1} - R_{mu3}$ ovat harituksessa käytettyjen pulssintoistotaajuuksien yksikäsitteiset mittausetäisyydet. Mikäli käytössä olisi vain matalin pulssintoistotaajuus 16 kHz, jolla saavutettaisiin pisin yksikäsitteinen mittausetäisyys, ensimmäinen sokea nopeuspiste olisi noin 400 m/s. Harituksen avulla ensimmäinen sokea nopeuspiste saadaan nostettua noin 610 m/s.

Välke

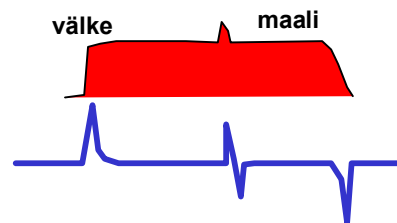
Tutkan säteilemä teho heijastuu ja siroaa maalien lisäksi myös muista kohteista, mikä aiheuttaa tutkan ilmaisussa väkettä (clutter) Välke syntyy kun tutkan mittauksen kannalta ei-toivotuista kohteista heijastuva kaiku ilmaistään. Mitä korkeampaa taajuutta käytetään, sitä pienemmät kohteet synnyttävät väkettä. Välke voidaan jakaa karkeasti ottaen pintavälkkeeseen (surface clutter) ja tilavuusvälkkeeseen (volume clutter). Pintaväkettä syntyy maan- ja merenpinnan heijastuksista ja kasvillisuudesta. Tilavuusvälke syntyy sade- ja pilviheijastuksista sekä esimerkiksi lintu- ja hyönteisparvista. Välikkeen intensiteetti vaihtelee tilastollisesti heijastavan tai sirottavan pinnan ominaisuuksien, heijastusgeometrian, säätilan yms. seikkojen vuoksi.

Maavälkkeen mallintaminen ja huomioiminen sensorin suunnittelussa ja suorituskyvyn arvioinnissa huomattavasti hankalampaa tilavuusvälkkeen vaikutusta hankalampaa sen satunnaisen luonteen vuoksi. Esimerkiksi merivälkkeen syntyyn vaikuttaa eniten aaltojen korkeus ja nopeus, kun taas maavälkkeen voimakkuus riippuu maaperän rakenteesta, pinnanmuodosta, kasvipeitteestä ja säästä (erityisesti tuulesta, joka heiluttaa kasvillisuutta). Välikkeen voimakkuus vaihtelee myös vuodenajan funktiona, maaperän ja kasvillisuuden kosteuserojen vuoksi.

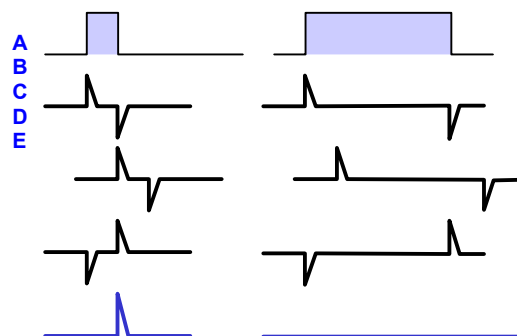
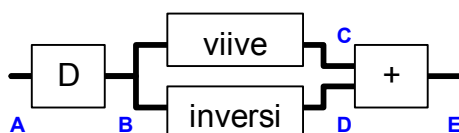
Tilavuusvälkkeen muodostumiseen vaikuttavat ilmakehän epäpuhtaudet ja erilaiset sääilmiöt, kuten vesi-, lumi- ja raesade, pilvet, sumu ja voimakkaat ilmanpyörteet. Myös suuret lintu- ja hyönteisparvet sekä tuulen mukana lentävät roskat synnyttävät väkettä. Välikkeen vaikutusta voidaan vähentää sen maalista eroavien doppler- tai polarisaatio-ominaisuuksien perusteella sekä integroimalla pulsseja. Sateen synnyttämää väkettä voidaan yrittää poistaa ympyräpolarisaatiolla, koska sadepisaroiden heijastuneen säteilyn kiertosuunta muuttuu, jolloin vastaanottoantennin ristipolarisaatiovaimennus estää vastakkaisen polarisaation kytkeytymisen.

Tilavuusvälke heikentää maalista saatavaa signaalikohinasuhdetta, minkä vuoksi maalin oma suojaehitteet tehoavat paremmin silloin kun maalia on muutenkin vaikea erottaa taustaansa vasten.

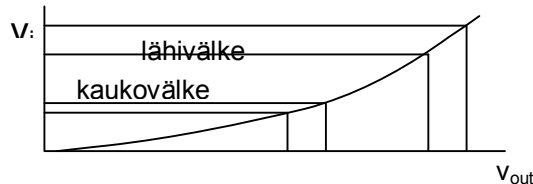
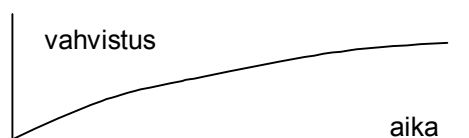
- Kaikupulssin differentointi
 - vähentää tilavuusvälkettä
- Nopea AGC
 - sopeuttaa ilmaisimen paikallisen väketasoon



- Pulssinpituusdiskriminointi

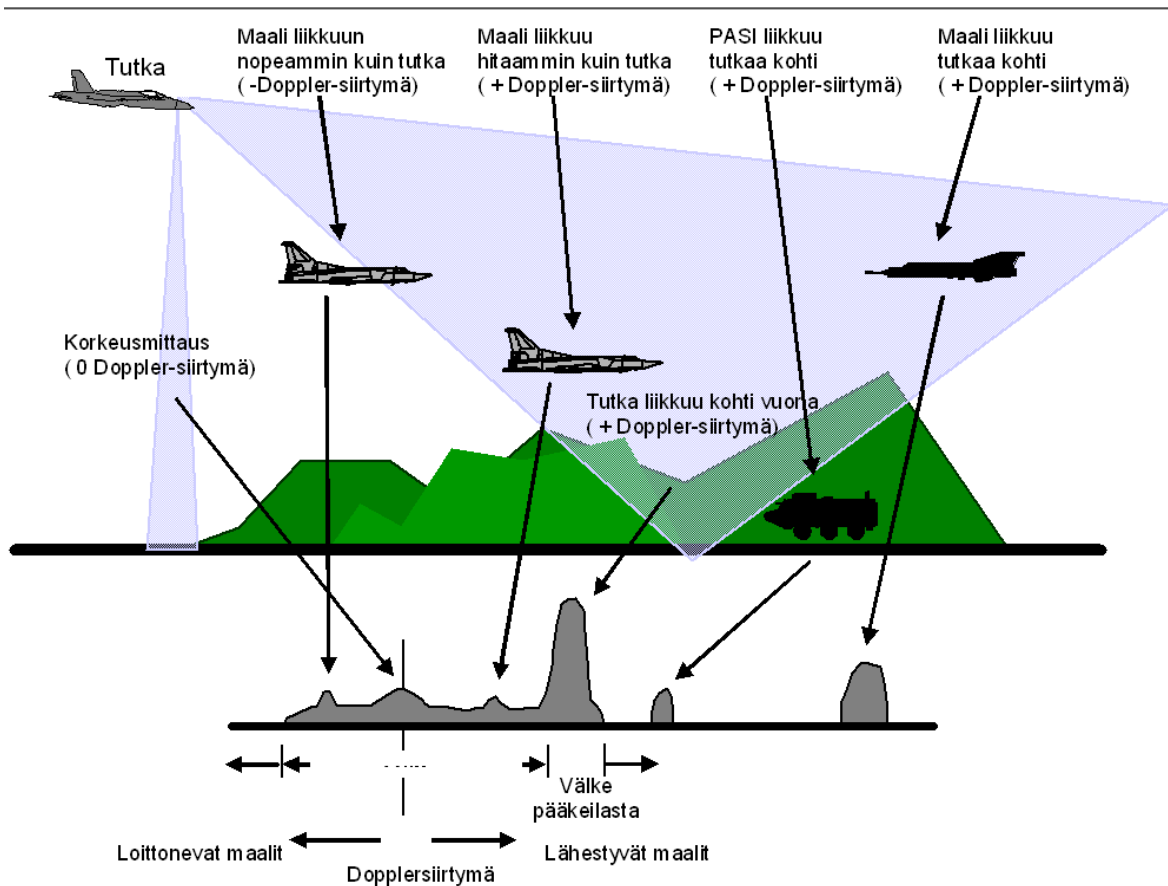


- Välke voidaan jakaa etäisyys- ja nopeusportteihin, jolloin se ei välttämättä kilpaile maalikaiun kanssa.
- Sensitivity Gain Control (SGC) – menetelmässä vastaanotettua tutkasignaalia vaimennetaan. Vaimennus on suurin (oikealla kuvassa esitettyä pieni vahvistus) läheltä tuleville kaiuille ja välkkeelle.
- Polarisaatiodiskriminoinnissa käytetään hyödyksi sitä, että tietyn tyyppinen välke yleensä heijastaa jollakin polarisaatiolla enemmän kuin toisella.



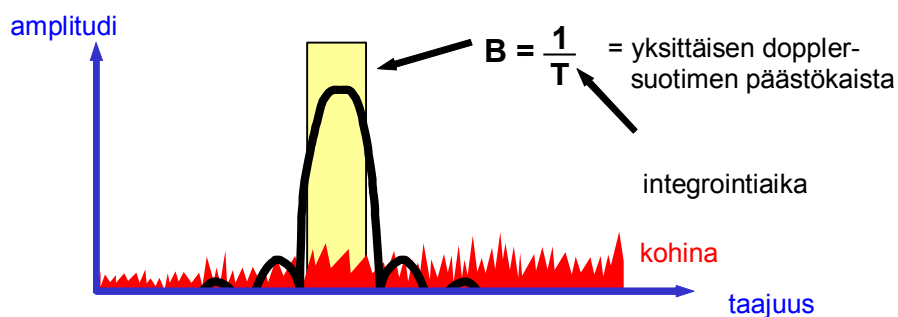
Kuva 130: Välikkeen vähentämiseksi voidaan käyttää useita eri menetelmiä. Kaikupulssin differentioinnilla voidaan poistaa tasainen tilavuusvälke, kuten sadepilvi, nopealla vahvistuksensäätöpiirillä puolestaan voidaan sopeuttaa ilmaisimen paikalliseen väketasoon. Toisaalta nopea AGC helpottaa häirinnän tehoamista. Pulssinpituusdiskriminoinnissa vastaanotettu kaiku derivoidaan, jolloin piiri reagoi vain signaalin muutoksiin. Kun nämä summataan, vain pulssin pituutta vastaava maalikaiku ilmaistaan.

Dopplersiirtymän avulla voidaan erotella maalit toisistaan; erityisesti taustan tutkavälkkeestä sekä musta kohinasta. Luonnollisesti dopplerprosessointi ei tuota läheskään aina toivottua tulosta ja erityisesti häirinnän avulla tutka on suhteellisen helppo pakottaa poistamaan dopplerprosessointi ilmaisusta, jolloin se pakotetaan käyttämään perinteisiä MTI-toimintoja kuten vaiheprosessointia.



Kuva 131. Liikkuvan maalin ilmaisu perustuu usein liikkuvien ja kiintomaalien heijastaman tutkapulssin dopplersiirtymään. Dopplersiirtymä on negatiivinen, kun maali loittoonee tutkasta ja positiivinen kun maali lähestyy tutkaa.

Mikäli tutka hyppytää taajuutta pulssi pulssilta, koherenttia ilmaisuja ei voida käyttää, sillä taajuuden muuttuminen muuttaa myös aallonpituutta ja siten kahden heijastuneen pulssin vaiheen vertaaminen ei ole mielekäs. MTI:tä ei tämän vuoksi voi käyttää tutkassa sen käyttäessä taajuushyppyä. Se käytetäänkö taajuushyppyä vai MTI:tä riippuu aina tilanteesta: joskus on tärkeämpää erottaa maaleja vaikeasta väketaustasta vasten, ja joskus taas häirinnän väistämiseksi on parempi käyttää hyppyä.



Kuva 132: Dopplersuotimen päästökaista ja siten myös tutkan dopplererottelukyky riippuu käytettävissä olevasta integrointi-ajasta.

Valvontatutka ja sen häirintä

Valvontatutka, jota kutsutaan myös etsintätutkaksi, on yksi yleisimmistä tutkatyypeistä taistelukentällä. Valvontatutkien tavoitteena on etsiä ja paikantaa ilmassa tai pinnassa olevat maalit. Ilmapuolustuksen tutkien havaintoetäisyydet vaihtelevat automaattisten ilmatorjuntatykkien tulonjohtotutkien 15 kilometristä ennakkovaroitustutkien 500 kilometriin. Valvontatutkissa käytetään yleensä S- ja C-alueita. Matalampia L-alueella olevia taajuuksia käytetään ennakkovaroitus- tai kaukovalvontatutkissa ja korkeampia X-alueella tai sitä ylempiä taajuuksia seuranta- ja tulenjohtotutkissa.

Normaalisti etsintätutkan tulee kyetä määrittämään ilmamaalit kolmiulotteisesti ja pintamaalit kaksiulotteisesti. Mikäli ilmamaalien etsintää varten käytetään kaksiulotteista tutkaa, korkeudenmittaus toteutetaan erillisellä korkeudenmittaustutkalla.

Valvontatutkat keilaavat koko atsimuuttitason sekä yleensä suurehkon elevaatiokulman. Atsimuuttitason keilaus voidaan toteuttaa mekaanisesti pyöritettävällä antennilla. Osa uusimmista valvontatutkista pyyhkäisee myös atsimuuttitason elektronisesti. Tällöin antenni koostuu esimerkiksi kolmesta vaiheohjatusta antenniryhmästä, jotka on jaettu 120 asteen sektoreihin. Elektronisen pyyhkäisyn avulla saavutetaan parempi suoja elektronista häirintää vastaan sekä mahdollistetaan erittäin nopea keilan suuntaaminen. Tätä voidaan käyttää hyväksi esimerkiksi pyyhkäisemällä ensin koko atsimuuttitaso ja valaisemalla sitten vain havaitut tai epävarmat maalit.

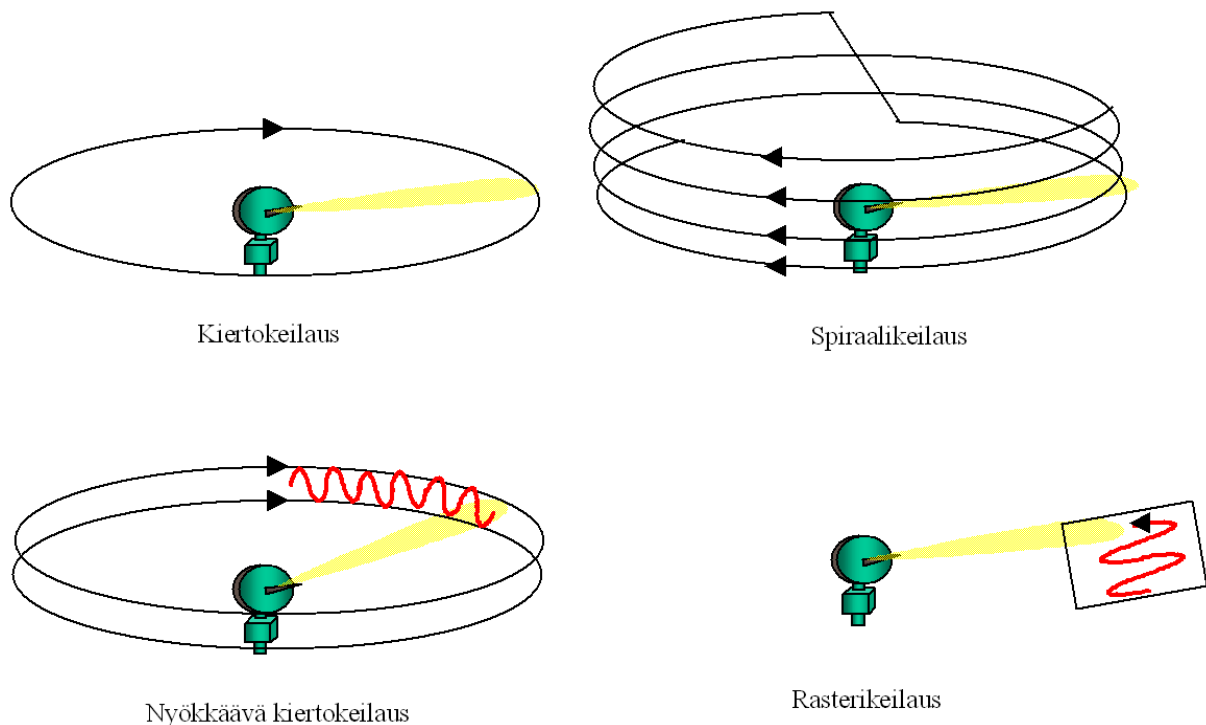


Perinteisten valvontatutkien keila on kapea atsimuuttitasossa, mutta leveä elevaatiotasossa. Tällä mahdollistetaan korkealla lentävien kohteiden havaitseminen yhdellä pyyhkäisykierröksellä. Mikäli pistemäisellä keilalla halutaan havaita eri korkeuksilla lentäviä kohteita, sitä tulee kyetä suuntaamaan myös elevaatiotasossa. Pistemäisen keilan vahvistus on suurempi kuin leveän, mikä mahdollistaa paremman signaali-kohinasuhteen. Tutka-antennin keilanmuoto valitaan antennin rakenteen ja halutun keilaustavan mukaan. Valvontatutkien perinteisiä keilanmuotoja ovat pistekeila, viuhkakeila ja cosec²-keila. Nykyaikaisissa tutkissa käytetään päällekkäisiä monikeiloja, jotka voidaan muodostaa joko heijastimeen kiinnitetyillä useilla syöttöelementeillä tai elektronisesti vaiheohjatulla antenniryhmällä.

Kuva 133: Ericssonin AMB-tutka (Agile Multi Beam) keila vaakatasossa mekaanisesti ja pystytasossa elektronisesti.
[Ericsson]

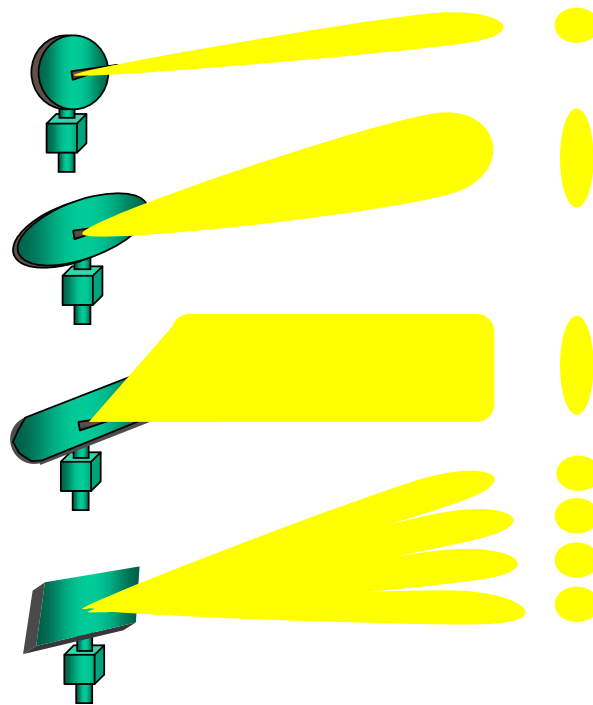
<p>Toiminnalliset vaatimukset</p> <ul style="list-style-type: none"> - suuri keskimääräinen teho - hyvä kulmaresoluutio <p>Seurannaisvaatimukset</p> <ul style="list-style-type: none"> - pieni ilmakehävaimennus - matalahko taajuus - suuri antenni - pieni pulssintoistotaajuus - hidas keilaus - suuri yksikäsitteinen mittausetäisyys 	<table> <tr> <td>taajuus</td> <td>3 GHz</td> </tr> <tr> <td>huipputeho</td> <td>2 MW</td> </tr> <tr> <td>pulssinpituus</td> <td>5 μs</td> </tr> <tr> <td>pulssintoistotaajuus</td> <td>300 Hz</td> </tr> <tr> <td>antennin koko</td> <td>15 x 5 m</td> </tr> <tr> <td>keilanleveys</td> <td>0,5 \times 0,5 \downarrow</td> </tr> <tr> <td>antennivahvistus</td> <td>45 dB</td> </tr> <tr> <td>pyyhkäisynopeus</td> <td>4 rpm</td> </tr> <tr> <td>kantama</td> <td>450 km</td> </tr> </table>	taajuus	3 GHz	huipputeho	2 MW	pulssinpituus	5 μ s	pulssintoistotaajuus	300 Hz	antennin koko	15 x 5 m	keilanleveys	0,5 \times 0,5 \downarrow	antennivahvistus	45 dB	pyyhkäisynopeus	4 rpm	kantama	450 km
taajuus	3 GHz																		
huipputeho	2 MW																		
pulssinpituus	5 μ s																		
pulssintoistotaajuus	300 Hz																		
antennin koko	15 x 5 m																		
keilanleveys	0,5 \times 0,5 \downarrow																		
antennivahvistus	45 dB																		
pyyhkäisynopeus	4 rpm																		
kantama	450 km																		

Kuva 134: Esimerkki valvontatutkalle asetetuista vaatimuksista ja kaukovalvontatutkan tyypillisistä ominaisuuksista.



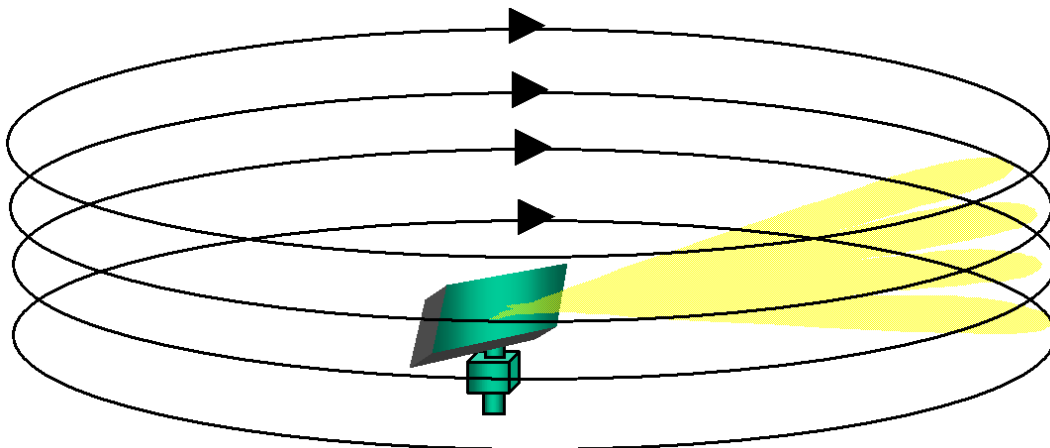
Kuva 135: Mekaanisesti keilaavien valvontatutkien keilaustapoja.

Maalinseurannan automaattisesti muodostavaa valvontatutkaa kutsutaan seuranta valvonnan aikana -tutkaksi (Track-while-scan radar, TWS). Maalinseurannassa muodostetut vektorit mahdollistavat seurattavan maalin sijainnin ennustamisen lähitulevaisuudessa.



Kuva 136: Erilaisilla antenniaperttuureilla saavutetaan erilaisia keilanmuotoja. Kuvassa nähdään yleisesti käytettyjä keilanmuotoja ylhäältä alas; piste-, viuhka-, kosekantti- ja monikeila.

Valvontatutkien havaitseminen on melko helppoa varsinkin ilmasta. Maasta tapahtuvaa tiedustelua häittää maan kaarevuudesta aiheutuva radiohorisontti, jonka takaa tutkaa ei enää havaita S-kaistalla ja sitä korkeammilla taajuuksilla.



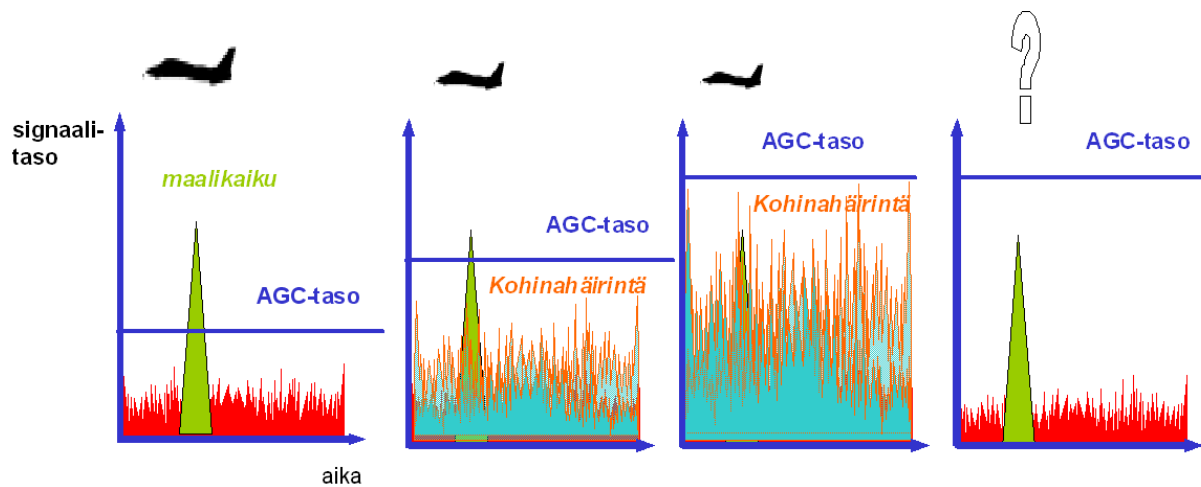
Kuva 137: Mekaanisesti atsimuuttitason ja elektronisesti elevaatiotason keilaavalla tutkalla kyetään paikantamaan havaittu kohde kolmiulotteisesti yhdellä pyyhkäisykierroksella.

Valvontatutkan häirintä

Valvontatutkan häirinnän peruseriaatteena on estää kohteen havaitseminen. Häirintä perustuu yleensä tutkasta tiedusteltuihin ja analysoituihin parametreihin. Mikäli tutka toimii

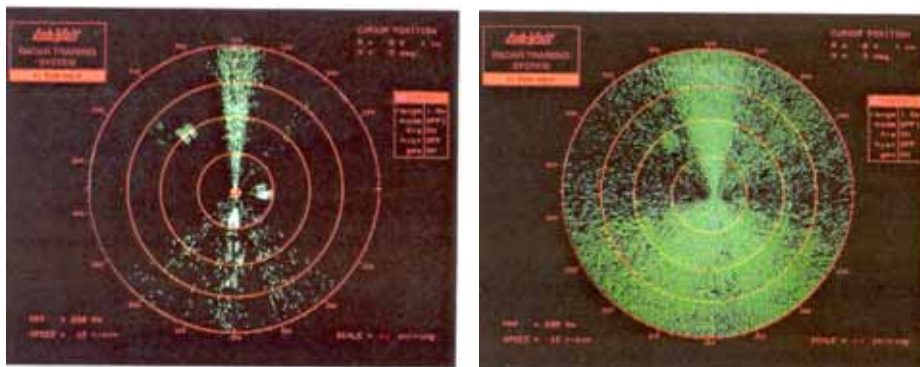
ainoastaan valvontatehtävissä, sen häirintään tai harhauttamiseen ei tarvita niin edistyneitä tapoja kuin seurantatutkan tai asejärjestelmän tulenjohtotutkan häirinnässä.

Kohinahäirinnän ideana on syöttää tutkan vastaanottimelle häirintäsignaalia, joka nostaa vastaanottimen pohjakohinatasoa. Mikäli tutka käyttää automaattista vahvistuksensäätöä (AGC, Automatic Gain Control), se pyrkii vähentämään nousseesta kohinatasosta johtuvia vääriä ilmaisuja nostamalla ilmaisukynnystä (CFAR-häirintä) tai laskemalla vastaanottimen vahvistusta (AGC-häirintä). Kohinahäirintä voidaan toteuttaa kiinteällä taajuusalueella, joka vastaa tutkalähteen keskitaajuutta ja taajuuskaistaa, tai pyyhkäisemällä taajuusalueen yli, mikäli kohteena on hyppivätaajuinen tutka tai useita kiinteätaajuisia tutkia. Häirintälähteen taajuuspyyhkäisyssä askellus ja kaistanleveys määrittävät vastaamaan maalina olevan tutkan lähteen ominaisuuksia. Kohinahäirinnällä on mahdollista luoda myös yksinkertaisia valemaaleja, jolla kytetään peittämään todellisia maaleja.



Kuva 138: AGC-häirinnän periaate

Tutkan pääkeilasta tapahtuva häirintä estää periaatteellisesti maalien havaitsemisen lähes kaikista suunnista erityisesti ympyräkeilaavien tutkien tapauksessa. Tämä on mahdollista siten, että häirintälähteen adaptoituu vastaanottamaan tutkasignaaliin ja vahvistaa tai heikentää häirintätehoa keilausajan funktiona. Mikäli häirintä tapahtuu sivukeilasta, häirintälähtimeltä edellytetään vähintään kohteena olevan tutkan antennin sivukeilasuhteen verran enemmän häirintätehoa, jotta saavutetaan vastaava tilanne kuin pääkeilasta toteutetulla häirinnällä.

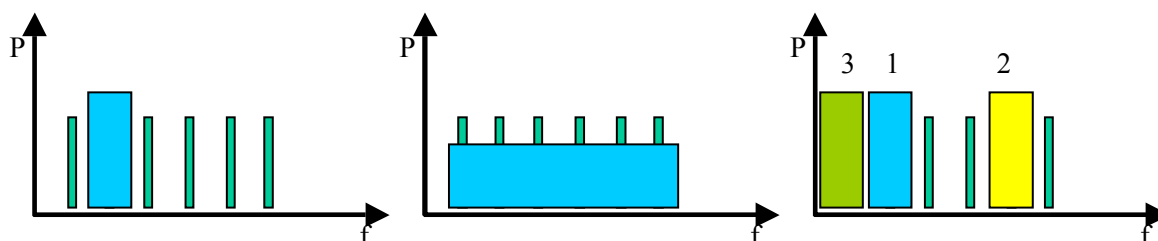


Kuva 139: Vasemmalla pelkästään pääkeilasta häiritsemään kykenevän häirintälähtimen vaikutus. Oikealla myös sivukeilojen häirintään kykenevän lähtimen vaikutus tutkaan. [Labvolt]

Häirintäsignaali on saatavissa tutkan vastaanottimelle helpoiten tutkan pääkeilasta, joka vahvistaa häirintäsignaalia. Pääkeilahäirinnässä häirintälähtetimen suunta on kuitenkin helposti pääteltävissä. Mikäli häirintälähtetimen teho riittää häirintäsignaalin syöttämiseen myös tutkan sivukeiloista, tutka saa häirintäsignaalin ilmaisimelleen riippumatta siitä mihin suuntaan sen antenni osoittaa, eikä tutka kykene määrittämään häirintälähtetimen suuntaan.

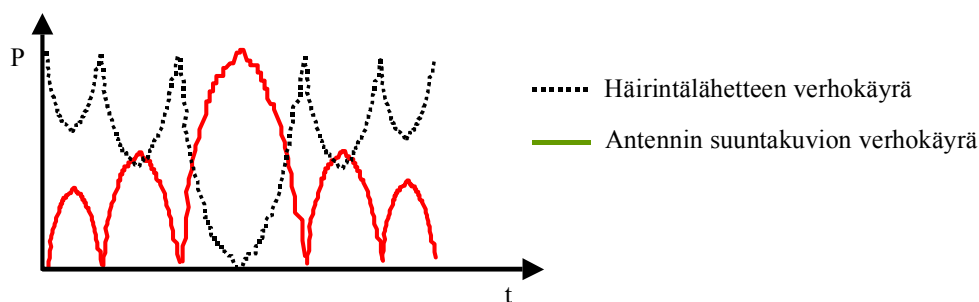
Nykyaikaiset valvontatutkat käyttävät haritusta, taajuushyppyä tai koherenttia integrointia ja erillisiä häirinnänilmaisukanavia, joilla kyetään havaitsemaan aktiivinen häirintä. Mikäli tutka käyttää esimerkiksi taajuushyppyä, se pakottaa häirintäjärjestelmän vaihtamaan piste-häirintämoodin laajakaistahäirintään, jolloin häirintäteho jakautuu tutkan käyttämälle taajuushyppykaistalle ja häirinnän tehoteho pienenee.

Pulssien seurantahäirintä (following jamming) edellyttää erittäin nopeita vastaanottimia häirintäjärjestelmässä. Jos häirintäjärjestelmän vastaanotin ei kykene seuramaan tutkan lähettämiä pulsseja reaaliajassa, häirintäjärjestelmä voi pyrkiä häiritsemään hyppivätaajuista tutkaa pyyhkäisyhäirinnällä.



Kuva 140: Kuvassa periaatteelliset piste-, laajakaista- ja seurantahäirintäteknikat. Pyyhkäisyhäirintä toteutetaan pistehäirinnän tavoin pyyhkäisemällä kapeakaistainen häirintälähete tutkan käyttämän taajuusalueen yli.

Mekaanisesti atsimuuttitason keilaavaa valvontatutkaa voidaan yrittää harhauttaa käänteisen vahvistuksen häirinnällä (inverse gain jamming). Kyseisessä tekniikassa tiedustellaan ensin antennin säteilykuvio, jonka jälkeen häirintäpulsseja lähetetään niin, että niiden maksimiampplitudi on antennin säteilykuvion minimikohdissa ja minimiampplitudit vastaavasti säteilykuvion maksimikohdissa.



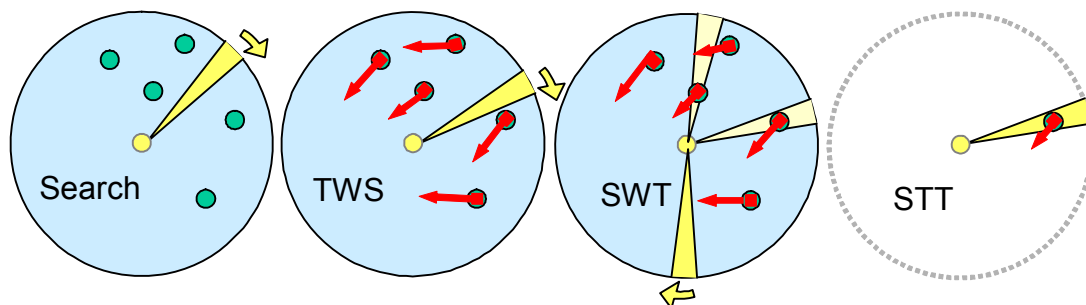
Kuva 141: Käänteisen vahvistuksen häirinnässä häirintäjärjestelmä lähettää häirintäpulsseja kohteena olevan tutkan säteilykuvion käänteisessä voimakkuudessa, jolloin tutkan havaitsema tehotaso on sama kaikista suunnista.

Suojamenetelmänä valvontatutkassa voidaan käyttää ympärisäteilevää apuantennia, jonka avulla voidaan sekä ilmaista häirintäsignaalin olemassaolo (sidelobe blanking), että erottaa pääkeilasta tuleva maalikaiku sivukeilojen kautta tulevasta häirinnästä (sidelobe cancelling).

Seurantatutka

Valvontatutka toimii normaalisti etsintämoodissa (search mode), jolloin se keilaa koko ympäröivää tilaa ja pyrkii vain havaitsemaan siinä olevat kohteet. Mikäli tutka kykenee myös pitämään yllä tietoa havaittujen kohteiden aiemmista sijainneista ja määrittämään niiden perusteella kohteiden liikevektorin sekä tämän avulla ennustamaan maalin sijainnin seuraavalla tutkasäteen keilauksella, puhutaan seurannasta valvonnan aikana (TWS, Track While Scan). Mikäli tutka kykenee seuraamaan maaliksi määriteltyjä kohteita esimerkiksi lähettämällä niiden suuntaan normaalia enemmän tutkapulseja, ja samalla valvomaan koko muuta tilaa, puhutaan valvonnasta seurannan aikana (SWT, Scan While Track). Nykyaikaiset valvontatutkat kykenevät tyypillisesti toimitaan TWS-moodissa ja elektronisesti keilaavia antennija hyväksikäyttävät myös SWT-moodissa. Maalin seuranta asejärjestelmien edellyttämällä tarkkuudella edellyttää yleensä tätä tarkoitusta varten optimoidun tutkan, maalinseurantatutkan, käyttämistä.

Seurantatutkan ensisijaisena tehtävänä on tuottaa tarkka maalin sijainti määrittämällä maalin etäisyys, suunta ja nopeus. Seurantatutka saa valvontatutkalta ilmoituksen maalin olemassaolosta ja karkean maalin paikan, jonka perusteella se pystyy käynnistämään maalin etsinnän (target acquisition). Onnistunut etsintä päättyy tutkan lukittumiseen maaliin (lock on target). Maaliin lukittunut tutka seuraa koko ajan maalia ja mittaa sen etäisyyden, suunnan ja nopeuden muutoksia. Maalinseurantatutkat keskittyvät tyypillisesti yhden maalin seurantaan kerrallaan (STT, Single Target Track).



Kuva 142: Vasemmalta oikealle: valvontatutka (search radar) pyrkii vain havaitsemaan kohteiden olemassaolon ja päättämään mitkä niistä otetaan tarkempaan seurantaan. TWS-tutka kykenee seuraamaan maaliksi luokiteltuja kohteita ja samalla jatkamaan valvontatehtäväänsä. SWT-tutka puolestaan kykenee ottamaan maalit tarkempaan seurantaan ja kuitenkin etsimään uusia maaleja valvomastaan tilasta. STT-tutka keskittyy yhden maalin seurantaan kerrallaan.

Koska seurantatutkan tehtävänä on etsiä valvontatutkan antaman maalinosoituksen perusteella maali ja seurata sitä asejärjestelmän ammunnan mahdollistamiseksi, siltä edellytetty kantama on vain jonkin verran sen tukeman asejärjestelmän kantamaa suurempi. Sen sijaan siltä edellytetään tarkkaa maalin paikan ja liikeradan mittauskäkyä sekä nopeata maalin paikkatiedon päivittämistä. Näiden vaatimusten vuoksi seurantatutkat toimivat yleensä valvontatutkia korkeammilla taajuuksilla, joilla on saavutettavissa hyvä nopeusresoluutio, kapealla keilalla saatava suuri antennivahvistus sekä hyvä kulmaresoluutio. Korkea taajuus mahdollistaa lisäksi hyvän sivukeilatason ja pienikokoisen antennin käytön. Kuvassa 143 on esitetty seurantatutkan tyypillisiä ominaisuuksia.

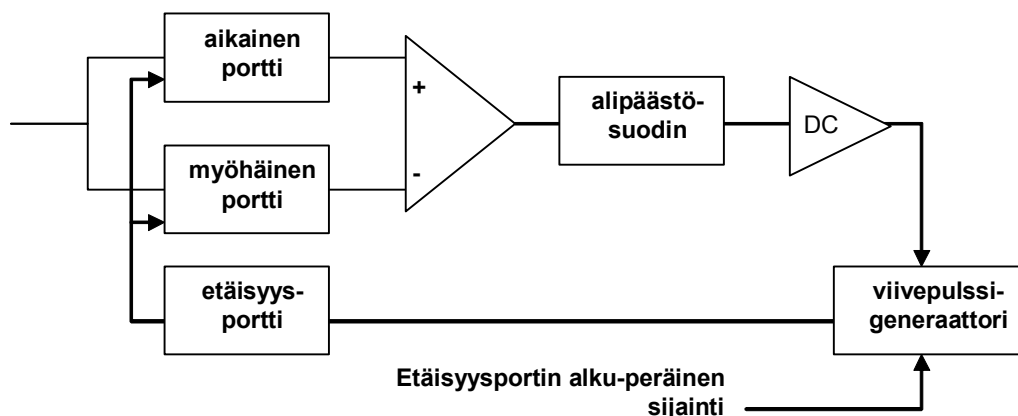
Seurantatutka mittaa maalin etäisyyden, nopeuden ja kulman tutka-antenniin nähden. Seurantatutkan häirintä käsittää siten etäisyys-, nopeus- ja kulmamittauksen häirinnän. Seuraavat luvut käsittelevät näitä.

<p>Toiminnalliset vaatimukset</p> <ul style="list-style-type: none"> - hyvä kulma-, etäisyys- ja nopeus-resoluutio - kantama asejärjestelmän luokkaa - hyvä liikkuvuus <p>Seurannaisvaatimukset</p> <ul style="list-style-type: none"> - ilmakehävaimennuksella ei väliä - korkeahko taajuus - pieni antenni - suuri pulssintoistotaajuus - ei keilaustarvetta (STT) - pieni yksikäsitteinen mittausetäisyys

Kuva 143: Esimerkki maalinsoitustutkalle asetetuista vaatimuksista.

Etäisyysseurantamenetelmät ja niiden häirintä

Maalin etäisyydenmittausta varten seurantatutka pitää yllä tietoa maalin etäisyydestä integroimalla maalikaiun energiaa kahdella integraattorilla, aikaisella ja myöhäisellä portilla (early gate, late gate). Tutka vertaa laskettua maalin etäisyyttä lähempää ja kauempaa tulevaa kaikupulssin energiaa toisiinsa. Järjestelmä säätää etäisyysporttia siten, että aikaisen ja myöhäisen portin energiat ovat yhtä suuret. Mikäli energia aikaisessa portissa on suurempi, tutka tulkitsee maalin olevan etäisyysporttiin ohjelmoitua etäisyyttä lähempänä – ja toisin päin. Tällöin järjestelmä joko pidentää tai lyhentää viivepulssia, joka ajoittaa sen, koska vastaanotin alkaa kerätä maalista tulevaa signaalia. Etäisyysporttien käytön etuna on myös se, että muilta kuin maalin etäisyyksiltä tuleva häirintä ja tutkavälke ei pääse tutkan vastaanottimeen. Kuvassa 145 on esitetty etäisyydenmittausportin toimintaa.



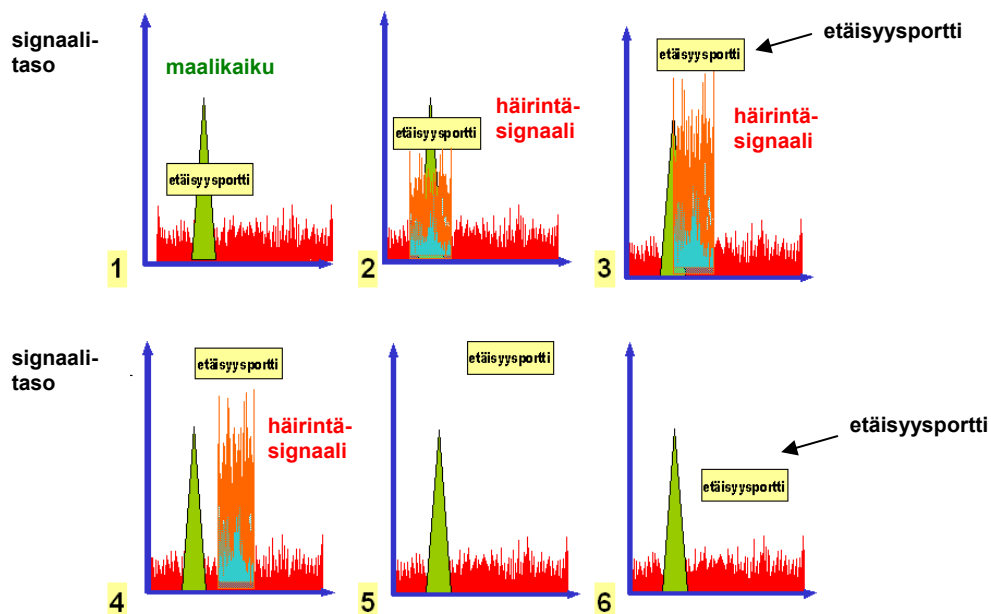
Kuva 144: Maalin etäisyydenmittausta varten seurantatutka pitää yllä tietoa maalin etäisyydestä vertaamalla tätä etäisyyttä lähempää ja kauempaa tulevaa kaikupulssin energiaa toisiinsa. Kun molemmista porteista saadaan yhtä suuri energia, maali on etäisyysporttien keskellä.

Estämällä tai harhauttamalla tutkan etäisyydenmittauskykyä kyetään vaikeuttamaan ase-
laukaisuhetken optimointia ja estämään ase- ja maalin torjuntahetken ja – siten myös paikan
– määrittely. Tämä saattaa joko estää ase-
laukaisun kokonaan tai estää asetta osumasta
virheellisen ennako- tai kohtaamispisteen vuoksi.

Tutkan seurantalukon murtamiseen käytetään etäisyysportin varastamiseksi (Range-Gate
Stealing) kutsuttua menetelmää. RGPO:n perustuu seuraavaan toimintoketjuun:

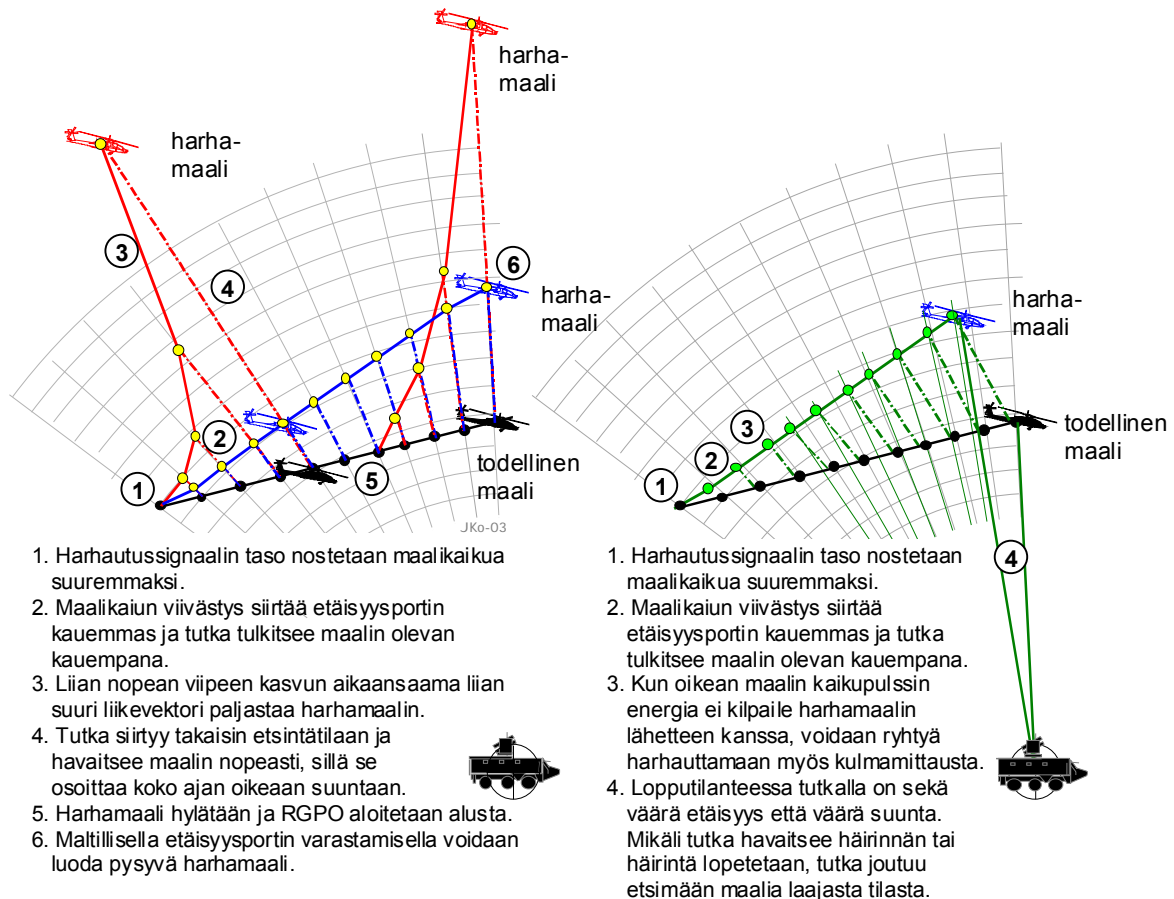
1. Piilotetaan tutkakaiku häirintäpulssein alle, jolloin tutkan automaattinen vahvistuksen säätö pienentää vastaanotetun signaalin vahvistusta.
2. Kun tutkan vahvistus on niin pieni, ettei todellinen tutkakaiku enää ylitä ilmaisukyn-
nystä, viivästetään häirintäpulsseja, jolloin etäisyysportti siirtyy kauemmas todellisesta
maalista.
3. Kun etäisyysportti on saatu riittävän kauas maalin todellisesta sijainnista, häirintä
lopetetaan. Tällöin tutka ei pienen AGC-vahvistuksen vuoksi kykene näkemään todel-
lista maalikaikuakaan ja sen on siirryttävä maalinetsintämoodiin.
4. Mikäli tutka ei osaa etsiä maalia oikeasta suunnasta, esimerkiksi häirinnän aikana
tapahtuneen väistöliikkeen tai samalla toteutetun nopeus- ja kulmaseuraimen harhaut-
tamisen vuoksi, seurantalutka saattaa tarvita uuden maalinosoituksen valvontatutkalta

Harhautettavan tutkan toiminta on tunnettava riittävän hyvin, jottei viivästystä tai taajuuden
muutosta tehdä niin nopeasti, että tutka havaitsee olevansa häirinnän kohteena ja häirintä ei
onnistu.



Kuva 145: Tutkan seurantalukko voidaan murtaa etäisyysportin varastamisella. 1. Tutka
seuraa maalikaikua ja asettaa AGC:n oikealle tasolle, 2. Vahvistetulla toistopulsilla tutka
nostaa AGC:n tason, 3.-4. Valemaalin pulssia viivästetään, 5. etäisyysportin ollessa riittä-
vän kaukana todellisesta maalista, harhauttaminen lopetetaan, 6. Tutkan on haettava
maalin etäisyys uudestaan seurannan aloittamiseksi.

Kuvassa 146 on esitetty kaksiulotteisena kaaviona miten tutka tulkitsee etäisyysportin
varastamisen maalin muuttuneena sijaintina.

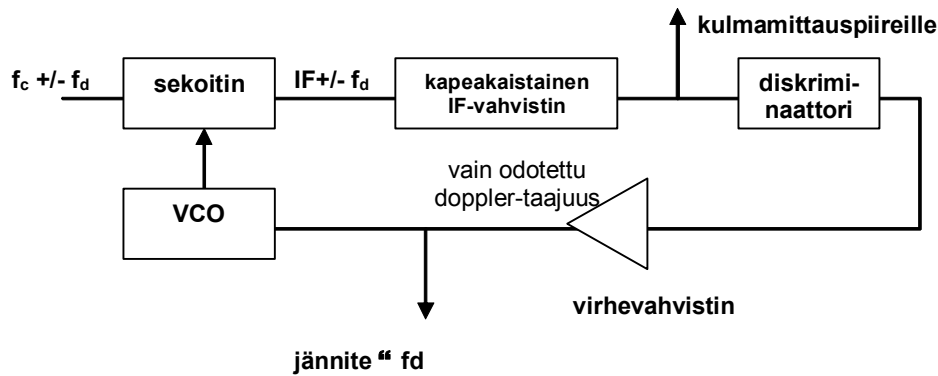


Kuva 146: Tutkan seurantalukon murtaminen etäisyysportin varastamisella

RANRAP-häirinnässä (Random Range Program) luodaan useita harhamaaleja tavoitteena peittää todellinen maalikaiku täydellisesti ja hämmentää operaattori niin ettei tämä kykene erottamaan oikeata näyttölaitteen täyttävistä maaleista.

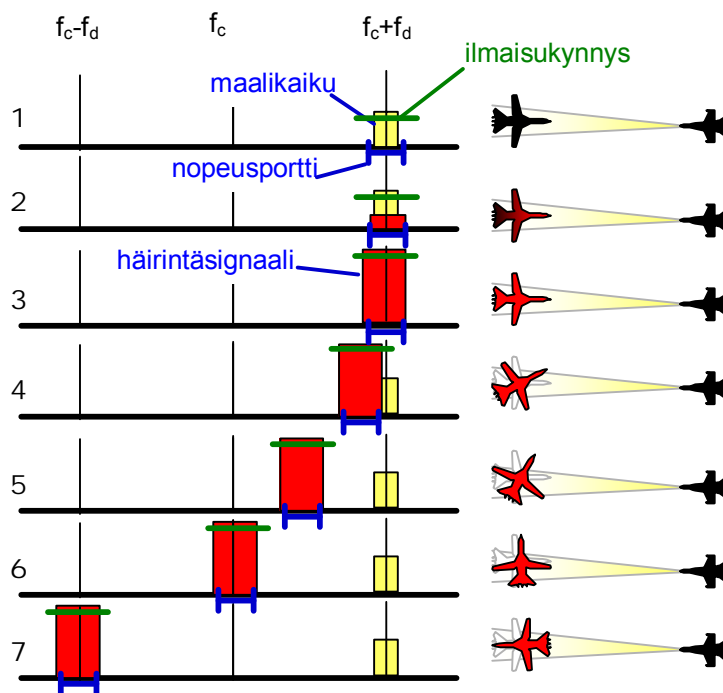
Nopeudenseurantamenetelmät ja niiden häirintä

Seurantatutkan nopeudenmittaus perustuu dopplerilmiöön, eli maalin liikkeen aikaan saamaan taajuuseroon lähetetyn ja heijastuneen tutkasignaalin välillä. Maalikaiun dopplersiirtymä aiheuttaa myös välitaajuudella (IF) taajuussiirtymän. Se ilmaistaan taajuusdiskriminaattorilla, jonka lähtöjännite riippuu siihen syötettävästä taajuudesta. Diskriminaattorin antama signaali vahvistetaan ja viedään jänniteohjattuun oskillaattoriin (VCO, Voltage-Controlled Oscillator), jonka lähtötaajuus riippuu siihen syötettävän signaalin jännitteestä. Saatu signaali sekoitetaan tutkapulssin kanssa, jolloin optimitilanteessa syntyvä dopplertaajuus on nolla. Mikäli maalin doppler muuttuu, syntyy taajuusero, joka muutetaan ensin jännite-eroksi – joka kertoo maalin dopplertaajuuden – ja edelleen korjatuksi sekoitustaajuudeksi. Näin saadaan aikaan piiri, joka pitää yllä tietoa maalin dopplertaajuudesta ja joka kykenee seuraamaan maalin nopeuden muutoksia. Virhevahvistimen säätösilmukan nopeus asetetaan siten, että vastaanotin kykenee seuraamaan maalin realistisen liikkeen aiheuttamia dopplertaajuuden muutoksia, mutta hylkää epärealistisen nopeat muutokset.



Kuva 147: Nopeusseuranta perustuu maalin dopplertaajuuden mittaukseen. Dopplertaajuusero f_d muutetaan diskriminaattorilla ja virhevahvistimella maalin nopeutta kuvaavaksi jännitteeksi, joka syötetään nopeusseurantaporttiin.

Kuva 148 esittää tilannetta, jossa lentokone lentää kohti tutkaa. Tutkan sama maalikaiku on dopplersiirtymän f_d verran korkeammalla taajuudella kuin lähetetty tutkapulssi f_c . Nopeudenmittauksen häirintä perustuu siihen, että ensin kaapataan nopeusportti lähettämällä oikealla taajuudella riittävän voimakas oikeata tutkakaikua muistuttava häirintäpulsssi (2). Häirintälähteen taajuuden on vastattava maalikaikua, muuten tutka hylkää äkillisesti muutuneen dopplertaajuuden. Häirintälähete saa aikaan sen, että seurantatutkan automaattinen vahvistuksensäätiöpiiri (AGC) laskee vahvistusta, jottei vastaanotin tukkeudu. Pienempi vahvistus johtaa ennen pitkää siihen, että todellisesta maalista vastaanotetun kaiun taso on alle tutkan ilmaisukynnyksen (3).



Kuva 148: Nopeudenmittauksen harhauttaminen nopeusportin varastamisella.

Kun tutka ei enää nouseen ilmaisukynnyksen vuoksi kykene havaitsemaan maalikaikua, häirintäsignaalin taajuutta muutetaan, jonka tutka mittaa taajuuserona ja tulkitsee maalin radiaalinopeuden muutoksena (4-5). Laskeva dopplertaajuus näkyy tutkalla hidastavana tai

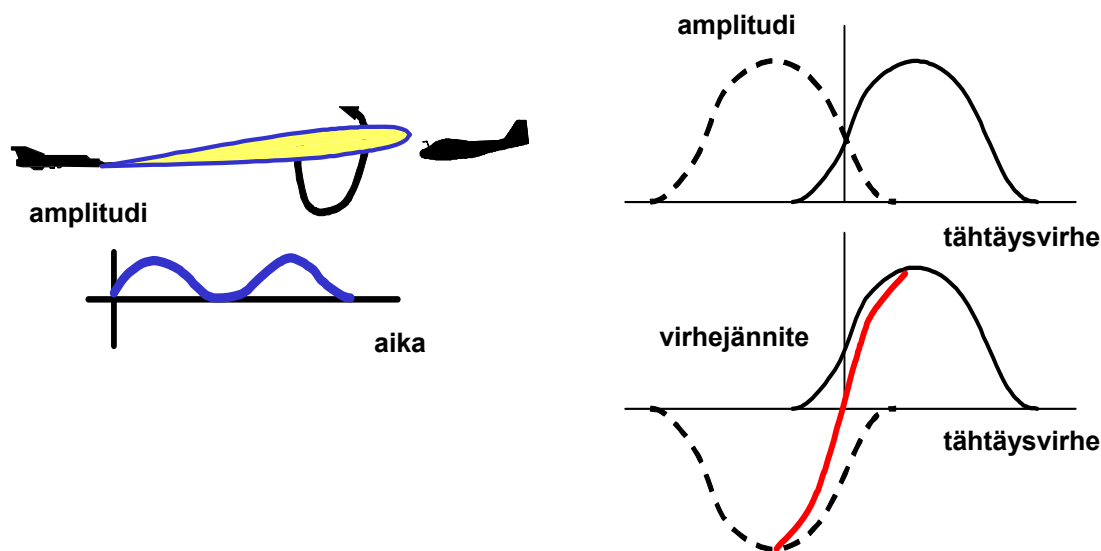
kääntyvänä maalina. Kun dopplertaajuus on nolla tutka tulkitsee maalin joko pysähtyneen tai kääntyneen kohtisuoraan tutkaan nähden (6). Häirintäsignaalin taajuuden pienentäminen edelleen johtaa siihen, että tutka tulkitsee maalin loittonevan.

Kulmaseurantamenetelmät ja niiden häirintä

Kartiokeilaus

Yleisimmät kulmaseurantamenetelmät ovat keilanheitto, kartiokeilaus (CONSCAN), peitetty kartiokeilaus (COSRO) ja monopolssiseuranta. Nykyaikaiset seuranta- ja monitoimitutkat käyttävät sovellettua keilanheittomenetelmää vaiheohjatussa antenniryhmässä. Keilanheittoa käyttävät tutkat seuraavat kohdetta siirtämällä antennikeilaa kohteen molemmille puolille. Tutka mittaa molemmista keiloista saatavat amplitudit ja muodostaa niistä erojännitteen, jonka perusteella tutkan antennia siirretään joko vasemmalle tai oikealle, mikäli maali on siirtynyt pois keskiakselilta. Kuvassa 149 kohteen vasemmalle puolelle tarkoitetusta keilasta saatava amplitudi on voimakkaampi kuin oikeanpuoleisesta antennikeilasta saatava, joten fyysistä antennia on siirrettävä vasempaan kunnes keiloista saatavat jännitteet ovat yhtä suuret. Tämä tekniikka mahdollistaa maalinseurannan ainoastaan atsimuuttitasossa. Elevaatiotason mittaamiseen tarvitaan kaksi lisäkeilaa. Keilanheittotekniikalla toimiva seurantatutka on helppo harhauttaa toistohäirinnällä. Esimerkiksi vasemmanpuoleisen keilan lähetyksen aikana toistetaan tutkapulssi vahvistettuna, jolloin se kääntää antennia vasemmalle. Mikäli toistopulssin voimakkuus valitaan oikein, kohteena oleva tutka saadaan harhautumaan kohteesta.

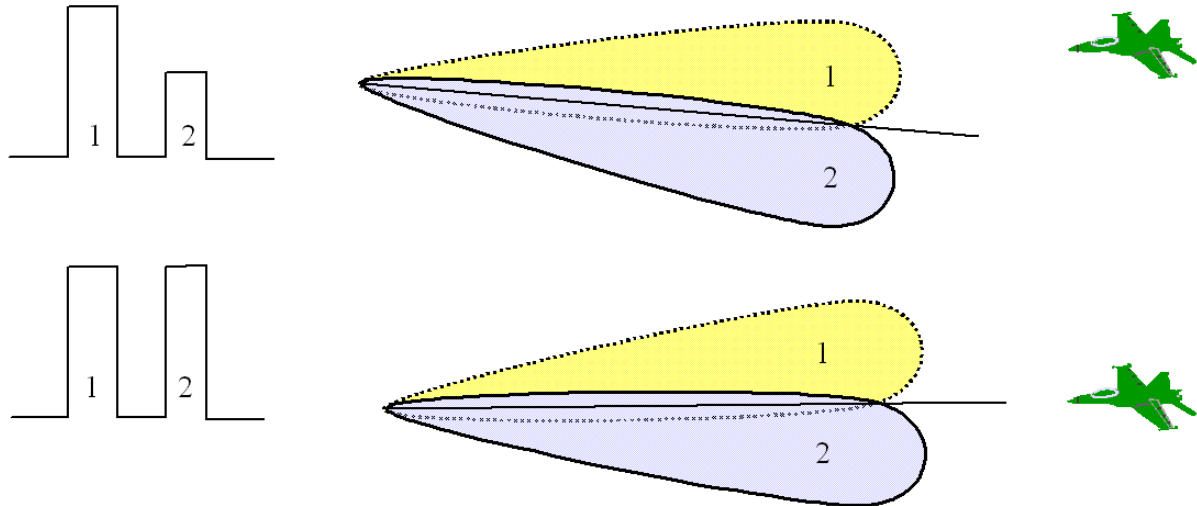
Kartiokeilaus (Conical Scan, CONSCAN) on keilanheittotekniikan paranneltu menetelmä. Kartiokeilauksessa antennikeilaa pyöritetään tutkan ja maalin välille muodostuvan keskiakselin ympärillä. Mikäli maali poikkeaa odotetulta keskiakselilta, moduloituu vastaanotettava pulssijono keilauksen pyörimisnopeuden verrannollisella jännitteellä.



Kuva 149: Kartiokeilausmenetelmässä sekä lähetys- että vastaanottokeilaa liikutetaan ympyrän muotoista rataa pitkin. Mikäli vastaanottosignaali AM-moduloituu, maali ei ole tähtäyslinjalla.

Mittauksen jälkeen reaaliantenni siirretään maalin suuntaan muodostetun erojännitteen avulla, jolloin modulaatio häviää. Tyypilliset pyyhkäisytaajuudet ovat 30 Hz luokkaa ja PRF

120 Hz. Servokaistanleveys on yleensä 2-5 Hz. Menetelmä on yksinkertainen, mutta alitis häilynnän aiheuttamalle amplitudimodulaatiolle sekä häirinnälle (inverse gain ja blinking jamming). Lisäksi menetelmän luontaisena heikkoutena on se, että kun maali on tähtäyslinjalta, se ei ole antennin pääkeilassa, joten maalista ei saada niin hyvää signaalia kuin teoriassa olisi mahdollista.



Kuva 150: Keilanheiton käyttämisen seurannassa perustuu kahden keilan amplitudien mittaamiseen.

Kartiokeilaustutkan häirintä

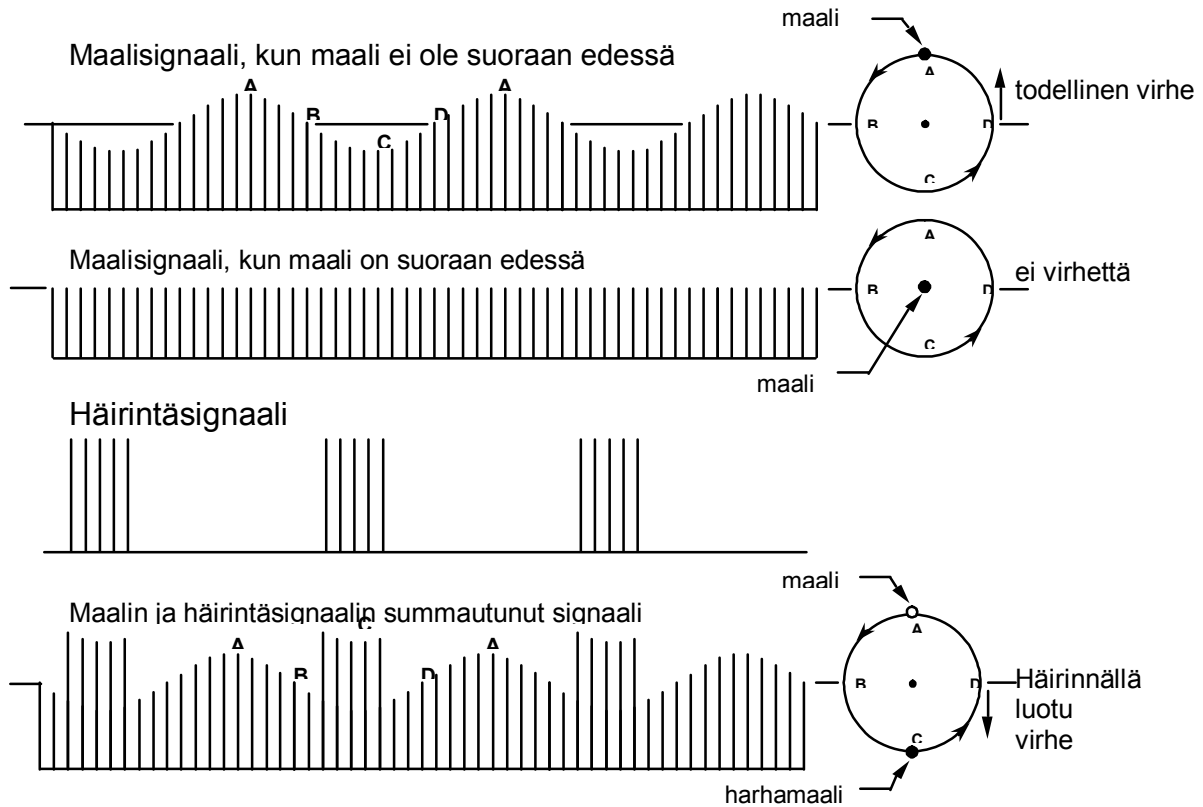
Kartiokeilaus on helppo häiritä, sillä kartion pyörimisaika on helppo tiedustella ja amplitudimoduloituneen verhoikäyrän minimikohdat voidaan täyttää häirinnällä.

Peitetty kartiokeilaus

Tavallinen kartiokeilausmenetelmä on erittäin helppo tunnistaa ja näin ollen häiritä, joten siitä on kehitetty versio, missä kartiokeilaus tapahtuu ainoastaan vastaanotossa (Conical Scanning On Receive Only, COSRO) eli peitetyn kartiokeilauksen menetelmä. Siinä lähetys tapahtuu aivan kuten tavallisessa tutkassa, mutta vastaanotossa seuranta tapahtuu kartiokeilauksen avulla.

Peitettyä kartiokeilausta käyttävän tutkan häirintä

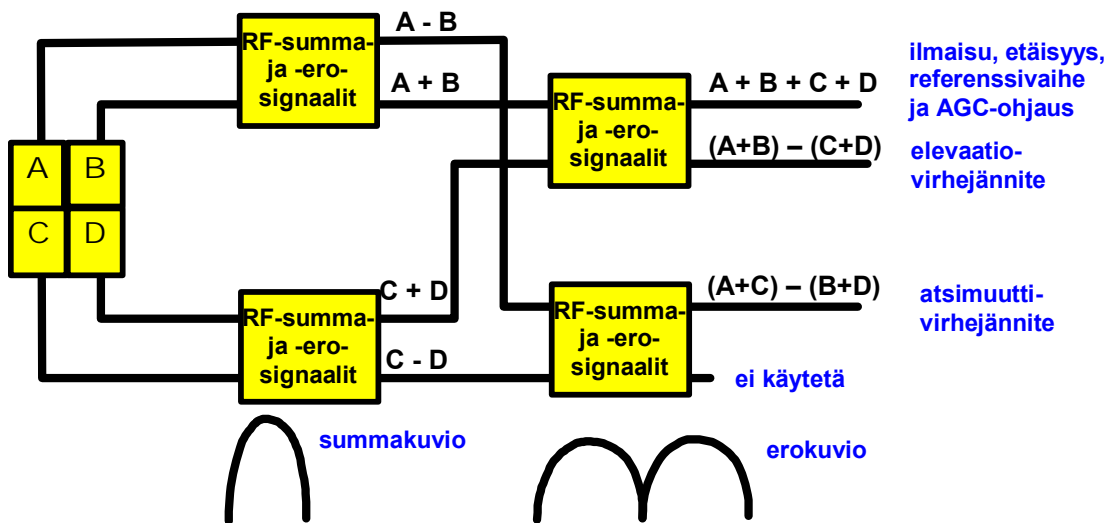
Tutkan havainnut omasuoja- tai tiedustelujärjestelmä ei kykene kertomaan keilauksen vaihetta eikä tämän vuoksi voi kertoa keilaustajuutta. Tällöin häirintäjärjestelmä ei voi optimoida häirintää tutkan verhoikäyrän minimikohtiin. Vaikka vastaanotettavan verhoikäyrän minimikohtia ei tiedetäkään, voidaan peitetyn kartiokeilauksen seurantatekniikkaa käyttävää tutkaa häiritä lähettämällä satunnaisesti häirintäpurskeita oletettua keilaustajuutta nopeammin, jolloin minimikohdatkin täyttyvät ja tutka harhautuu.



Kuva 151: Kartiokeilaustutkan häirintä oikein tahdistetulla pulssimuotoisella läheteellä siirtää maalin paikan valvonta-alueen vastakkaiselle puolelle.

Monopulssitutka

Toisin kuin keilanheitto- ja kartiokeilaustekniikassa, monopulssiseurannalla kyetään seuraamaan kohdetta yhden pulssin perusteella sekä atsimuutti- että elevaatiotasossa. Monopulssiseuranta perustuu vastaanotetun kaiun amplitudin tai vaiheen vertailuun.



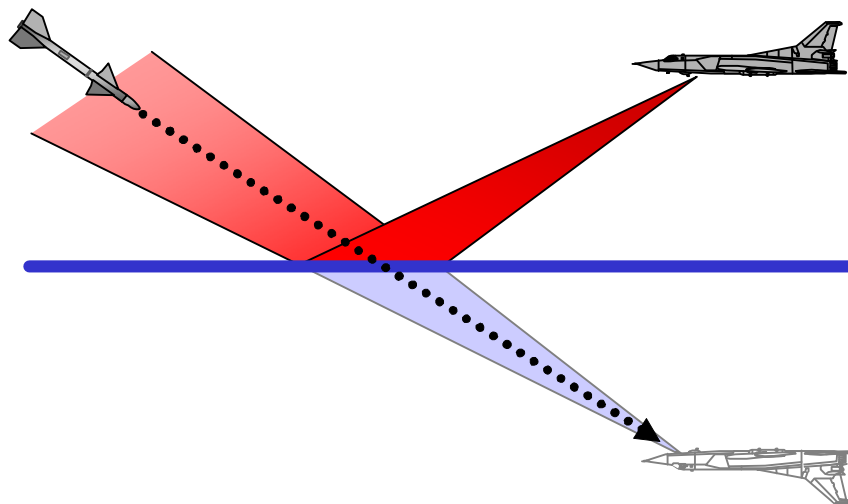
Kuva 152: Monopulssitutkan periaatteellinen rakenne.

Monopulssitutkassa maalin suunta vaaka- ja pystysuunnassa saadaan vertailemalla neljän syötön samanaikaisesti vastaanottamia amplitudeja. Vastaanotetuista amplitudeista lasketuilla ero- ja summajännitteillä lasketaan maalin suunta antennin keskilinjaan nähden. Tämän jälkeen tutka pyrkii kääntämään antennia siten, että maali on kohtisuorassa antennia vastaan. Ero- ja summasignaalit muodostetaan vaiheensiirron avulla: mikäli signaalit summataan, niiden vaiheet pidetään samoina ja mikäli ne erotetaan, vähentävän signaaliin vaiheeseen lisätään 180 asteen vaihe-ero.

Monopulssitutkan häirintä

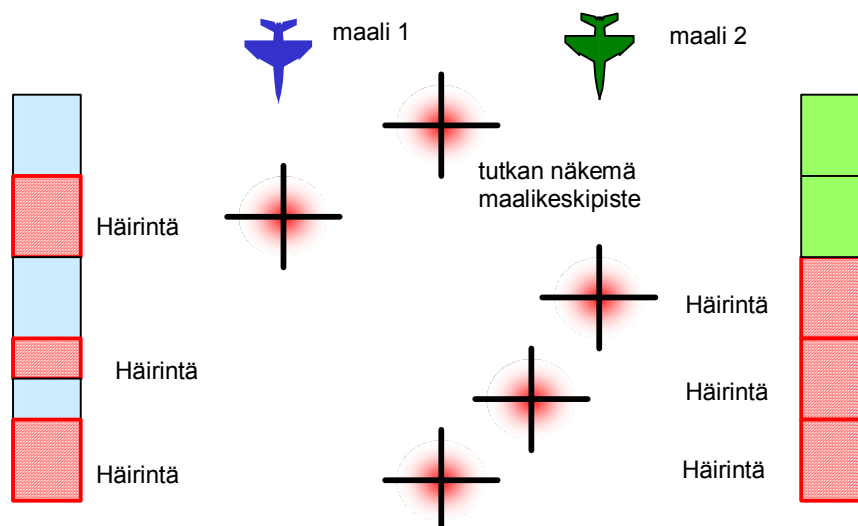
Monopulssitekniikan häirintä on merkittävästi muita tekniikoita vaikeampaa, sillä se kykenee paikantamaan maalin yhdellä tutkapulssilla. Monopulssitutkaan mahdollisesti tehoavia harhauttavia häirintätekniikoita ovat heijastus-, yhteis-, ristipolarisaatio- ja cross-eye häirintä.

Heijastushäirintä (terrain bounce jamming) on erityisesti johtavan pinnan – esimerkiksi meren - päällä mahdollinen menetelmä, jossa lentokone lähettää häirintäsignaalia vinosti alaspäin. Riittävän loivassa kulmassa lähetetty signaali heijastuu veden pinnasta ja etenee edelleen ohjukseen, joka hakeutuu häirintäsignaaliin – ja tässä tapauksessa itse asiassa lentokoneen peilikuvaan meressä. Ohjuksen tietoisuuden ja älykkyyden lisääntyessä se kykenee mahdollisesti päättelemään, ettei lentokone voi olla maan sisällä tai merenpinnan alla.



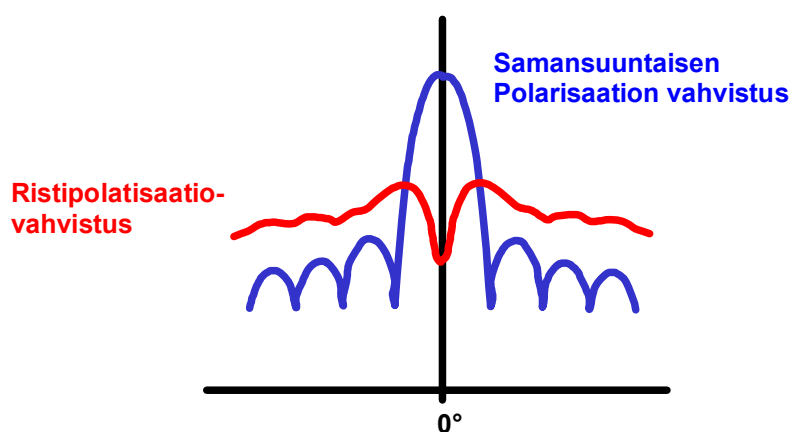
Kuva 153: Heijastushäirinnässä ohjus pyritään saamaan hakeutumaan lentokoneen peilikuvaan, jolloin se tuhoutuu osuessaan mereen tai maanpintaan.

Yhteishäirintä (co-operative jamming) perustuu kahteen tai useampaan lentokoneeseen, jotka lentävät samassa tutkan resoluutiosolussa. Vaihtelemalla häirintäsignaalin lähetystä tai lähettämällä samaan aikaan eri tehoilla voidaan tutkaa hämätä maalin keskipisteestä ja saada se vaeltamaan lentokoneiden välillä.



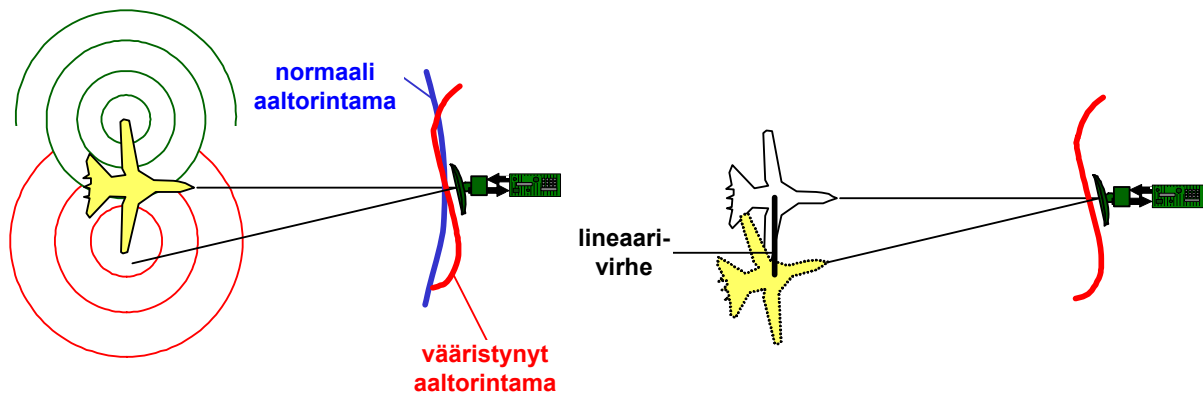
Kuva 154: Yhteishäirinnän periaate.

Ristipolarisaatiohäirinnässä käytetään hyväksi sitä, että kaikki todelliset antennit sieppaavat jossakin määrin myös pääpolarisaatiolle ristikkäistä polarisaatiota. Ristikkäisellä polarisaatiolla vastaanotettu signaali summautuu väärään vastaanotinkanavaan. Tällöin ero- ja summa-keilat vääristyvät ja tutka määrittää maalin paikan väärin. Ristipolarisaation käytössä on kuitenkin omat vaaratekijänsä. Mikäli häirintälähteestä johtuu suurempi osuus pääpolarisaatiota vastaanottavalle signaalikanavalle, häirintäsignaali itse asiassa parantaa tutkan seuranta-tarkkuutta. Tällainen tilanne voi johtua esimerkiksi silloin kun tutkan polarisaatiota ei tunneta ja häirintälähteen polarisaatio onkin sama kuin tutkan, tai kun häirintälähetettä lähettävä lentokone muuttaa asentoaan ja häirintälähte ei olekaan ristikkäinen tutkan lähteen kanssa. Koska antennin vahvistus ristikkäisellä polarisaatiolla on joka tapauksessa pieni, on vastaavasti häirintälähteen tehon oltava suuri, jotta ristikkäisellä polarisaatiolla vastaanotettu lähte kykenisi kilpailemaan todellisen maalikaiun kanssa. Käytännössä ristipolarisaatiohäirinnän vaatima suuri häirintä/hyösysignaalisuhde (noin 35 dB) edellyttää tutkan etäisyysseurannan harhauttamista ensin, jotta häirintäsignaali ei joudu kilpailemaan maalikaiun kanssa.



Kuva 155: Ristipolarisaatiohäirintä perustuu siihen, että jokainen antenni vastaanottaa hyvästäkin suunnittelusta huolimatta jossain määrin kaikkia polarisaatioita, mutta antennin vahvistuskuvio on erilainen eri polarisaatioille.

Cross-eye-häirinnässä pyritään muuttamaan tutkakaiun aaltorintamaa siten, ettei se tutkalle palattuaan ole kohtisuorassa maalin suuntaan nähden. Käytännössä tämä tehdään ottamalla tutkapulssivastaan ja toistamalla se kahdella lähettimellä siten, että toisen lähettimen vaihe on vastakkainen toisen vaiheeseen. Lähettinten aaltorintama summautuu ja koska signaalit ovat vastakkaisvaiheisia, on aaltorintama vääristynyt kuvan 156 mukaisesti. Monopulssiseuranta-tutkan toiminta perustuu siihen, että tutka päättelee maalin sijaitsevan tulevan aaltorintaman normaalin suunnassa. Tällöin seurantaan syntyy aaltorintaman vääristymän suuruinen kulma-
virhe, joka aiheuttaa maalin paikassa lineaarisen virheen D. Kaukana maalista sijaitsevilla tutkalla aaltorintama on lähes tasainen (lähellä tasoaaltoa) ja myös aaltorintamaan aiheutettu vääristymä pienenee. Siten cross-eye-häirintä on aina huomattavasti tehokkaampaa lyhyillä häirintäetäisyyksillä. Toisaalta tästä voi olla hyötyäkin, kuten tilanteessa, jossa kaukana sijaitseva asejärjestelmä laukaisee aktiivisen tai puoliaktiivisen ohjuksen. Vaikka asejärjestelmälavetin maalinseurain kykenee seuraamaan maalia suhteellisen tarkasti ja ohjus lähtee oikeaan suuntaan, ohjuksen lähestyessä se harhautuu koko ajan enemmän ja sopivasti suunniteltu järjestelmä aiheuttaa lopulta riittävän ison ohitusetäisyyden.

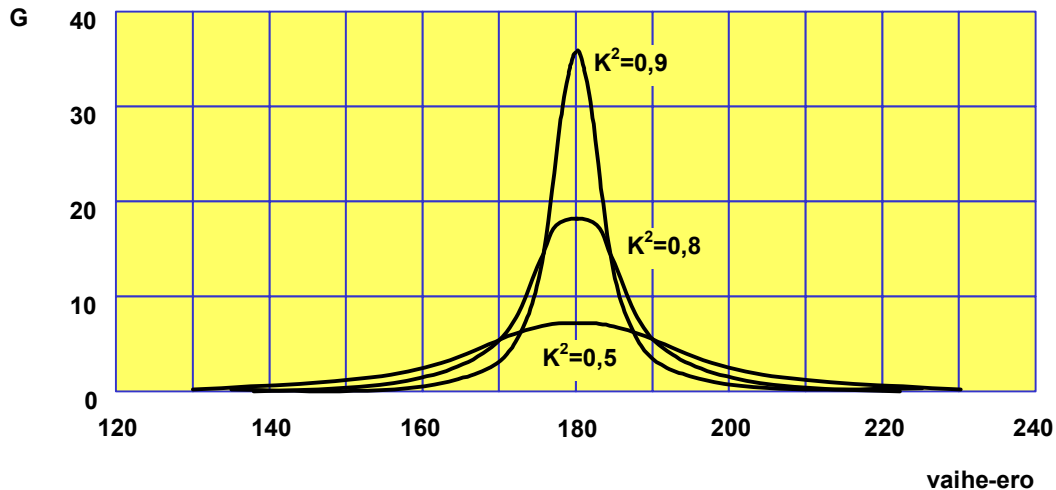


Kuva 156: Cross-eye-häirintä perustuu tutkapulssin aaltorintaman vääristämiseen.

Cross-eye-häirinnän lineaarinen D ohitusetäisyys (miss distance) saadaan kaavasta

$$D = G \cdot \frac{L}{2}$$

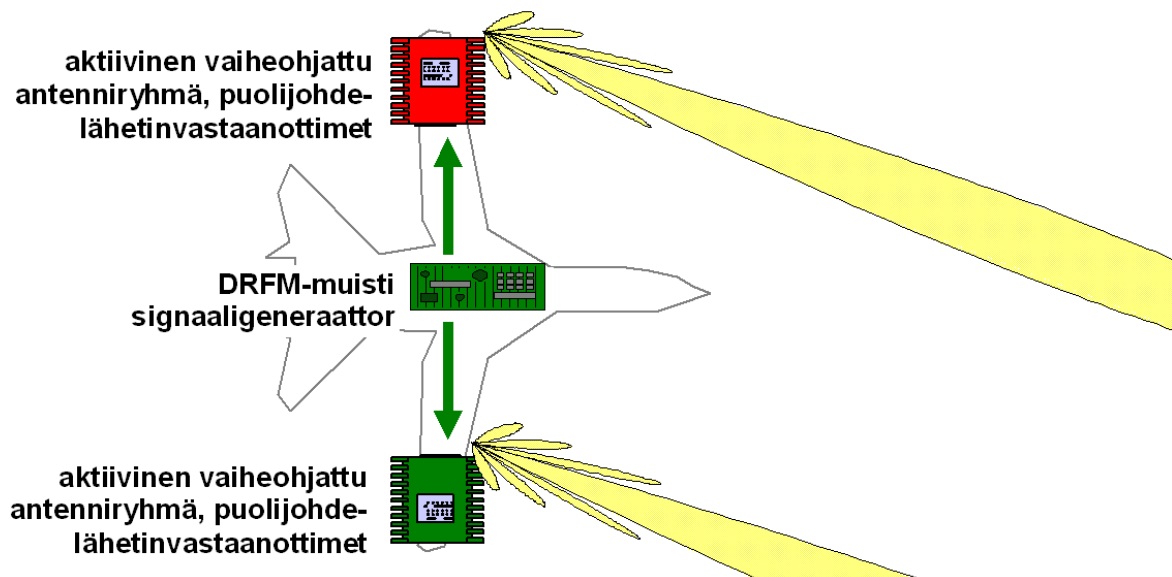
missä L on häirintälähetinten keskinäinen etäisyys ja G on cross-eye-vahvistus. G riippuu häirintäsignaalien vaihe-erosta sekä amplitudien suhteesta. Ideaalitilanteessa kummankin häirintälähettimen signaali on yhtä suuri ja vaihe tarkasti vastakkainen. Käytännössä tällaisen tilanteen synnyttäminen on erittäin hankalaa. Sillä häirintäjärjestelmän on otettava tutkapulssi vastaan, toistettava se toisella häirintälähettimellä, viivästettävä pulssin replikaa puolen aallonpituuden verran ja toistettava se sitten toisella häirintälähettimellä tarkalleen samanlaisena. Mikäli molemmat häirintäsignaalit ovat samansuuruiset, järjestelmä ei siedä minkäänlaista vaihevirhettä. Kuvassa 157 on esitetty vahvistuksen G suuruus vaihe-eron $\Delta\Phi$ funktiona eri amplitudisuhteilla K. Kuvasta havaitaan, että jos $K^2 = 0,9$, järjestelmä sietää ± 5 asteen vaihevirheen, sillä vahvistus G vaihtelee välillä 10 - 36. Jos K:ta lisätään, vahvistus kasvaa, mutta vaihevirheen sieto heikkenee merkittävästi.



Kuva 157: Cross-eye -häirintävahvistuksen riippuvuus häirintäsignaalien amplitudien suhteesta sekä vaihe-erosta.

Amplitudien suhteen ja vaihe-eron kriittisyyden vuoksi suositeltavin tapa toteuttaa cross-eye -häirintälähetin on käyttää puolijohdelähetimillä muodostettua aktiivisesti keilaavaa antenniryhmää. Puolijohdelähtimen amplitudi ja vaihe on helpommin hallittavissa kuin TWT:n ja lisäksi mahdolliset yksittäisten elementtien amplitudi- ja vaihevirheet keskiarvoistuvat usean elementin ryhmässä. Lisäksi aktiivinen vaiheohjattu antenniryhmä mahdollistaa antennikeilan kohdentamisen uhkalähtimen suuntaan ja useiden uhkalähtimien limittäisen häirinnän.

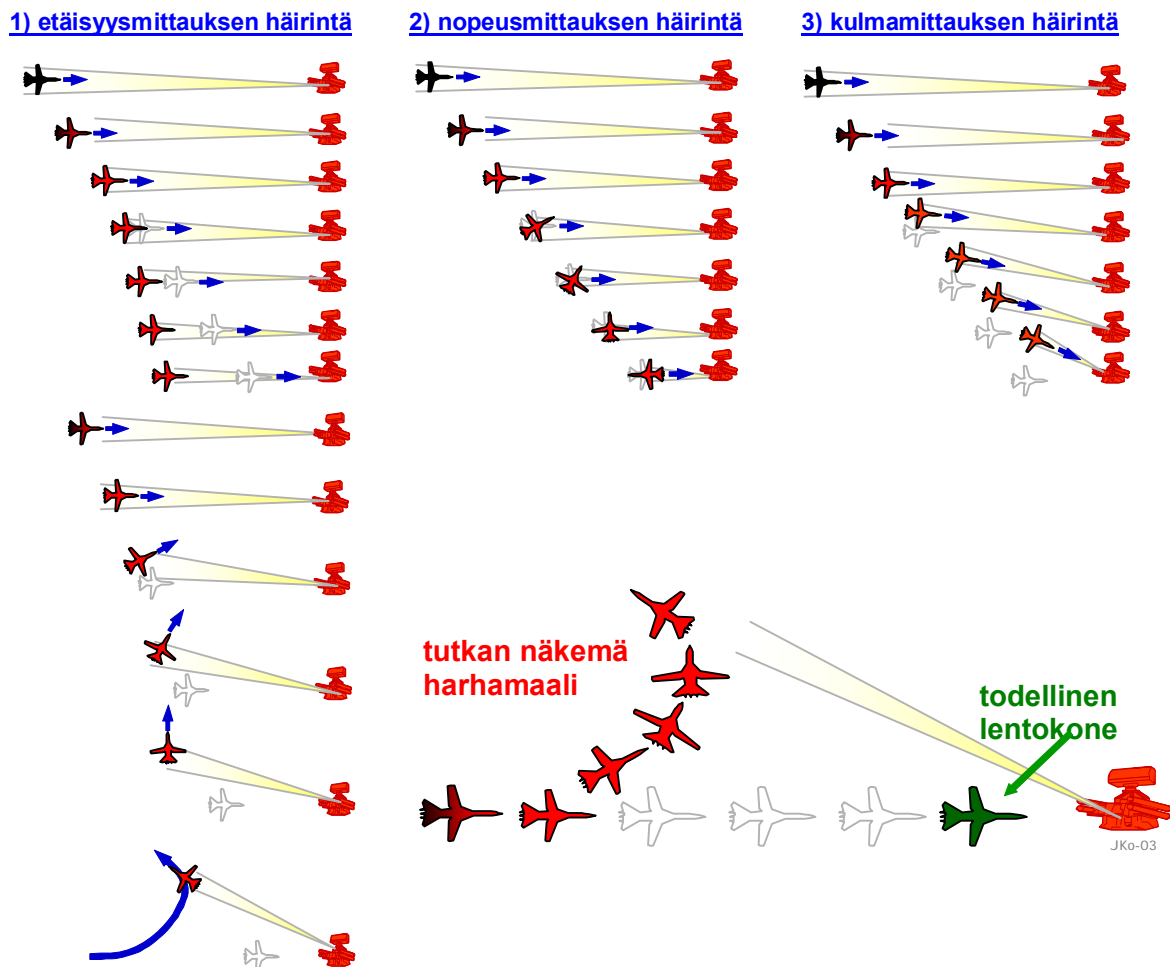
Kulmaharhautusmenetelmät vaativat suurta J/S-suhdetta, minkä vuoksi ensin on suoritettava etäisyys- tai nopeusportin varastaminen (RGPO, VGPO) ja kun maali ei enää ole tutkan etäisyys- tai nopeusseurantasolussa, eikä maalin kaiku kilpaile häirintäsignaalin kanssa, aloitetaan kulmaseurannan harhautus jollakin sopivalla menetelmällä. Seuraavassa luvussa käsitellään menetelmiä tutkan etäisyysmittausmenetelmiä sekä etäisyysmittauksen harhautusmenetelmiä.



Kuva 158: Esimerkki cross-eye-häirintälähtimen toteuttamisesta puolijohdelähtinvastaanottimilla muodostetulla vaiheohjatulla antenniryhmällä.

Eri häirintämenetelmien yhdistäminen

Pelkkä nopeudenmittauksen häirintä ei yleensä ole riittävä, sillä tutka kykenee edelleen mittaamaan maalin etäisyyden ja suunnan ja sen vuoksi määrittämään maalin paikan oikein¹⁹. Realistisen oloisen väärän liikeradan synnyttäminen seurantatutkalle edellyttää siten 1) etäisyysseuraimen 2) nopeudenmittauksen ja 3) kulmaseuraimen harhauttamista (kuva 159). Etäisyysseuraimen harhauttamisella saadaan maalikaiku pois kilpailemasta häirintäsignaalin kanssa, nopeudenmittauksen häirinnällä estetään tutkaa havaitsemasta etäisyysportin varastamista. Kulmaseuraimen häirintä vaatii yleensä niin suuren häirintä/hyöty-signaali-suhteen, että sen onnistuminen on epävarmaa, jos tutka vastaanottaa myös todellisen maalikaikon heijastamaa signaalia. Tämän vuoksi kulmaseuraimen häirintä on yleensä mahdollista vasta etäisyys- ja nopeusporttien varastamisen jälkeen.



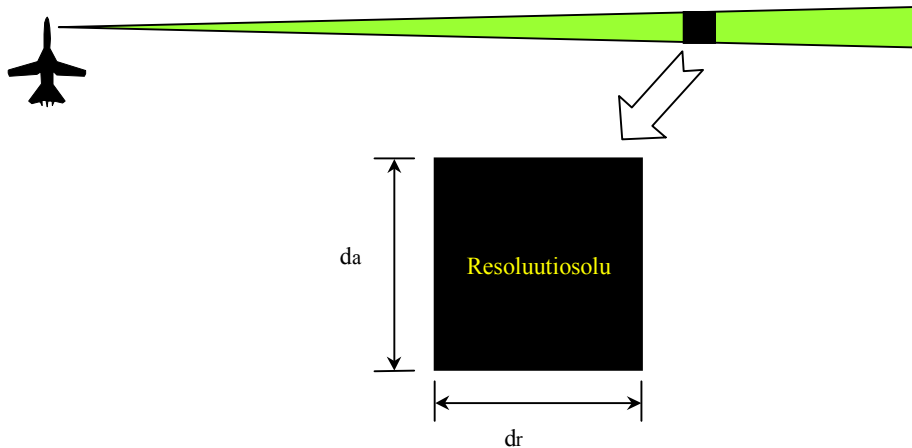
Kuva 159: Eri harhautusmenetelmien luo uskottavan harhamaalin, jota tutka ryhtyy seuraamaan. Tutkan näkemä oikea maali on kuvattu mustalla, harhamaali punaisella ja oikea maali, jota tutka ei näe on esitetty ääriiviivana.

¹⁹ Pelkällä nopeusportin varastamisella voi olla merkitystä mikäli tutka mittaa vain maalien nopeuksia (esim. pulssidopplertutka nopeusetsintämoodissa).

Synteettisen apertuurin tutka, SAR

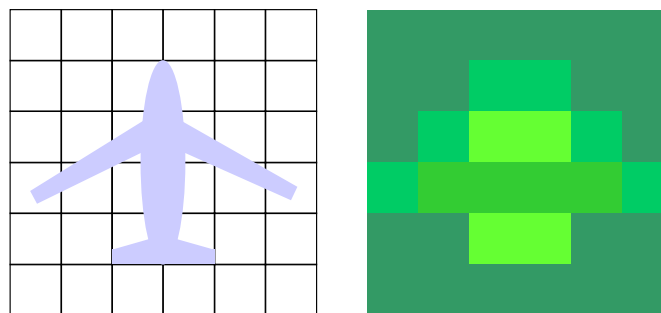
SAR-tekniikka

SAR-tekniikan (Synthetic Aperture Radar) kehittyminen on lisännyt ilmalavettisten tutkien merkitystä sodankäynnissä. SAR-tekniikkaa käytetään sekä laajojen alueiden tiedusteluun ja yhtymän tilannekuvan muodostamiseen tukemiseen, että rynnäkkökoneiden ja taisteluhelikoptereiden maalialueen tilannekuvan muodostamiseen. SAR-moodin avulla hävittäjä tai jokin muu ilma-alus kykenee maastonseurantaan, maalien etsintään, maalien luokitteluun sekä yksilöintiin ja maastontiedusteluun. SAR-tutkilla saavutettava resoluutio vaihtelee käyttötarkoituksen mukaisesti 35 metristä aina 0,5 – 2 metriin. Tulevaisuuden superresoluutiomenetelmillä voidaan vielä parantaa resoluutiota 0,15 – metrin luokkaan.



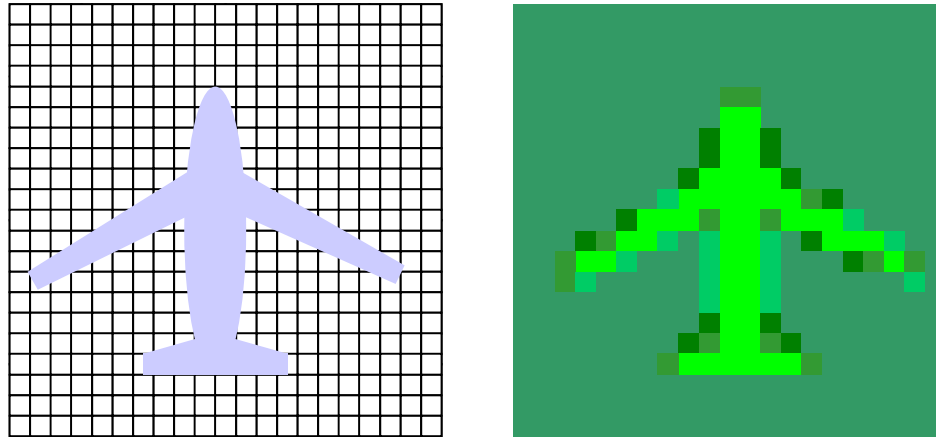
Kuva 160: SAR-tutkan resoluutiosolu on suorakaiteen muotoinen, jonka sivut ovat ideaalisessa tapauksessa yhtäpitkät näin ollen muodostaen neliön.

Tutkan resoluutiosolu on suorakaide, jonka leveys d_a määräytyy antennin atsimuuttitason poikittaisresoluutiosta, (antennin 3 dB keilanleveys halutulla etäisyydellä) ja pituus d_r tutkan etäisyysresoluutiosta (pulsin pituuden muodostama etäisyysresoluutio). Resoluutiosolun muoto voi vaihdella maaston muotojen vaikutuksesta, mutta ideaalitapauksessa se on neliö, jonka kulmat ovat pyöristyneet.



Kuva 161: Resoluutiosolun kokosuhde 1:5 tiedusteltavan kohteen mittoihin ei mahdollista tunnistamista eikä yksilöintiä. Kartoitettavasta kuvasta saattaa olla mahdollista muodostaa käsitys alueella olevasta lentokoneesta.

SAR-tutkaa käytetään erilaisiin tarkoituksiin sen tarkkuuden perusteella. Mikäli tarkoituksena on kartoittaa esimerkiksi yleisiä maastonmuotoja, voidaan hyväksyä 10 – 30 metrin tarkkuus, joka riittää esimerkiksi teiden ja rannikon muotojen hahmottamiseen. Sotilassovelluksissa ensisijaisena tarkoituksena etsiä ja luokitella kooltaan 2 – 6 metriä olevia ajoneuvoja ja rakenteita, joiden mukaan resoluutiovaatimus asetetaan..



Kuva 162: Resoluutiosolun kokosuhte 1:20 mahdollistaa kotuullisen luotettavan hahmon-tunnistuksen.

Nyrkkisääntönä voidaan pitää, että resoluutiosolun koon suhde luokiteltavan kohteen kokoon tulee olla parempi kuin 1:5 havaitsemista varten. Mikäli kohde halutaan tunnistaa tai jopa yksilöidä tulee kokosuhteen olla vähintään 1:20 tai parempi.

Virtuaalisella antennilla saavutettavan poikittaisresoluutio δ_{cr} voidaan laskea kaavalla, jossa L on virtuaalisen antennin pituus ja R_0 tiedusteluetaisyys.

$$\delta_{cr} = \frac{R_0 \cdot \lambda}{2 \cdot L}$$

Reaaliantennin poikittaisresoluutio δ etäisyydellä R_0 saadaan kaavasta:

$$\delta = \frac{\lambda \cdot R_0}{D},$$

jossa θ on 3 dB keilanleveys radiaaneissa ja D on antennin halkaisija. Tarkasteltaessa kaavoja huomataan, että resoluutiotarkkuuden parantamiseksi tulee lyhentää tiedusteluetaisyyttä, tai kasvattaa antennin fyysisiä mittoja, jolloin 3 dB:n keilanleveys pienenee. Niin kuin muissakin tutkissa etäisyysresoluutio määräytyy pulssin pituuden mukaan. Tällöin ongelmaksi syntyy tutkan vastaanottimessa olevien suodattimien leveys. Mikäli koko pulssin energia halutaan käyttää ilmaisussa tulee, suodattimien 3 dB kaistanleveyden olla vähintäänkin pulssinpitouden käänteisarvo $1/\tau$. SAR-tutkan etäisyysresoluutiota voidaan parantaa pulssikompressiolla.

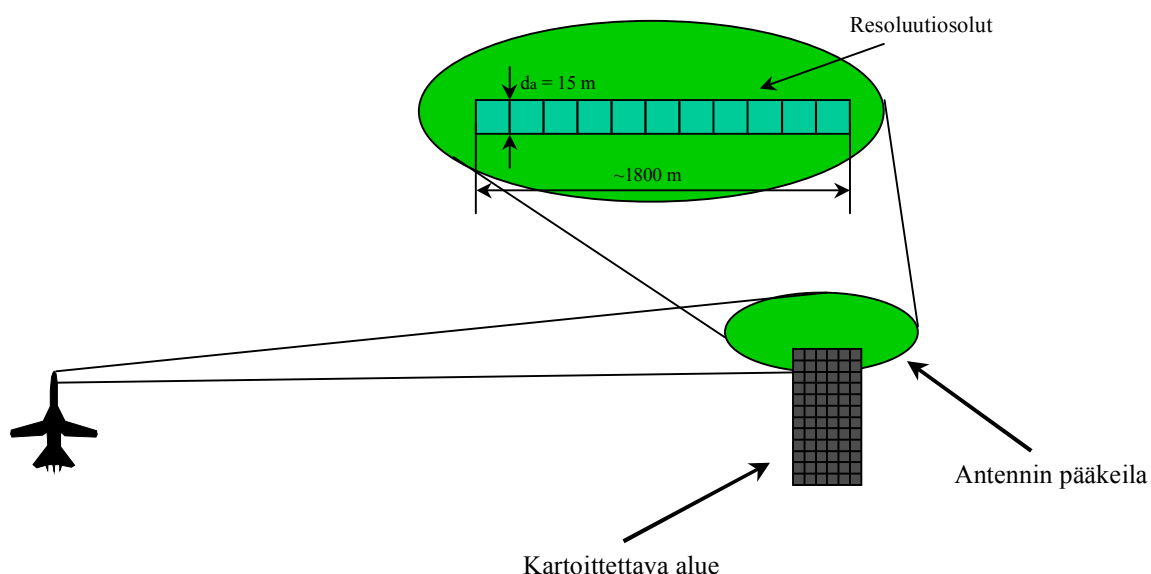
Esimerkiksi 10 kilometrin etäisyydellä toimivan 10 GHz:n taajuudella olevan konventionaalisen maastonkartoittamiseen tarkoitettujen tutkan resoluutiosolun koko on noin 300 m käytettävissä olevaa antennia, jonka halkaisija on 1 m. Mikäli tarkkuutta haluttaisiin parantaa vaikapa 5 metriin, tulisi antennin kokoa kasvattaa 60 metriin. Käytännössä tämä ei ole

mahdollista, joten kyseeseen tulee ainoastaan synteettisesti muodostettu antenniryhmä, joka koostuu useasta lähetyks- ja vastaanottopisteestä, jolloin virtuaalisen antennin pituudeksi tarvitaan 30 metriä, jotta 5 metrin resoluutiotarkkuus saavutetaan.



Kuva 163: SAR-tutka voidaan asentaa myös lentokoneeseen ripustettavaan säiliöön.
[J. Kosola]

Maastonkartoituksessa lentokone lentää suoraa linjaa vakioidulla nopeudella ja korkeudella. Koneeseen asennettu antenni on suunnattu hieman alaspäin osoittamaan maata kohtisuoraan lentosuuntaa vasten.

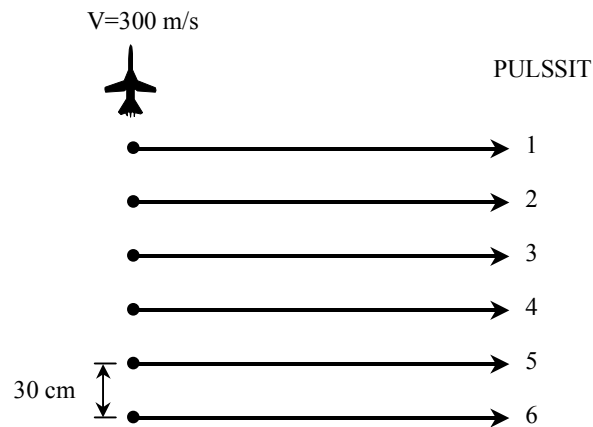


Kuva 164: Esimerkki 15 kilometrin etäisyydellä toimivasta SAR-tutkasta, jonka vaadittu resoluutiotarkkuus on n. 15 m ja hetkellisesti valaistavan kaistan pituus on n. 1800 m.

Oletetaan, että tiedusteltavaa aluetta kartoittavan lentokoneen nopeus on 300 m/s ja tutkan käyttämä pulssintoistotaajuus on 1000 Hz, taajuus on 10 GHz, pulssinpituus 100 ns ja tiedusteluetaisyys 15 km. Tällöin jokaisen lähetettävän pulssin välillä lentokone etenee 30 cm matkan, jonka vuoksi SAR-tutkan antennin voidaan käsittää koostuvan 15 m pitkstä virtuaalisesta antenniryhmästä, jossa on 50 elementtiä. Toisin sanoen 50 lähetetyn pulssin kaiut summataan yhteen yhden resoluutiosolun muodostamiseksi.

Virtuaalisen SAR-antennin ensimmäinen elementti vastaanottaa kaiun ensimmäisestä pulssista ja toinen seuraavasta jne. Tulos on aivan sama verrattaessa vastaavan pituista reaalista antenniryhmää virtuaaliseen. Jos mittausetaisyys on riittävän pitkä verrattuna antenniryhmän pituuteen, kartoitettavan maa-alueen kohtisuora etäisyys antenniryhmään on periaatteessa sama. Tällöin kaikkien virtuaalisten elementtien vastaanottaman kaiun vaihe on sama ja

vastaanotettavat pulssit voidaan integroida. Mikäli kartoitettava alue ei ole kohtisuorassa koko virtuaalisen antenniryhmän muodostamisen ajan, syntyy vastaanotettaviin pulsseihin vaihe-eroa. Integroitaessa pulsseja vastakkaisvaiheiset kaiut nollaavat toisensa.



Kuva 165: Lentokoneen lentäessä 300 m/s nopeudella ja tutkan lähettäessä 1000 Hz pulssintoistotaajuudella muodostuu virtuaalisen antennin elementtien välimatkaksi 30 cm.

Kaikkien 50 elementin vastaanottamien kaikujen integroinnin jälkeen muodostuu jokaisesta resoluutiosolusta lopputulos, joka vastaa yhdellä ison reaali-antennin mittauksella saavutettua tulosta. Integroinnin jälkeen jokaisen resoluutiosolun sisältö siirretään sijaintiaan vastaavaan muistipaikkaan varsinaisen tutkakuvan muodostamista varten.

Kohdennettu (fokusoitu) tekniikka

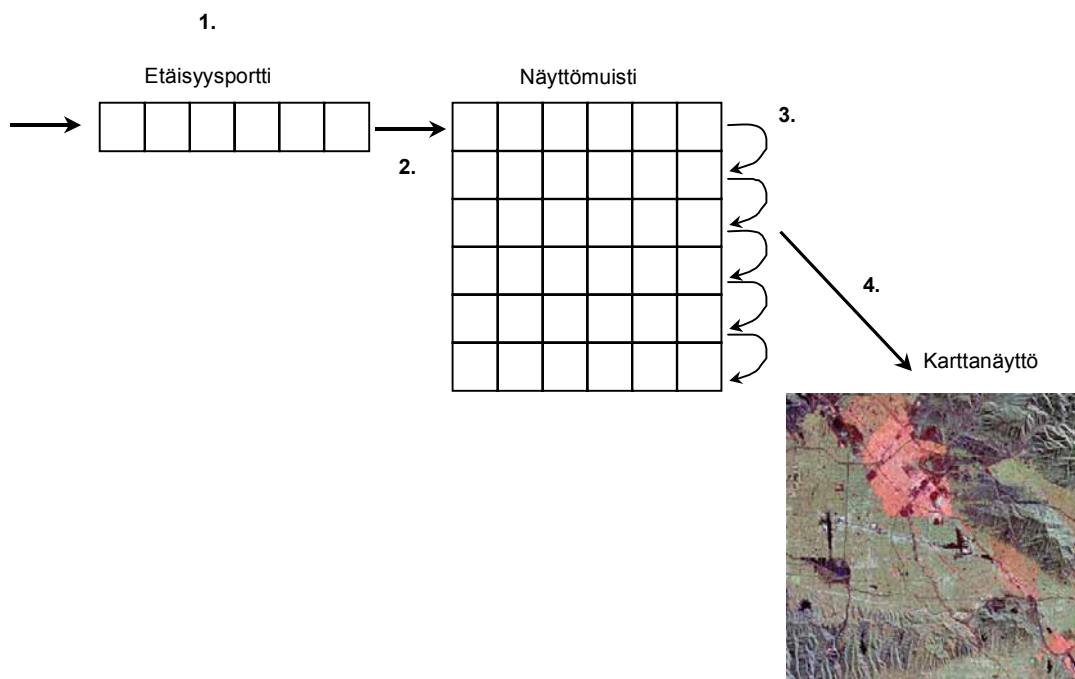
Edellä kuvailtu SAR perustui kohdentamattomaan antenniryhmään (unfocused array). Kyseisen tekniikan ongelmana on se, että antenniryhmän pituuden tulee olla riittävän lyhyt verrattuna kartoitettavan alueen leveyteen. Mikäli antenniryhmä on liian pitkä, syntyy ryhmän päissä olevien elementtien vastaanottamiin pulsseihin vaihe-eroa, mikä aiheuttaa niiden summauksessa merkittävää virhettä. Tämän vuoksi on kokeellisesti osoitettu, että parhaimman resoluution antaa virtuaalinen antenniryhmä, jonka pituus on:

Tällöin parhaaksi atsimuuttiresoluutioksi d_{amin} saadaan 40 % antenniryhmän pituudesta, joka on sovitettu haluttuun tiedusteluetaisyysasteeseen.

$$d_{amin} = 0.4 \cdot L_{eff}$$

Mikäli optimoitua tiedusteluetaisyysasteita pidennetään, on synteettisesti muodostetun antennin keulanleveyttä kavennettava ja antennikantaa siten levennettävä. Kuvassa 167 tarkastellaan kohdentamattoman SAR-tutkan resoluutiota ja antenniryhmän maksimipituutta tiedusteluetaisyysasteen suhteessa.

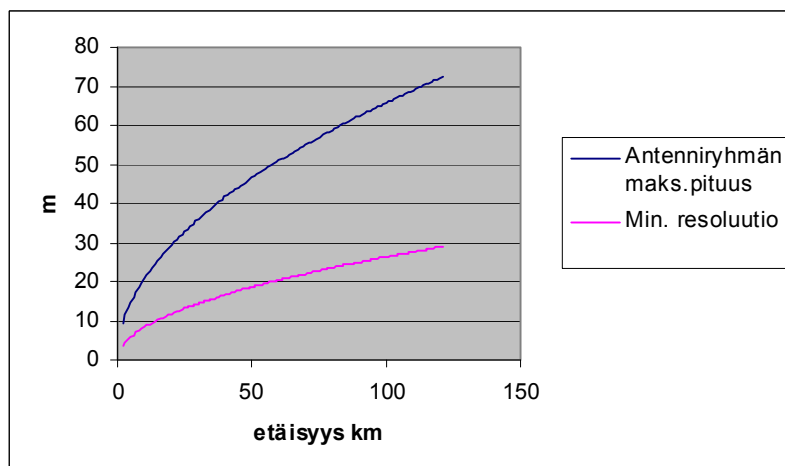
$$L_{eff} = 1.2 \cdot \sqrt{\lambda \cdot R}$$



Kuva 166: 1. Resoluutiosolujen sisältö integroidaan. 2. Kaikkien antenniryhmän elementtien vastaanotettujen pulssien integroinnin jälkeen kaiut summataan ja siirretään näyttömuistiin. 3. Jokaisen integrointikierron jälkeen siirretään rivejä yhdellä alaspäin uuden rivin muodostamiseen vaadittavan tilan aikaansaamiseksi.

Jos matkaeroista johtuvat vaihe-erot korjataan laskennallisesti, antenniryhmän pituus voi periaatteessa olla kuinka pitkä tahansa. Periaatteellisesti tällä tekniikalla saavutetaan sama resoluutio milta tahansa mittausetäisyydeltä. Kohdennetun antenniryhmän tekniikassa tulee huomioida ainoastaan ryhmän keskimmäisen antennin etäisyys vastaanottavasta elementistä. Vaihe-ero P_{cor} voidaan laskea kaavalla, jossa d_n on vastaanottavan elementin etäisyys keskimmäisestä.

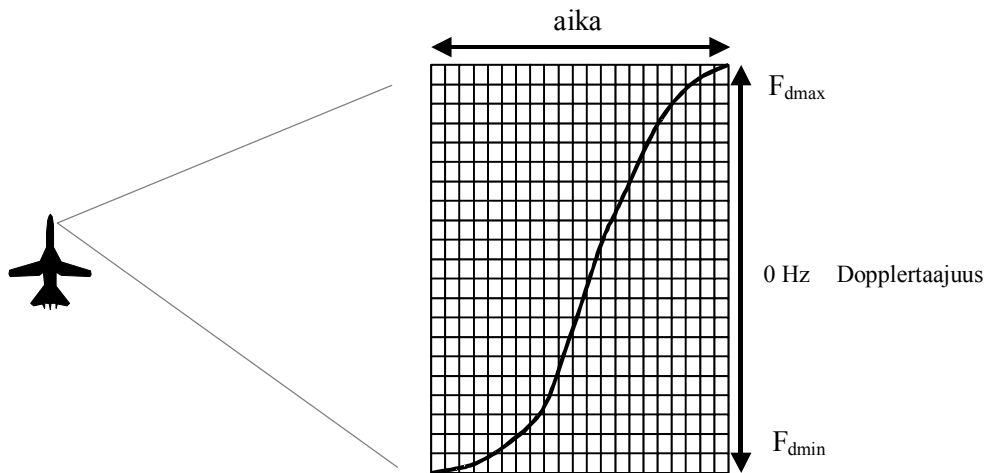
$$P_{\text{cor}} = \frac{-2 \cdot \pi}{\lambda \cdot R} \cdot d_n^2$$



Kuva 167: 10 GHz:n taajuudella toimivan SAR-tutkan antenniryhmän maksimipituus ja minimiresoluutio etäisyyden funktiona.

Jotta kohdennettu SAR-moodi olisi helpompi ymmärtää, yksinkertaistetaan mallia ja asetetaan oletuksia antenniryhmän pituuden, pulssintoistotaajuuden sekä tiedusteluetaisyyden kombinaatiolle niin, että poikittaisresoluutio on sama kuin antenniryhmien elementtien välimatka. Tällöin kuvan muodostavaan taulukkoon tulee varata yhtä monta riviä kuin antenniryhmässä on elementtejä.

Tällä hetkellä kaikkein yleisin SAR-tekniikka on dopplerkohdennettu. Dopplerkohdennukseen perustuvassa SAR-moodissa tutka integroi rinnakkaisesti useita kaistoja, jotka erotetaan toisistaan dopplerrivisuodattimilla. Tämän vuoksi laskentakapasiteettia ei tarvita läheskään niin paljon kuin perinteisessä kohdentamattomassa tai kohdennetussa moodissa. Menetelmä perustuu siihen, että takaisin heijastuvan pulssin dopplersiirtymä riippuu pulssin tulokulmasta.



Kuva 168: Dopplerkohdennettu SAR-tutka muodostaa resoluutiosolun paikan vaakatasossa ajan perusteella ja pystytasossa dopplertaajuuden perusteella.

Kohdennetun SAR-tutkan poikittaisresoluutio on

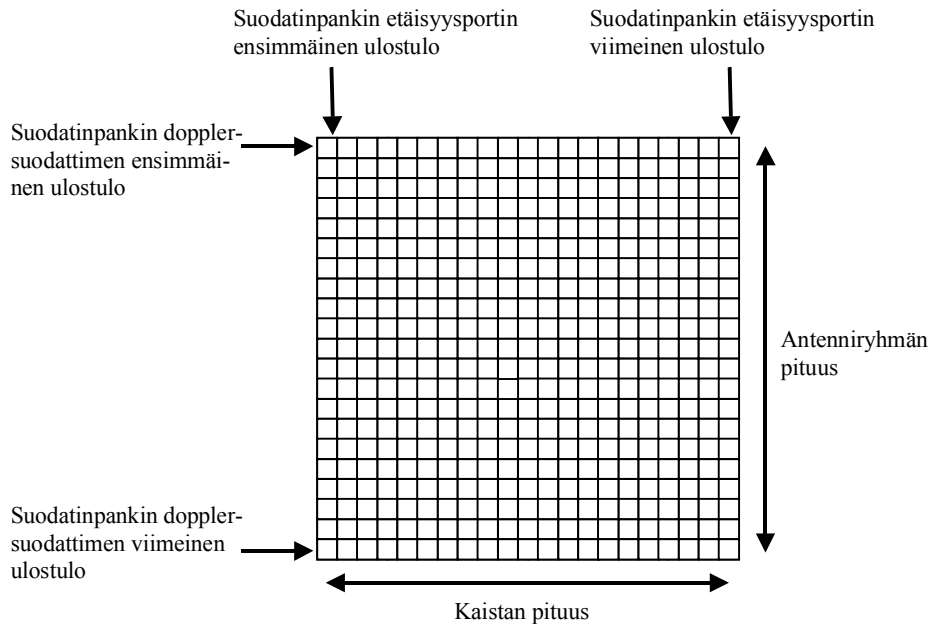
$$d_{\text{amin}} = \frac{D}{2}$$

jossa D on reaali antennin halkaisija.

Edestä päin palaavan pulssin dopplertaajuus on positiivinen. Mitä sivumpaa pulssi heijastuu takaisin sitä pienemmäksi dopplertaajuus muodostuu, kunnes pulssi heijastuu kohtisuoraan koneen lentosuuntaan nähden. Tällöin kaiun dopplertaajuus on nolla, jonka jälkeen se muuttuu negatiiviseksi. Tutkan keilanleveyden merkitys kasvaa toimittaessa dopplerkohdennetussa moodissa. Mikäli tutkan keilanleveys on liian kapea, ei riittävää dopplersiirtymää synny ja ollaan lähes samassa tilanteessa kohdentamattoman tekniikan kanssa.

Dopplerkohdennettu SAR-tutka käyttää kohdennetusta moodista tuttua vaihekorjausta, sillä leveällä keilalla vastaanotetut rivit ovat korkeaan toimintataajuuteen verrattuna hyvinkin eripituisia, mikä synnyttää vaihe-eroa, joka on kompensoitava ennen integroimista ja itse kuvan muodostusta. Eli dopplerkohdennettu tekniikka käyttää synteettisesti muodostettua antenniryhmää, jonka pituus- ja vaakaresoluutiovaatimus vaikuttaa dopplersuodattimien lukumää-

rään. Taajuuksien suodattaminen voidaan toteuttaa FFT:n avulla, jonka vuoksi muutoin analogisesti tapahtuva laskentaprosessi vähentyy merkittävästi.



Kuva 169: Suodatinpankin jokainen ulostulo edustaa yhtä etäisyys- ja kulmasolun vastaanotettua kaikua.

Dopplertarkennuksessa vaihe-eron huomioinen tulee tehdä kahdessa kohdassa: (1) kohdentamisessa sekä (2) dopplersuodatuksessa. Tällöin vaadittavien laskentakertojen määrä yhden antenniryhmän kuvan muodostamiseen pulssien integrointiin on $N+0.5N \log_2 N$. Kun taas niin kutsutun line by line eli kohdennetun moodin laskentakertojen tarve lähetettyjen pulssien sekä etäisyysporttien suhteessa on N^2 .

Moodi	Laskentamäärä
Kohdennettu	N^2
Dopplertarkennus	$N(1+0.5 \log_2 N)$

Laskentaprosessin vähenemistä voidaan demonstroida helposti esimerkin avulla. Oletetaan, että käytössä on 1024 elementin synteettinen antenniryhmä. Tällöin kohdennetussa tai kohdentamattomassa moodissa tapahtuva käsittely vaatii 1048576 solun laskentaa. Rinnakkaisessa laskennassa tarvitaan ainoastaan 6144, joten laskentaprosessia voidaan pienentää dopplertarkennuksen avulla 170-kertaisesti, joka on dopplerkohdennetun SAR-tutkan suurin etu muihin SAR-tekniikoihin verrattuna. Dopplerkohdennetun tutkan ongelmana on kartoitettavalla alueella liikkuvat kohteet, koska niiden liikkeestä aiheutuva dopplertaajuus vääristää muodostettavaa kuvaa.

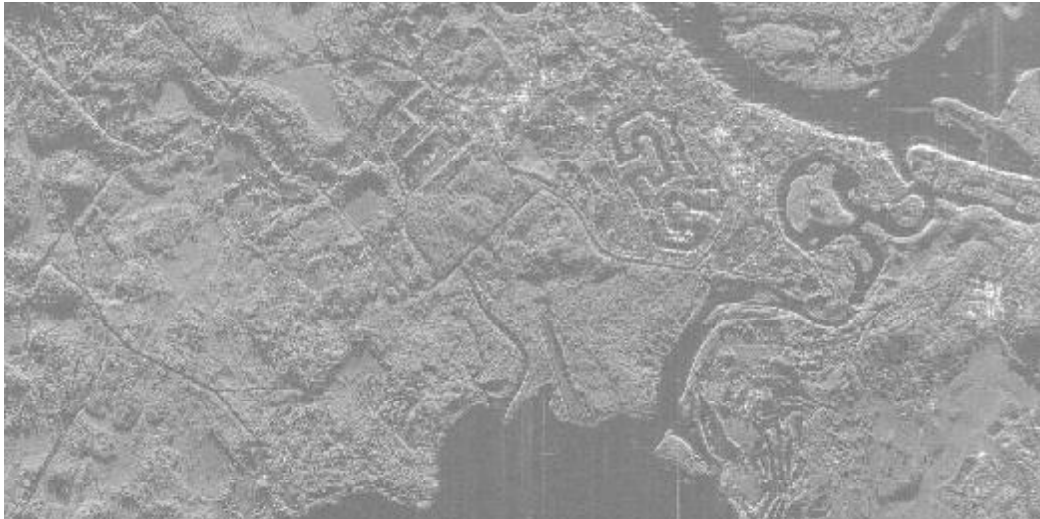
Kohdennetulla SAR-tutkalla saavutetaan paras resoluutio. Tekniikkaa vaatii kuitenkin suurta laskentakapasiteettia, joka määrittää suurimmaksi osaksi tutkan hinnan. Kohdentamattoman SAR-tutkan resoluutio on heikompi kuin kohdennetun, millä ei välttämättä ole merkitystä lyhyillä (alle 3000 m) etäisyyksillä. Tällöin sen huomattavasti halvempi hinta voi tukea sen valintaa. Lyhyillä etäisyyksillä kohteen luokittelu ja tunnistus onnistuvat lähes yhtä hyvin molemmilla tekniikoilla; ainoastaan hinnassa on merkittävä ero.



Kuva 170: Amerikkalainen Joint STARS-tutkavalvontakone tuottaa tietoa liikkuvista ja paikallaan olevista maaleista tiedustelu, operatiivisen johtamisen ja maalinsoituksen tarpeisiin. Nokan alapuolella näkyy selvästi 12 metrin radomi, joka suojaa 7,5 metrin pituista vaiheohjattua tutkan antennia. Antennikeila on SAR-moodissa 120 astetta. Tutkan kantamaksi valmistaja ilmoittaa 250 km. [USAF]

VHF-alueen kasvillisuutta läpäisevät SAR-tutkat

SAR-tutkassa voidaan käyttää aallonpituuteen nähden pieniä antennia, koska tarkennus tehdään prosessoimalla, eli luomalla virtuaalinen suurikokoinen apertuuri. Yleensä tätä ominaisuutta käytetään resoluution parantamiseksi, mutta sitä voidaan käyttää myös taajuuden laskemiseen resoluution pysyessä silti riittävänä. Esimerkiksi ruotsalaisen Carabas II SAR:n resoluutio on VHF-taajuuksilla 2 x 1 metrin luokkaa. CARABAS-II on hyvin laajakaistainen vaakapolarisoitu SAR-tutka, joka toimii taajuusalueella 20-90 MHz. Käyttämällä matalia taajuuksia voidaan läpäistä sekä luontaista että kohteen suojaksi viritettyä kasvillisuutta, minkä vuoksi tällaisista tutkista käytetään myös nimitystä FPEN-tutka (Foliage Penetration). Matalimmat taajuudet läpäisevät myös maaperää (GPEN, Ground Penetration), minkä vuoksi lentokoneeseen tai satelliittiin sijoitetulla matalataajuisella SAR:lla voidaan suorittaa myös maaperätutkimuksia VHF-alueella toimivan SAR:n yhdeksi keskeisimmäksi ongelmaksi muodostuu häiriöllinen RF-ympäristö. Suuren häiriötason vuoksi kukin 100 ms pituinen pulssi lähetetään omalla taajuudella ja koodataan lineaarisella tai epälineaarilla taajuuspyyhkäisyllä kattamaan vastaanottimen koko välitaajuuskaista (korkeintaan muutama MHz). Pulssien välillä radiotaajuus hypytetään siten, että yksittäisten pulssien taajuusalueet kattavat lopulta koko halutun taajuusalueen.



Kuva 171: Global Hawkin laaja-alueetsintämoodissa ottamaa SAR-kuvaa. [Australian Army]

Käänteinen SAR - ISAR

SAR-tutkan toiminta perustuu siihen, että tutka liikkuu muodostaen maalista useita kaikuja ja summaa nämä yhteen. Tutkan on liikuttava, jotta se kykenee kohdentamaan kaikuenergian oikeisiin resoluutiosoluihin kaiun tuloajan ja tutkalavetin liikkeen myötä syntyvän dopplertaajuuden erojen perusteella. ISAR- (Inverse SAR) tekniikassa puolestaan hyödynnetään maalin luontaista liikettä: kohde liikkuu ja tutka voi jopa olla paikallaan. Maalin luontainen liike syntyy pyörimis- tai keinumisliikkeestä. Eri etäisyyksillä pyörimis- tai keinumisakselista olevien sironta-alkioiden aikaansaaman kaikupulssin dopplersiirtymä on erisuuruinen. Tämä mahdollistaa maalin eri pisteiden erottelun toisistaan. ISAR-tekniikalla maaleista kyetään muodostamaan karkea kuva. Menetelmää käytetään erityisesti laivojen karkeassa tunnistamisessa, sillä aluksen keinunta luo hyvät edellytykset ISAR-tekniikan hyödyntämiselle.



Kuva 172: Vasemmalla SAR-tutkan GMTI-moodissa (Ground Moving Target Indicator) havaitsemia liikkuvia maaleja yhdistettynä tieverkon malliin. Oikealla tieverkko ja dopplertaajuuden avulla havaitut liikkuvat maalit esitettynä tavallisen SAR-kuvan päällä. [USAF ja Northrop Grumman]

SAR: häirintä

SAR-tutkan häirintä on mahdollista vain silloin kun häirintälähetin on tutkan reaali-antennin keilassa. Tutkavalvontakoneen liikkeessa kuvausalueen suuntaisesti häirintälähetin näkyy aluksi tutkan antennin sivukeiloissa kadotakseen aina välillä reaali-antennin nollakohdissa ja ilmestyy lopulta reaali-antennin pääkeilaan, missä sen vaikutus on suurin. Häirintälähetteen tehotaso muodostaa siten SAR-vastaanottimessa reaali-antennin säteilykuvion mukaisesti aaltoilevan häiriökuvion kuvan 173 mukaisesti.

Häirintälähetimen etäisyys SAR:sta (along range) voidaan päätellä siitä, kuinka leveällä kaistaleella se vaikuttaa: Reaali-antennin valaiseman alueen leveys lentosuunnassa saadaan kaavasta $L=R\cdot\theta_B$, missä R on etäisyys tutkasta ja θ_B tutka-antennin keilanleveys, joten häirintälähetin löytyy etäisyydeltä $R=L/\theta_B$, missä L on häirintälähetteen vaikutusalueen leveys koneen lentosuunnassa. Koneen lentosuunnassa (cross range) häirintälähetin voidaan paikallistaa symmetrisen häirintäkuvion keskilinjalle. Näin häiritystä SAR-kuvasta voidaan päätellä häirintälähetimen sijainti. Tämä ei kuitenkaan sinänsä mahdollista häirinnän poistamista. Jos SAR-antennina käytetään vaiheohjattua antenniryhmää, voidaan jo lennon aikana suunnata nollakohta kohti häirintälähetintä, jolloin häiriösignaalia ei lasketa mukaan kuvanmuodostuksessa. Tämä edellyttää kuitenkin häirintälähetimen seuraamista esimerkiksi tutkan läpikatsomismoodilla (look through), jossa tutka pulssien lähettämisen ja vastaanottamisen välillä säännöllisesti tarkkailee passiivisesti eri kulmista vastaanottamaansa energiaa.

SAR:n vastaanottama häirintälähetteen teho saadaan kaavasta:

$$J = \text{EIRP}_j \cdot G_r \cdot \left(\frac{\lambda}{4 \cdot \pi \cdot R_j} \right)^2$$

jossa EIRP_j on häirintälähetimen isotrooppinen teho SAR-koneen suuntaan, G_r SAR:n reaali-antennin antennivahvistus ja R_j häirintälähetimen etäisyys tutkasta. Tavallinen pulssimuotoinen häirintäsignaali ei kompressoitu, vaan sen ainoana vaikutuksena on keskimääräisen kohinatason nostaminen. Siten vain keskimääräisellä lähetysteholla on merkitystä SAR:n häirittävyteen²⁰.

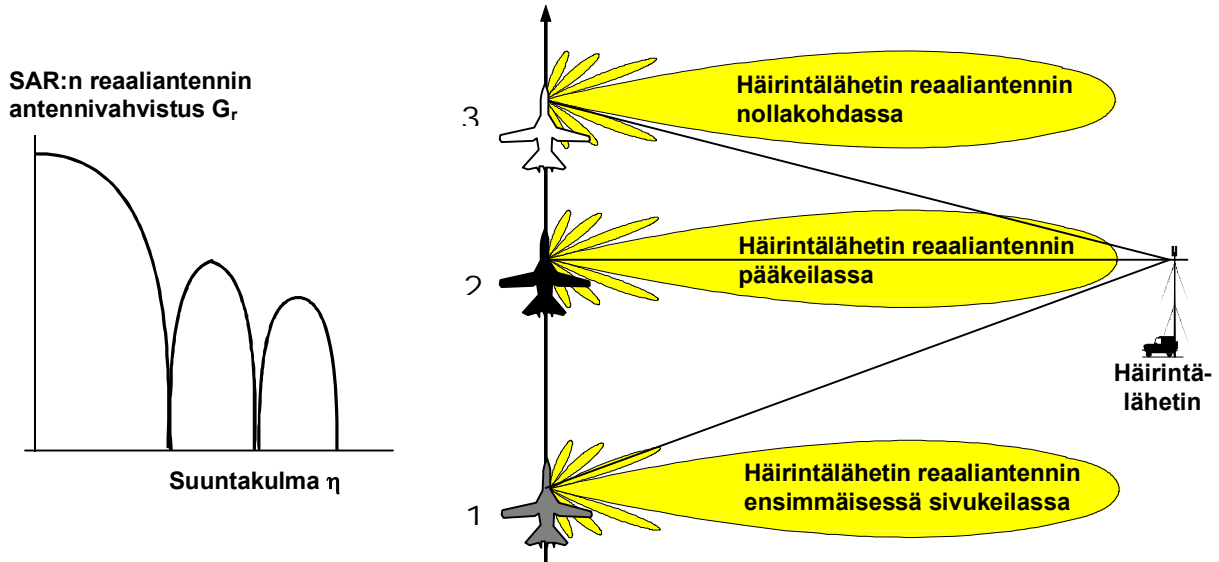
SAR perustuu vastaanotetun signaalin luokitteluun signaalin tuloajan ja dopplersiirtymän sekä pulssissa käytettävän taajuuskompression perusteella. Lisäksi tutka integroi useita samaan resoluutiosoluun luokittelemiaan pulsseja, jolloin satunnaisen kohinan vaikutus summautuu huomattavasti huonommin kuin koherentin hyötysignaalin.

Kohinahäirintäsignaali ei kompressoitu luokitteluprosessissa, joten kohinasignaalin vaikutus leviää kaikkiin resoluutiosoluihin, mutta tutka kykenee kohdistamaan vastaanottamansa signaalienergian pulssi pulssilta juuri oikeisiin soluihin. Häirintälähetimen on kyettävä voittamaan SAR:n prosessointivahvistus, joka saadaan kaavasta:

$$G_{P,SAR} = \frac{L_{ar}}{\delta_{ar}} \cdot \frac{L_{cr}}{\delta_{cr}} \cdot nE_i$$

²⁰ Walter W. Goj: *Synthetic Aperture Radar and Electronic Warfare*. ISBN 0-89006-556-7. Artech House 1993: 35

jossa L_{ar} ja L_{cr} ovat kerrallaan valaistavan ja laskettavan alueen mitat kohtisuoraan lavettiin nähden (ar, along range) ja lavetin suuntaisesti (cr, cross range) ja δ_{ar} ja δ_{cr} vastaavat pituus- ja poikittaisresoluutiot sekä n_{Ei} pulssien integroinnista saatava vahvistus.



Kuva 173: Häirintälähteen vaikutus synteettisen apertuurin tutkaan. Kohdassa 1 häirintälähetin näkyy SAR:n reaaliantennin ensimmäisessä sivukeilassa, minkä jälkeen häirintälähetite häviää koneen lentäessä eteenpäin ja häirintälähteen joutuessa pääkeilan ja ensimmäisen sivukeilan väliseen nollakohtaan. Kohdassa 2 häirintälähetin on pääkeilassa, jolloin sen häiritsevä vaikutus on suurimmillaan. Koneen lentäessä eteenpäin häirintälähetin joutuu taas reaaliantennin nollakohtaan (3).

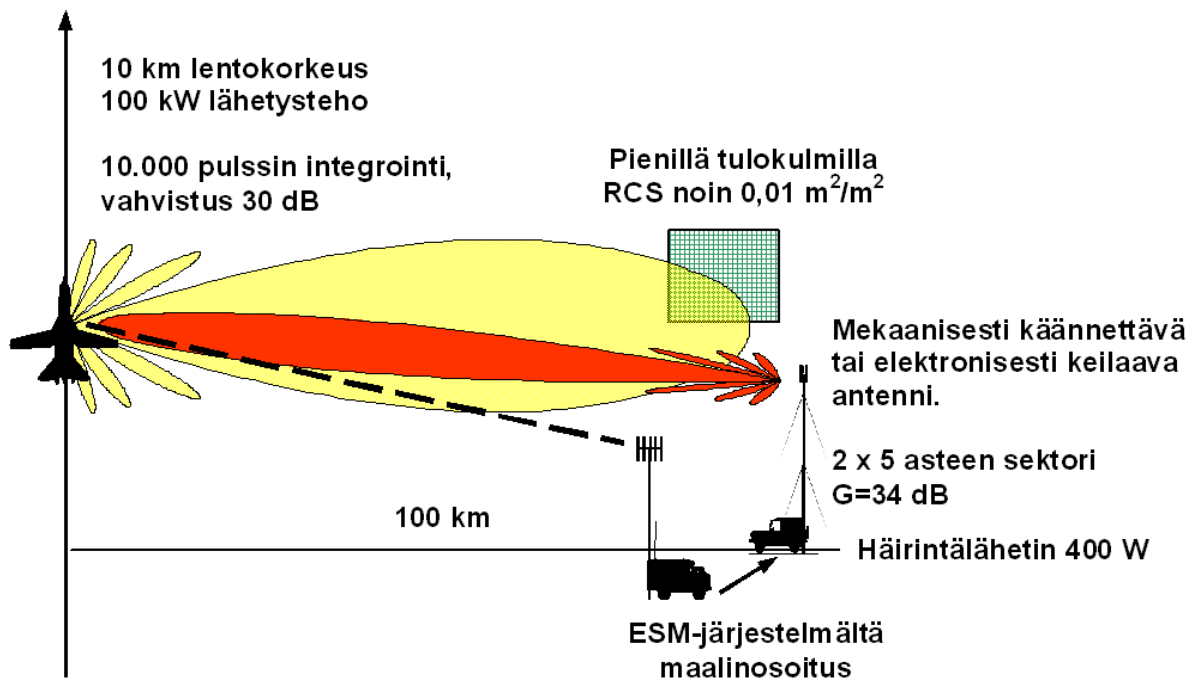
Mikäli tutka muodostaa kuvaa 10 x 2 km alueelta 1 metrin resoluutiolla ja integroi yhteen kuvaelementtiin vaikkapa 10 000 pulssia, saadaan integrointivahvistukseksi

$$G_{P.SAR} = \frac{10\,000}{1} \cdot \frac{2\,000}{1} \cdot 1,25 \cdot 10\,000^{0,75} = 2,5 \cdot 10^{10}$$

eli noin 104 dB! Toisaalta tutkalähteen kohtaama etenemisvaimennus on verrannollinen etäisyyden neljanteen potenssiin sen kulkiessa ensin tutkattavalle kohteelle, ja sitten takaisin, kun taas häirintälähetite kulkee vain yhteen suuntaan ja siten sen vaimennus riippuu etäisyyden neliöstä.

Toinen ja huomattavasti yksinkertaisempi tapa laskea häirintälähtimeltä vaadittu teho perustuu siihen, että häirintälähteen tehon pinta-alayksikköä kohti on vastattava tai ainakin oltava lähellä SAR:n koko kuvaamaltaan alueelta keskimäärin saamaa maalikaikua pinta-alayksikköä kohti – SAR:n pulssi-integrointivahvistus mukaan lukien. Jos siis 100 kW SAR-tutka valaisee 10 x 2 km aluetta, jonka tutkapoikkipinta-ala SAR:n erittäin pienillä tulokulmilla on luokkaa 0,01 m²/m², niin takaisin SAR:iin koko maalialueelta siroava teho on luokkaa 1 kW. Häirintälähtimen on voitettava tämä ja SAR:n integrointivahvistus 30 dB, joten häirintälähteen EIRP:n on oltava luokkaa 1 MW. Tämän saavuttaminen ei ole mahdotonta, mutta hankalaa kuitenkin. Tarkastellaan esimerkkiä, jossa halutaan suojautua lähimmillään 100 km päästä tutkaavalla SAR-tiedustelukoneelta, jonka lentokorkeus voi vaihdella lähes pinnasta 10 kilometriin, ja jota kyetään seuraamaan elektronisen tiedustelun

keinoin kahden asteen tarkkuudella. Tällöin SAR-häirintälähtetimen antennikeilan on oltava luokkaa 2×5 astetta, jolloin antennivahvistus olisi noin 34 dB. Tällöin häirintälähteeltä vaadittava teho olisi $60 \text{ dBW} - 34 \text{ dB} = 26 \text{ dBW}$, eli 400 W.



Kuva 174: SAR:n häirintä edellyttää maalinosoitusta joko erilliseltä ESM-järjestelmästä, yleisestä tilannekuvasta tai häirintälavetin omalta läpikatsovalta ESM-sensorilta.

Harhamaalin luominen SAR-kuvaan edellyttää sitä, että häirintäsignaali saadaan kompressoitumaan SAR-prosessoinnissa tiettyihin resoluutiosoluihin. Tällöin häirintäsignaalilla olisi oltava pulssi pulssilta oikea lähetysaika ja SAR-lavetin liikeradan mukaan säädetty dopplersiirtymä sekä oikeat pulssinsisäiset parametrit, kuten taajuus, kaistanleveys, pulssinpituus ja pulssikompressio. Mikäli toistolähtetimen taajuus, pulssinpituus, kaistanleveys ja pulssin taajuusmodulaation lineaarisuus vastaavat SAR-lähtetimen ominaisuuksia, harhautuspulssi kompressoituu etäisyysdimensiossa. Tällöin SAR-kuvaan muodostuu kirkas viiva, sillä harhalähteestä puuttuu oikean maalikaiun doppleroiminaisuudet. Jos lisäksi toistolähtetimen vaihetta säädetään älykkäästi, saadaan harhamaali kompressoitumaan myös lavetin lentosuunnassa. Tällöin viivan sijasta SAR-kuvaan muodostuu piste. SAR:n harhauttaminen on siis mahdollista, mutta vaatii huomattavasti laskenta- ja muistikapasiteettia sekä tutkaavan lavetin liikeradan seuranta. Laajaan sektoriin kohdistettava häirintä vaatii olennaisesti suuremman tehon: esimerkiksi 15 asteen sektorin kattaminen edellyttäisi 1,2 kW jatkuva-toimista häirintälähtetintä.

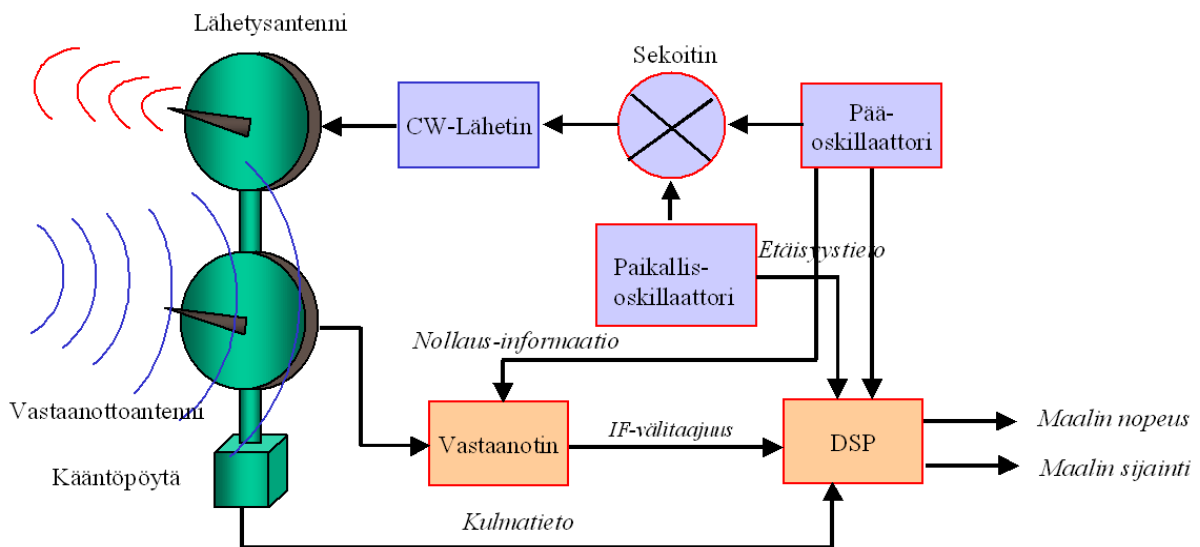
Toinen tapa harhauttaa SAR-tutkaa on pienentää tutkan saamaa signaali-kohina- (SJNR, signal-to-jamming+noise ratio) ja signaali-välkesuhdetta (SCR, signal-to-clutter ratio) kohinahäirinnällä ja sijoittaa maastoon harhamaaleja, joita tutka ei kykene erottamaan todellisista maaleista. Mikäli todellisten maalien heijastus- ja sirontaominaisuudet ovat jo valmiiksi lähellä taustaa, voidaan SAR-kuvaus estää huomattavasti pienemmällä teholla ja vähäisemmällä häirintälähtetimillä.

CW-tutka

CW-tutkaa (Continuous wave), eli jatkuvan lähetteen tutkaa, käytetään kaikissa taistelukentällä olevissa tutkasovelluksissa. Suurimmaksi osaksi se on saavuttanut sijaa matalalla lentävien ilmamaalien etsintä- ja seurantasovelluksissa. CW-tutka toimii nimensä mukaisesti jatkuvalla lähetteellä. Etäisyys maaliin määritellään moduloimalla lähetettä esimerkiksi lineaarisella taajuuspyyhkäisyllä tai vaihekodeauksella. CW-tutkan käyttöä rajoittaa erillisten lähetys- vastaanottoantennien tarve, jotka vaativat melkoisesti tilaa varsinkin matalimmilla taajuuksilla, kuten S- ja C-kaistoilla.

Jatkuvan lähetteen vuoksi tutka ottaa signaalia vastaan samaan aikaan kun se sitä itse lähettää. Tämän vuoksi lähete saattaa kytkeytyä vastaanottimeen, mikä häiritsee heikon kaikupulssin vastaanottoa. Lähetysignaalin vuoto vastaanottimelle pyritään kompensoimaan syöttämällä vastaanottimeen vastakkaisvaiheista signaalia.

Pulssi- ja CW-tutkien keskeinen ero on etäisyyden määrittelytekniikassa. Pulssitutkassa etäisyysinformaatio saadaan lähetetyn ja vastaanotetun pulssin välisen aikaeron vertailulla. CW-tutkassa etäisyyssiio saadaan vertaamalla signaaliin moduloidun lähetetyn ja vastaanotetun koodin tuloaikaa ja määrittämällä etäisyys aikaeron perusteella. Koodina voidaan käyttää erilaisia lähetteeseen moduloituja signaaleita. Yksi menetelmä on käyttää taajuusmodulaatiota (FM, Frequency Modulation).



Kuva 175: CW-tutkan periaatteellinen lohkokaavio

FM-CW-tutkassa tutkan lähetystaajuutta nostetaan ja lasketaan kuvan 176 osoittamalla tavalla. Lähetettä f_t nostetaan ja lasketaan taajuuden D_f verran jaksolla, jonka pituus on $1/f_m$, jolloin modulointitaajuus on f_m . Lähete heijastuu tai siroaa maalista ja palaa viipeellä takaisin tutkaan. Tämä viive johtaa siihen, että tutkan tietyllä hetkellä vastaanottaman signaalin taajuus eroaa sen sillä hetkellä lähettämästä taajuudesta. Tämän taajuuseron perusteella voidaan määrittellä maalin etäisyys tutkasta. Se saadaan kaavasta:

$$f_b = \frac{4 \cdot D_f \cdot f_m \cdot R}{c}$$

missä R on maalin etäisyys, c valon nopeus, jolla tutkasignaali etenee ja f_b on signaalin etenemisviipeestä johtuva taajuusero. Maalin liike tutkaan nähden saa aikaan maalikaiun dopplersiirtymän:

$$f_d = 2 \cdot \frac{V_r}{\lambda}$$

missä V_r on maalin radiaali-nopeus tutkaan nähden ja λ on tutkan käyttämä aallonpituus. Jotta tutka ei voi mitenkään tietää aiheutuuko kaiun taajuusero maalin etäisyydestä vaiko liikkeestä. Tämän vuoksi tutkan lähetettä moduloidaan kahteen suuntaan: ylöspäin suuntautuvassa taajuuspyyhkäisyssä vastaanotettu taajuus f_{b_up} ja alaspäin suuntautuvassa pyyhkäisyssä taajuus f_{b_down} saadaan kaavoista:

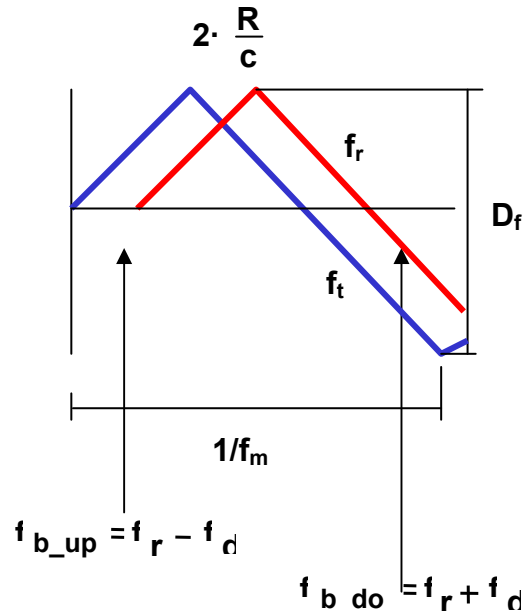
$$f_{b_up} = f_r - f_d \quad f_{b_down} = f_r + f_d$$

Näiden kahden yhtälön avulla voidaan ratkaista maalin etäisyys kaavalla:

$$R = c \cdot \frac{f_r}{4 \cdot D_f \cdot f_m}$$

CW-tutka erityisen soveltuu hyvin matalalla lentävien maalien havaitsemiseen, sillä sen jatkuva lähetys mahdollistaa erittäin stabiilien oskillaattoreiden käytön, jolloin maavälke voidaan helposti prosessoida. Jatkuvan lähetyksen käyttämisessä on myös muita elektronisella taistelukentällä tarvittavia elintärkeitä etuja. Pitkä lähete mahdollistaa pienen keskimääräisen tehotason, joka tuo suojaa elektronista tiedustelua vastaan. Mikäli CW-tutka käyttää laajakaistaista lähetystä, puhutaan yleisesti kuiskaavista tutkista tai LPI-tutkista. Tällainen tutka voidaan suunnitella niin, ettei maali kykene havaitsemaan sitä ennen kuin se havaitsee maalin, mutta tällöin tutkan kantama joudutaan rajaamaan hyvin lyhyeksi.

CW-tutkan stabiili ja tarkka lähetystaajuus mahdollistaa erinomaisen dopplersiirtymän tarkkailun jota voidaan käyttää havaitun kohteen tunnistamisessa. Tällöin kohteen liikkeestä aiheutuva dopplertaajuus siirretään nolletaajuudelle ja maali tunnistetaan kohteen liikkuvien



Kuva 176: FM-CW-tutkan etäisyydenmittausperiaate.

osien, kuten helikopterin roottorin tai hävittäjän suihkurturbiinin siipien synnyttämien dopplersiirtymien avulla. Tekniikkaa voidaan käyttää myös pulssitutkissa, mutta niissä nopeiden pulssien aiheuttamat rajoitukset dopplerresoluutiolle heikentävät tekniikan soveltuvuutta.

Edellä mainittiin CW-tutkan havaitsemisen olevan vaikeata pienen lähetystehon vuoksi. Myös sen häiritseminen on vaikeata jatkuvasti tapahtuvan koherentin integroinnin vuoksi. CW-tutkan toistohäirintä on periaatteessa turhaa sillä käytettävän koodin pituus voidaan muodostaa valesatunnaisesti, jolloin pieni katkos lähetyksessä mahdollistaa häirintäjärjestelmän paikantamisen. CW-tutkan heikkoutena on jatkuva lähete, jonka mukaan tutka on helppo luokitella ja tunnistaa, mikäli se havaitaan. Käytön esteenä ovat usein myös antennien suuri koko ja lukumäärä, monimutkainen rakenne, pulssitutkia lyhyempi kantama ja vaikeudet toimia monimaaliympäristössä.

Maastonvalvontatutka

Maaston – tai pikemminkin taistelukentän – valvontaan käytettävien tutkien on kyettävä havaitsemaan maaleja sekä mittaamaan niiden nopeudet ja etäisyydet vaikeassa tutkavälkemympäristössä, jossa maalista saatava tutkakaiku voi olla 20 - 30 dB:ä taustasta tulevaa kaikua pienempi. Tämän johdosta maastonvalvontatutkissa käytetään yleensä pulssidopplerperiaatetta tutkavälkkeen erottamiseksi maalista. Sateen aiheuttamaa välkettä voidaan vähentää ympyräpolarisaatiolla, minkä vuoksi useissa maastonvalvontatutkissa voidaan käyttää sekä vertikaali- että ympyräpolarisaatiota.



Kuva 177: Venäläiseen tulenjohtopanssarivaunuun asennettu maasto- valvontatutka. [J. Kosola]

Maastonvalvontatutkan on oltava suhteellisen pienikokoinen, minkä vuoksi myös sen antennin koko on rajoitettu noin 50 x 50 cm luokkaan. Jotta järjestelmällä kyettäisiin havaitsemaan pieniä kohteita – esimerkiksi ihmisiä – on sen tutkakeilan oltava riittävän kapea. Pieni koko ja kapea keila edellyttävät korkean taajuuden käyttämistä, mikä puolestaan tuo mukanaan suuren etenemisvaimennuksen. Tästä ei kuitenkaan ole merkittävää haittaa, sillä maastossa maksimietäisyydet ovat joka tapauksessa lyhyitä, muutamien kilometrien luokkaa. Maastonvalvontatutkissa käytetään yleisimmin 8 – 12 GHz taajuuksia, joilla

saavutetaan toisaalta riittävän kapea keila ja siten suuri antennivahvistus sekä riittävän pieni etenemisvaimennus sateessa ja sumussa.



Kuva 178: Thalesin maastonvalvontatutka.

[J. Kosola]

Pulssin pituuden määrää pienin mittausetäisyys ja pulssintoistotaajuuden suurin yksiselitteinen mittausetäisyys yhdessä nopeuden mittaustarkkuuden kanssa. Tyypillisesti maasto- ja ilmapölytutkien pulssin pituus on mikrosekunnin luokkaa tai vähemmän, ja PRF on noin 10 kHz. Mikrosekunnin pulssi antaa pienimmäksi etäisyydeksi ja samalla etäisyysresoluutioksi 150 m. Etäisyysresoluutiota voidaan parantaa pulssikompressiolla. Pulssin pidentäminen heikentää etäisyysresoluutiota, mutta mahdollistaa pidemmän maalinvalaisun vuoksi pienemmän lähetystehon käyttämisen.

Esimerkki:

Maastonvalvontaan tarvitaan kevyt kannettava tutka, jonka tulisi havaita panssarivaunuja vähintään 150 metrin ja maksimissaan 6 km ja taistelijoita 4 km etäisyydeltä 10 metrin etäisyystarkkuudella.

Voidaan olettaa, että nopeimmat taistelukentällä liikkuvat ajoneuvot kulkevat noin 90 km/h nopeudella ja että jalan liikkuvan taistelijan liikenopeus olisi 1 m/s luokkaa. Kannettavuus rajoittaa antennin koon noin 50 x 25 cm luokkaan.

Resoluutiovaatimusten perusteella valitaan tutkan toimintataajuudeksi 15 GHz, jolla saavutetaan riittävä resoluutio ja pieni koko sekä keveys. Tällöin aallonpituus on 20 mm. Pienin toimintaetäisyys sanelee suurimman mahdollisen pulssin pituuden:

$$R_{\min} = \frac{c \cdot (\tau + t_{tr})}{2} \quad \Leftrightarrow \quad \tau \approx 2 \frac{R_{\min}}{c} \approx 1 \mu\text{s}$$

jos vastaanottimen suoja- ja kytkentäaika t_{tr} ei huomioida.

Mikrosekunnin pulssilla saadaan etäisyysresoluutio

$$\Delta R = c \cdot \frac{\tau}{2} = 150 \text{ m},$$

mikä ei ole riittävä ($\Delta R_{\text{req}} = 10 \text{ m}$). Tällöin on käytettävä pulssikompressiota.

Esimerkiksi käytettäessä taajuuspyyhkäisyä, on pyyhkäisykaistan oltava

$$f_{\text{sweep}} = \frac{c}{2 \Delta R_{\text{req}}} = 15 \text{ MHz},$$

jolla saavutetaan 10 m resoluutio. Ylärajat pulssintoistotaajuudelle saadaan suurimmasta yksiselitteisestä etäisyysmittauksesta ($R_{\max} = 6$ km):

$$\text{PRF}_{\max} = \frac{c}{2R_{\text{mu}}} = 20 \text{ kHz}, \text{ missä } R_{\text{mu}} = 1,25 \cdot R_{\max} = 1,25 \cdot 6 \text{ km} = 7,5 \text{ km}$$

Alaraja PRF:lle saadaan suurimmasta yksiselitteisestä nopeusmittauksesta ($v_{t,\max} = 25$ m/s) kaavalla:

$$\text{PRF}_{\min} = 2 \cdot f_{d,\max},$$

jossa $f_{d,\max}$ on suurin mahdollinen dopplersiirtymä, joka puolestaan saadaan kaavasta:

$$f_{d,\max} = 2 \cdot \frac{v_{t,\max}}{\lambda}$$

Kaavoilla saadaan $\text{PRF}_{\min} = 5$ kHz, joten valitaan $\text{PRF} = 15$ kHz. Nopeusresoluutio määrää maalin valaisujan t_{dw} :

$$t_{\text{dw}} > \frac{1}{\Delta f},$$

jossa $\Delta f = 2 \cdot \frac{\Delta v}{\lambda}$ ja $\Delta v = 1$ m/s, joten $t_{\text{dw}} = 10$ ms.

Tällöin maalista saadaan $n = \text{PRF} \cdot t_{\text{dw}} = 150$ pulssia. Antennin keilan leveydeksi horisontaali- ja verikaalisuunnissa saadaan:

$$\theta = 60 \cdot \frac{\lambda}{0.5} = 2,4^\circ \quad \text{ja} \quad \phi = 60 \cdot \frac{\lambda}{0.25} = 4,8^\circ.$$

Antennin tehollinen pinta-ala on noin $A_e = \frac{\pi}{4} \cdot x \cdot y \cdot 0.7$, jolloin vahvistukseksi saadaan:

$$G = \frac{4\pi}{\lambda^2} \cdot A_e$$

joka on noin 33 dB. Kannettavassa laitteessa käytetään puolijohdetekniikalla toteutettuja lähetinkomponentteja, joiden huipputehon voidaan olettaa olevan 20 W luokkaa. 150 Pulssilla integraation mukanaan tuoma parannus on noin 17 dB. Jos järjestelmän häviöiksi oletetaan 6 dB, niin 4 km etäisyydellä olevasta 1 m² maalista saadaan signaali:

$$P_r = \frac{P_t \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma \cdot L_{\text{sys}}}{(4\pi)^3 \cdot R^4} \approx -125,3 \text{ dBW}$$

Järjestelmän kohinalämpötilaksi voidaan arvioida 1000 K ja kohinakaistanleveydeksi $B_n \approx 1/\tau \approx 1$ MHz, jolloin kohinasoksi saadaan:

$$N = k \cdot T_{\text{sys}} \cdot B_n \approx -138,6 \text{ dBW}.$$

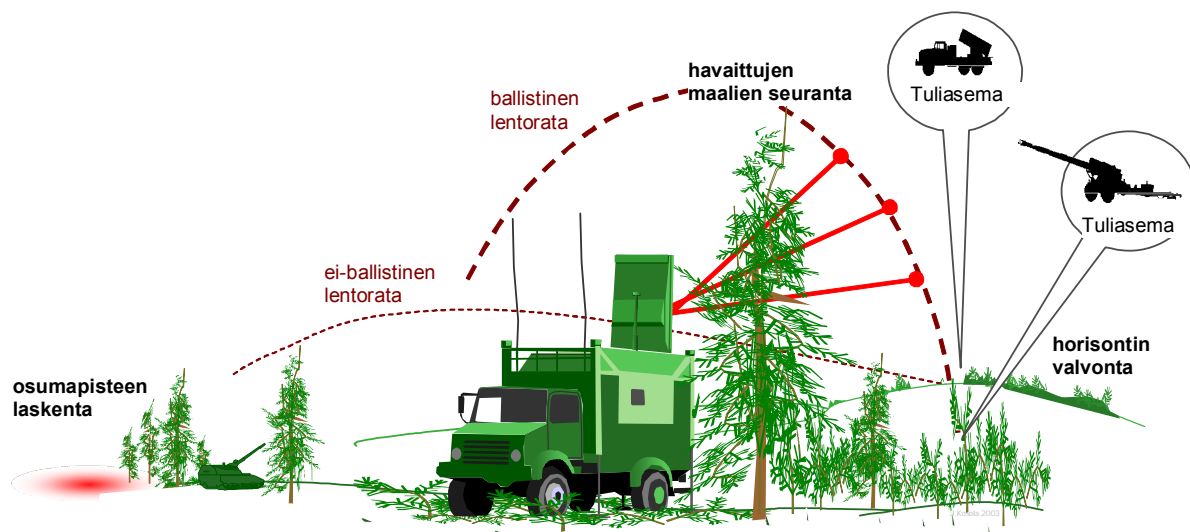
Tällöin signaalikohinasuhde olisi 13,3 dB. Tämä riittänee ilman integraation parannusta. Jos tutka integroi pulsseja, saadaan maksimikantamaksi ilman ilmakehän vaimennusta 1 m² kokoisille maaleille:

$$R_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_t \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \tau \cdot \sigma \cdot n E_i \cdot L_{\text{sys}}}{(4\pi)^3 \cdot k \cdot T_{\text{sys}} \cdot \text{SNR}_{\min}}} \approx 9,92 \text{ km}$$

Jos ilmakehän vaimennus lasketaan rankkasateen (30 mm/h) mukaisesti, niin kantama lyhenee hieman alle 6 kilometriin.

Vastatykistötutka

Vastatykistötutkan tehtävänä on paikantaa kranaatinheitinten ja tykistön tuliasemia mittaamalla ammusten lentorata kahdesta tai useammasta pisteestä ja laskemalla näiden perusteella tulyksiköiden sijainnit sekä ammusten maalipisteet. Vanhemmat vastatykistötutkat perustuvat ns. kahden aidan periaatteeseen, jossa projektiilista mitataan kaksi lentoradan pistettä. Menetelmä edellyttää ammuksen lentävän ballistisesti, joten se ei sovellu rakettien tai ohjusten mittaamiseen. Lisäksi antennin mekaanisen liikkeen vuoksi tutkalla on vaikeuksia mitata useita samanaikaisia maaleja.



Kuva 179: Vaiheohjatulla antennilla voidaan valvoa laajaa tilaa ja samanaikaisesti useita mitata ballististen ammusten sekä rakettien ja ohjusten lentoratoja.

Vaiheohjatuilla antennilla varustettu vastatykistötutka kykenee seuraamaan ammuksia niiden lentoradan eri vaiheissa, minkä vuoksi se kykenee päättämään, onko kyseessä ballistinen vai työntömoottoriavusteinen ammus, eli raketti tai ohjus. Koska antennin mekaaninen hitausmomentti puuttuu, vaiheohjattu tutka kykenee mittaamaan useiden samanaikaisesti ammuttujen ammusten lentoratoja.

Millimetriaaltotutka

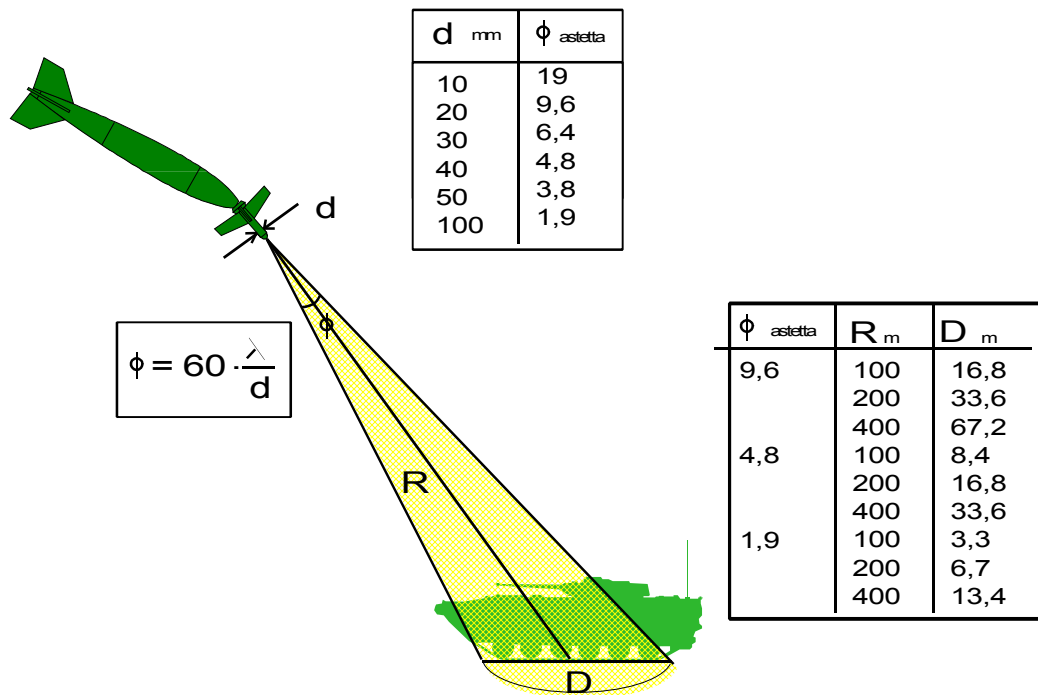
Perinteiset tutkat toimivat niin sanotulla mikroaaltoalueella, jossa aallonpituus on senttimetrejä tai kymmeniä senttimetrejä. Pitkä aallonpituus johtaa hyvään läpäisyyn ilmakehässä sekä mahdollistaa suuren lähetystehon käyttämisen. Tämän vuoksi mikroaaltotutkia käytetään useimmissa ilma- ja merivalvontajärjestelmissä sekä lentokoneissa yleiskäyttöisenä valvontaja seurantasensorina sekä maalinvalaisussa. Suuren aallonpituuden haittana on kuitenkin suuri koko; kaikki järjestelmän komponentit mikroaaltolähteestä antenniin joudutaan mitoittamaan aallonpituuden mukaisesti, jolloin niistä tulee väistämättä kookkaita, painavia ja kalliita. Suuri aallonpituus johtaa myös karkeaan etäisyys-, kulma- ja nopeusresoluutioon, mistä tosin ei ole haittaa mikroaaltotutkien perinteisissä sovelluskohteissa.



Kuva 180: Vaiheohjatulla antennilla varustettu Arthur-vastatykistötutka. Tutka valvoo horisonttia ja ryhtyy seuraamaan havaitsemiaan valvontalinjan ylittäviä kohteita. Järjestelmä laskee kranaatin tai raketin lähtöpisteen koordinaatit ja lähettää ne tarvittaessa lähettää ne omalle tykistölle maalikoordinaatteina. Järjestelmä laskee myös osumapisteen ja voi tarvittaessa lähettää varoituksen tulen alle joutuvalle joukolle. Tutkaa voidaan käyttää myös oman epäsuoran tulen osumapisteen havainnointiin ja tarvittavien korjausten laskemiseen. [Ericsson Microwave Systems]

Millimetrialueeksi kutsutaan aallonpituuksia 30 – 300 GHz. Millimetriaaltotutkien aallonpituus on 1-10 mm luokkaa, minkä vuoksi järjestelmän mikroaaltolähteet, aaltojohdot, antennit yms. komponentit voidaan tehdä pienikokoisiksi. Millimetriaaltojärjestelmien ominaisuudet muistuttavat osittain infrapunajärjestelmien ominaispiirteitä. Tällaisia ovat hyvä etäisyys-, kulma- ja dopplerresoluutio sekä pieni fyysinen koko ja paino. Millimetriaallot läpäisevät ilmakehän epäpuhtauksia, kuten sumua ja savuja, huomattavasti paremmin kuin infrapunasäteet, mutta heikommin kuin mikroaallot. Millimetriaalloilla kirkas ilmakehä vaimentaa

säteilyä niin paljon, ettei tällä alueella voida toteuttaa pitkän kantomatkan sensoreita kohtuullisilla lähetystehoilla. Millimetrialueella voidaan hyödyntää ilmakehän 35, 94, 140, 220 ja 360 GHz taajuuksilla olevia transmissioikkunoita.



Kuva 181: 94 GHz millimetriaaltotutkan keilanleveys antennin eri läpimitoilla sekä keilan valaiseman alueen koko eri keilanleveyksillä.

Hyvän dopplerresoluution avulla millimetriaaltotutkalla kyetään poistamaan taustan tutkavälkettä tehokkaasti ja havaitsemaan hitaastikin liikkuvia maaleja. Maalista saatava dopplersiirtymä riippuu maalin nopeudesta v_t ja aallonpituudesta λ . Esimerkiksi 94 GHz:llä dopplersiirtymä on:

$$f_d = 2 \frac{v_t}{\lambda} = 627 \cdot v_t$$

Siten esimerkiksi 5 km/h nopeudella kävelevä ihminen johtaa 871 Hz dopplersiirtymään ja 30 km/h nopeudella liikkuva ajoneuvo yli 5 kHz siirtymään. Merkittävin hyöty suuresta dopplersiirtymästä on se, että tutka kykenee erottamaan liikkuvat maalit tutkavälkkeestä lyhyemmässä ajassa. Siten millimetriaaltotutka soveltuu hyvin esimerkiksi ilmasta maahan käytettävien ohjautuvien ammusten ja taisteluhelikoptereiden sensoriksi.

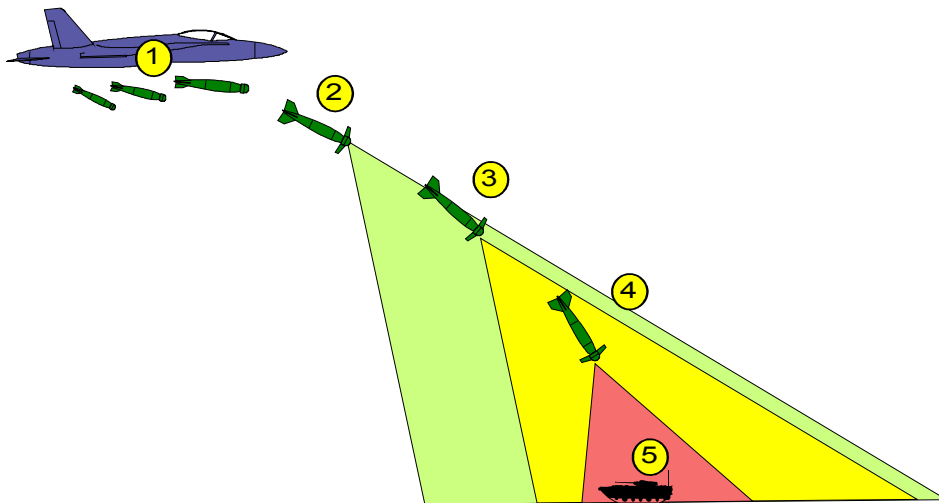
Millimetriaaltoammuksen hyökkäys alkaa kohdealueen yläpuolelle toimittamisella esimerkiksi tykistön kantoammuksella, lentokoneella tai aseensa omalla rakettimeoottorilla. Aluksi ammus levittää vakainsiivekkeitä ja stabiloi itsensä maan suhteen, jonka jälkeen se käynnistää tutkan ja ryhtyy etsimään liikkuvia maaleja, joiden pitäisi erottua hyvin maan tutkavälkkeestä. Jos liikkuva maali löytyy, ammus pyrkii päättämään, onko se riittävän tärkeä tuhottavaksi. Jos ammus on ohjelmoitu tuhoamaan esimerkiksi panssarivaunuja, se voi pyrkiä tunnistamaan ne telaketjujen synnyttämän dopplerspektrin perusteella aivan kuten JEM-analysoinnissa. Mikäli liikkuvia maaleja ei löydy tai ammus ei luokittele niitä riittävän tärkeiksi, se pyrkii löytämään paikallaan olevia tärkeitä maaleja. Jos näitäkään ei ennalta ohjelmoidun etsintäajan sisällä löydy, ase hakeutuu mihin tahansa havaitsemaansa ja sillä hetkellä sen liikemahdollisuuksien

sisällä olevaan maaliin. Ase voi käyttää tutkaansa herätesytyttimen tapaan optimaalisen räjähdysetaisyyden löytämiseen.



Kuva 182: Pienikokoinen millimetriaaltotutka mahtuu jopa 155 mm kranaatin sisälle sijoitettavaan panssarintorjuntasirotteeseen. [J. Kosola]

Millimetriaaltojärjestelmien rajoituksia ovat muun muassa mikroaaltoihin verrattuna suuri kirkkaan ilmakehän vaimennus, vastaanotinten suurempi kohinataso (noin 3 dB korkeampi kuin perinteisillä tutkilla) sekä korkeasta toimintataajuudesta johtuva suhteellisen pieni lähetysteho. Lisäksi millimetriaaltojärjestelmien alkutaivalta on hidastanut komponenttien korkea hinta ja heikohko luotettavuus.



Kuva 183: Millimetriaaltotutkalla varustetun maaliin hakeutuvan ammuksen hyökkäyksen vaiheet; 1. toimittaminen kohteelle. 2. stabilointi maan suhteen, tutkahakupään käynnistys ja liikkuvien maalien etsintä ja tunnistus. 3. paikallaan olevien maalien etsintä ja tunnistus. 4. hakeutuminen mihin tahansa mahdolliseen maaliin. 5. taistelupanoksen räjäyttämisen halutulla etäisyydellä kohteesta.

Esimerkkinä aktiivisesta millimetriaaltotutkasta mainittakoon AH-64 Apache Longbow –taisteluhelikopterin roottorin navassa sijaitsevaan mastoon sijoitettu 35 GHz alueella toimiva FCR-tulenjohtotutka (Fire Control Radar). Tutka havaitsee, paikallistaa, luokittelee ja priorisoi maalit automaattisesti. Luokittelussa maalit jaetaan liiketilansa perusteella paikallaan oleviin ja liikkuviin sekä tyyppinsä perusteella tela- ja pyöräajoneuvoihin, ilmatorjunta-

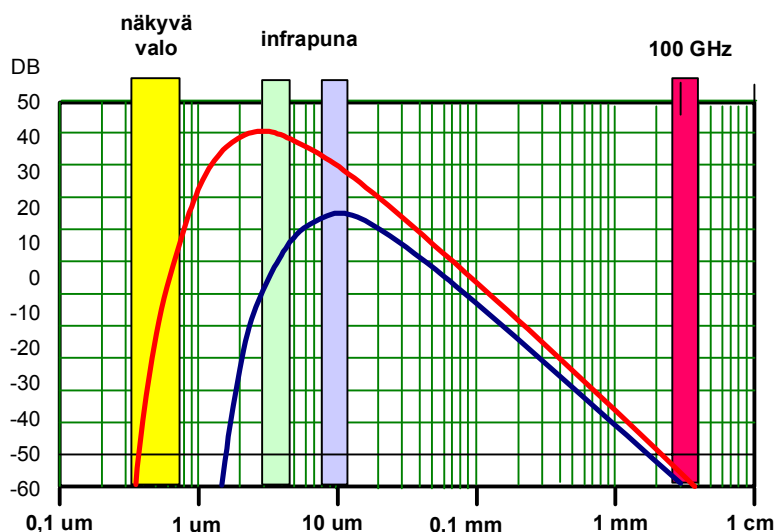
järjestelmiin, helikoptereihin sekä kiinteäsiipisiin lentokoneisiin. Mikäli tutkan havaitsema maali sisältää aktiivisia radio- tai tutkalähtettäviä, järjestelmään kuuluva RF-interferometri luokittelee lähtetimen tyyppin ja määrittää lähteyssuunnan. Interferometri kattaa 90 asteen sektorin tutkan katselusuunnassa. Tulenjohtotutkassa on kolme toimintatilaa maamaalien ja ilmamaalien tulittamista varten sekä ja maastonseurantatila. Ilmamaalien seurannassa tutka valvoo 360 asteen sektoria 8 km etäisyydelle saakka. Maastonseurantatilan tavoitteena on mahdollistaa turvallinen matalalento olemattomissa näkyvyysolosuhteissa, kuten sakeassa sumussa. Tällöin tutka määrittää maaston korkeusprofiilin lentonopeuden mukaan joko 180 tai 90 asteen sektoria 2,5 km etäisyydelle ja varoittaa uhkaavasta törmäyksestä. Tutkan näyttö on integroitu kypäränäyttöön ja siinä näytettävä maastoprofiili riippuu lentäjän pään asennosta. Siten infrapuna- ja tutkakuvan avulla lentäjälle voidaan luoda virtuaalinen lämpö- ja tutka'näkökyky'.



Kuva 184: AH-64 Apache-taisteluhelikopterin Longbow-versio on varustettu millimetriaaltoalueen tulenjohtotutkalla ja interferometrisuuntimolla. [Boeing]

Passiivinen mmW-tutka perustuu avaruudesta tulevaan ja kohteesta heijastuvaan sekä kohteen itsensä säteilemään millimetriaaltosäteilyyn. Millimetriaaltoalueella maalista tuleva mustan kappaleen säteily on 80 – 90 dB pienempi kuin infrapuna-alueella. Tätä seikkaa kompensoi osittain se, että vastaavasti mmW-vastaanottimet ovat noin 50 dB herkempiä kuin infrapunadetektorit. Edellä mainittujen seikkojen vuoksi maalista saatava signaali-kohinasuhde on millimetriaaltoalueella teoriassa 30-40 dB heikempi kuin infrapuna-alueella. Joissakin sovelluksissa tämä heikkous kompensoituu sillä, että pitkän aallonpituutensa vuoksi millimetriaaltojen läpäisyominaisuudet ovat huomattavasti parempia kuin infrapuna-alueella. Matalampitaajuiseen tutkaan verrattuna sillä saadaan maaleista luonnollisen näköisiä kuvia, joiden tulkinta on helpompaa kuin epämääräisemmän tutkakaiun. Lisäksi passiivisena mmW-sensori on aktiivista tutkaa vaikeampi havaita ja tuhota.

Millimetriaaltoja voidaan hyödyntää vastamenetelmänä maastouttamis- ja häivetekniikoille; esimerkiksi RAM (Radar Absorbing Material) absorboi tutkasäteilyä, minkä vuoksi se on millimetriaalloilla tarkasteltuna taustaansa kuumempaa. Tyypillisesti (esim. 94 GHz alueella toimiva) passiivinen millimetriaaltotutka havaitsee maalin kylmät kohdat, eli metallipinnoista tulevat heijastukset kylmältä taivaalta, noin 90 - 220 K lämpötilassa.



Kuva 185: 1000 K (ylempänä) ja 300 K (alempänä) lämpimän mustan kappaleen säteilytehoiteisuus ($\text{dBW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}$) eri aallonpituuksilla. Millimetrialueella taustan lämpöisen kohteen säteilytehoiteisuus on yli 70 dB pienempi kuin infrapunalla.

Passiiviset millimetriaaltotutkat eivät ainakaan nykyisin kykene muodostamaan reaaliaikaista kuvaa maalista, mikä rajaa niiden käytettävyyttä huomattavasti. Kuvien muodostamisaika on tämän hetkiselällä teknologian tasolla noin 20 sekuntia kuvaa kohti. Hidas kuvaamisnopeus johtuu siitä, että maalista saatava signaali on niin pieni, että sitä on integroitava riittävän pitkään. Pitkä integrointiaika puolestaan edellyttää, että vastaanotin 'tuijottaa' maalia riittävän kauan. Maalin tuijottamiseen käytettävissä oleva aika riippuu puolestaan tarkasteltavan maalialueen koosta, haluttavasta erottelukyvystä ja käytettävissä olevien vastaanotinten lukumäärästä. Mitä isompi valvottava alue on, sitä vähemmän aikaa sensori kykenee keskittymään tiettyyn kohtaan aluetta. Mitä parempaa erottelukykyä sensorilta halutaan, sitä useampiin osiin tarkasteltava alue joudutaan jakamaan ja sitä pienemmäksi kutakin kohtaa kohti käytettävissä oleva aika jää. Tarkastelu-aikaa voidaan lisätä käyttämällä useampia vastaanottimia, jotka tarkastelevat eri kohtaa maalialueesta samanaikaisesti. Järjestelmän koko-, paino- ja hintarajoitukset asettavat rajat vastaanotinten määrälle.

Laajakaistatutka

Laajakaistatutkalla (Ultra-wide Band Radar) tarkoitetaan tutkaa, jonka signaalienergia on levitetty hyvin laajalle taajuuskaistalle. Perinteisessä tutkassa käytettyjä laajakaista-menettelyjä ovat muun muassa lineaarinen ja epälineaarinen pulssikompressio, taajuus-modulointi sekä vaihemodulointi, joilla lähete voidaan levittää laajalle taajuuskaistalle ja vastaanotettu signaali tiivistää aikatasossa lyhyeksi pulssiksi. Laajakaistatutkalla tarkoitetaan kuitenkin tutkaa, jossa lähetettävä pulssi on hyvin lyhyt – jopa alle yhden jakson pituinen. Tällaisista tutkista käytetään myös nimitystä *impulssitutka*.

Impulssitutkassa lähetysteho viedään suoraan antennille, ei modulaattorin kautta niin kuin konventionaalisessa tutkassa. Käytettävät kentänvoimakkuudet ovat hyvin suuria, jopa suurempia kuin laitteiden teoreettiset läpilyöntirajat. Koska pulssit ovat hyvin lyhyitä, ei läpilyöntiä kuitenkaan ehdi tapahtua. Lyhyen pulssin keston vuoksi käytettävät energiat jäävät pieniksi. Impulssitutkalla voidaan saavuttaa 500-1000 MW tehoja – joidenkin arvioiden mukaan periaatteessa jopa 100 GW hetkellinen pulssiteho. Pulssi on kuitenkin vain 500 ps – 5 ns pituinen – tai jopa lyhyempi. Pulssin energia on levittäytynyt hyvin laajalle kaistalle, esimerkiksi 50 MHz – 10 GHz välille. Laaja kaista edellyttää hyvin laajakaistaisten antennien käyttämistä, jotta mahdollisimman suuri osa pulssin energiasta saadaan kytkettyä säteilyksi. Tutkasignaalin korkeat taajuudet vaimenevat nopeasti ilmakehässä sekä kasvillisuuden ja maaperän läpi kulkiessaan, jolloin vastaanotetun signaalin spektri tai pulssin muoto ei vastaa lähetettyä. Impulssimaisen herätteen vuoksi maalista takaisin tutkaan heijastuva signaali vastaa maalin impulssivastetta. Laajakaistatutkan mahdollisia käyttökohteita ovat muun muassa:

- Maalien erottaminen vaikeasta tutkavälkkeestä.
- Häivemaalien havaitseminen: tutkasäteilyä absorboivat materiaalit on yleensä optimoitu tietyille taajuusalueille. Laajan kaistan vuoksi on todennäköistä, että jotkut signaalikomponentit resonoivat maalin erikokoisissa rakenteissa. Suuri osa laajakaistatutkan energiasta on alhaisilla taajuuksilla, joilla häivemaalien ominaisuudet ovat huonoja.
- Maalien tunnistaminen: Suuri etäisyys- ja dopplertaajuusresoluutio mahdollistavat maalien piirteiden havaitsemisen ja siten maalien tunnistamisen.
- Maastoutettujen maalien paljastaminen: matalat taajuudet läpäisevät maalin suojaksi asetettuja naamiointimateriaaleja.
- Kasvillisuuden läpäisy (FPEN, Foliage Penetration): kaistan alapään matalat taajuudet läpäisevät lehvästön ja aluskasvillisuutta korkeita tutkataajuuksia paremmin.
- ELSO-sietoiset tutkat (LPI, Low Probability of Intercept, LPD, Low probability of Detect ja LPE, Low Probability of Exploitation): tutkasignaalin tehottiheys taajuuskaistalla on pieni suuren kaistan vuoksi. Esimerkiksi 1 GW teho levitettynä 50 MHz – 5 GHz kaistalle merkitsee keskimääräistä 20 mW/Hz tehottiheyttä antennin lähellä. Kapeakaistatutkan 100 kW lähetysteho 1 MHz kaistalla johtaa 100 mW/Hz keskimääräiseen tehottiheyteen.
- Maahan kaivettujen tai hautautuneiden kohteiden etsintä (GPEN, Ground Penetrating Radar): Laajakaistatutkalla voidaan havaita lähietäisyydeltä metallia sisältämättömiä miinoja ja muuta maahan kaivettua materiaalia. Lisäksi sitä voidaan käyttää esimerkiksi lumivyöryjen alle jääneiden tai haudattujen ruumiiden etsimiseen.

Impulssitutkassa on käytettävä poikkeuksellisen laajakaistaisia vastaanottimia, mikä johtaa suureen kohinatasoon. Tämän vuoksi järjestelmään on saatava kapeakaistaista järjestelmää suurempi signaali. Suuri vaadittu signaalitaso yhdistettynä suhteellisen pieneen keskimääräiseen lähtötehoon rajaa impulssitutkien käytön lyhyen kantaman sovelluksiin.

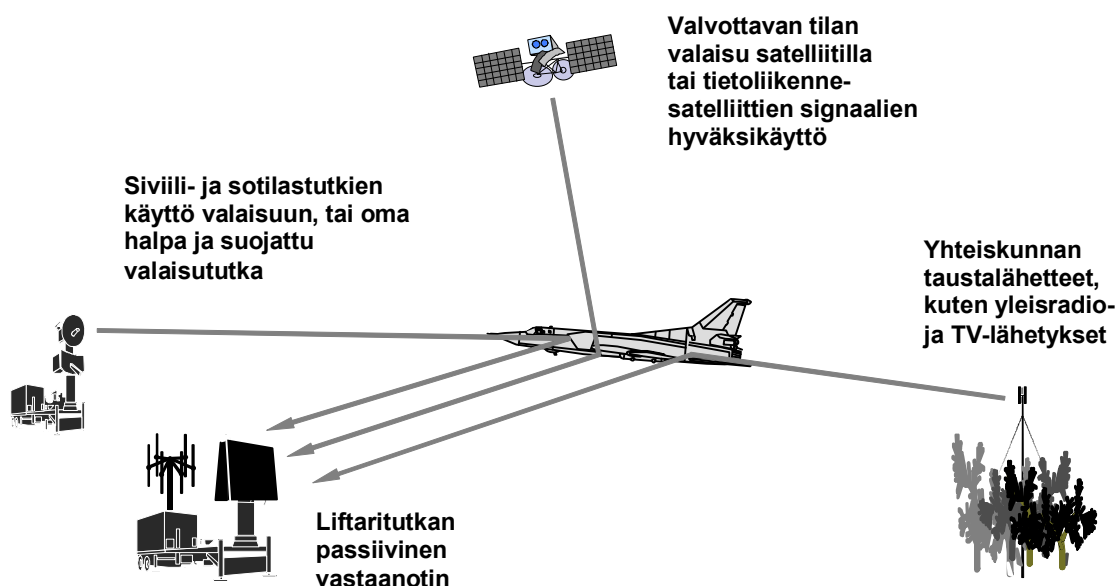
Lähettimeiden tutka

Lähettimeettömällä tutkalla tarkoitetaan tutkajärjestelmää, jossa itsessään ei ole lähetintä, vaan joka käyttää hyväkseen siviili- ja sotilasinfrastruktuurien lähetteitä, kuten yleisradio- ja TV-

lähetyksiä, tai vaikkapa GSM-verkon tukiasemien lähetyksiä.²¹ Järjestelmä voidaan rakentaa yhden tai useamman radioaseman lähetteen varaan. Mitä useampia lähettämiä voidaan samanaikaisesti käyttää hyväksi, sitä parempi havaitsemistodennäköisyys ja suuntimistarkkuus saadaan aikaiseksi.

Yleisradiolähetykset ovat jatkuvalähetteisiä (CW, Continuous Wave), joten niiden perusteella ei voida saada etäisyystietoa maaliin, vaan pelkkä suunta. Toisaalta käytettäessä kahta lähetettä, voidaan maalin paikka ristisuuntia kahdessa ulottuvuudessa ja kolmella läheteellä voidaan tehdä maalin kolmiulotteinen paikantaminen.

Yleisradiolähetysten suhteellisen matalan taajuuden vuoksi lähettimettömällä tutkalla voidaan havaita monia sellaisia häivemaaleja, joita ei tavallisella C-kaistalla tai sitä ylemmillä olevalla tutkalla kyettäisi näkemään. Lisäksi yleisradioantennit on tyypillisesti sijoitettu hyvin korkeisiin – 150 metriä tai korkeampiin – mastoihin, minkä vuoksi tällaisiin läheteisiin perustuvalla tutkalla on suuret mahdollisuudet havaita matalalla lentäviä ohjuksia ja lentokoneita.



Kuva 186: Passiivisena liftaritutka ei paljastu tiedustelulle ja on suojassa tutkasäteilyyn hakeutuvilta ohjuksilta, mutta tarvitsee riittävät maalin valaisun.

Lockheed Martinin *Silent Sentry* on yksi esimerkki tällaisesta uudesta järjestelmäkoneptista. Se käyttää hyväkseen FM-radioasemia, jotka lähettävät 50 – 800 MHz taajuusalueella. Järjestelmä havaitsee liikkuvien maalien aiheuttaman dopplersiirtymän, kun radiolähetys heijastuu maalin pinnasta. Valmistajan ilmoituksen mukaan Silent Sentry -järjestelmä kykenee havaitsemaan 10 m² maalin noin 200 km etäisyydeltä. Järjestelmä kykenee seuraamaan yli 200 maalia, joiden keskinäinen etäisyys on yli 15 metriä. Luonnollisesti havaitsemisetäisyys riippuu maalin heijastusominaisuuksista sekä käytettävissä olevista läheteistä.

Yhtenä merkittävimmistä yleisradioläheteisiin perustuvan tutkan ongelmista on yleisradio-mastojen helppo tuhottavuus. Yleisradiomastot ovat kiinteitä selkeästi erottuvia ja aktiivisesti

²¹ Itse asiassa englantilainen Guglielmo Marconi keksi tutkan juuri tällaisen ilmiön perusteella, kun hän havaitsi radiolähettimen ja vastaanottimen välillä lentävän lentokoneen aiheuttavan häiriöitä viestiyhteydelle.

säteileviä kohteita, jotka voidaan tuhota navigoivien risteily- ja maataisteluhjuksin tai laserhakeutuvien lentopommein ja ohjuksin. Toisaalta kiinteätä radioverkkoa voidaan täydentää siirrettävien lähettimien, joiden tehtävänä on valaista valvottavaa aluetta siviililähetystyksiä muistuttavilla lähetteillä. Tällaisia lähettimiä voidaan asentaa korkeille maastonkohdille, siirrettäviin mastoihin tai esimerkiksi aerostaattiin.

Lähettimettömän tutkan SAR-versiosta käytetään nimitystä AASR (Associative Aperture Synthetic Radar). Se muodostaa SAR-periaatteella kuvaa olemassa olevien lähetteiden, kuten tutkat, televerkon tukiasemat jne. aiheuttamista heijastuksista. Teknologia on vielä tutkimusasteella, mutta tarjoaa mahdollisuuden muodostaa tarkkaa SAR-kuvaa kohteesta puhtaasti passiivisin menetelmin.

Pulssidopplertutka

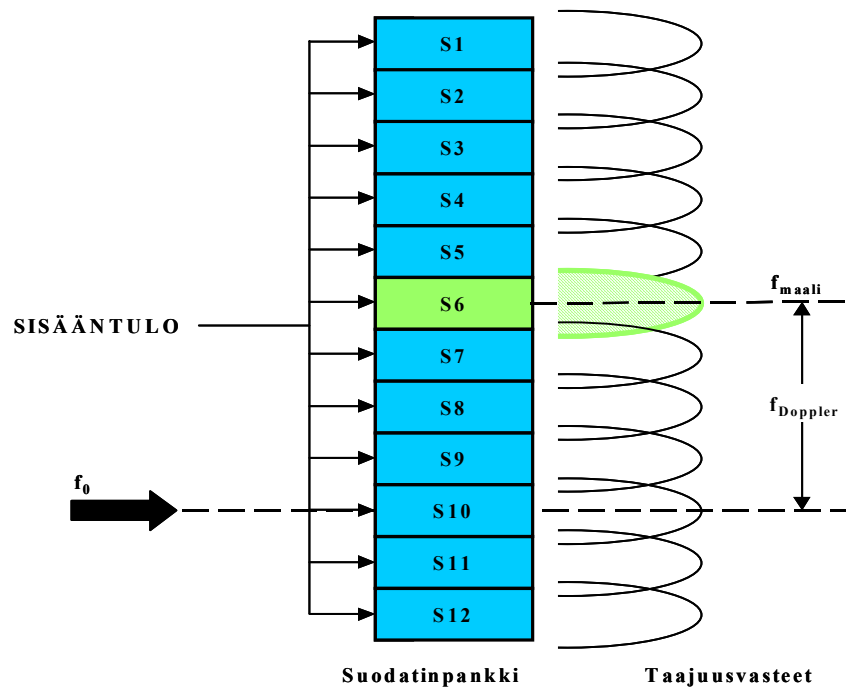
Pulssidopplertutkia käytetään yleisesti erilaisissa sovelluksissa valvonta- ja seurantatutkista hävittäjäutuksiin. Erityisesti hävittäjäututkissa dopplerprosessointia on yleistä. Pulssidopplertutka käyttää hyväkseen liikkuvasta kohteesta heijastuvan tutkakaiun dopplersiirtymää. Taajuussiirtymä ilmaistaan tutkan dopplersuodattimien avulla, jotka on optimoitu toimimaan joko tutkan oman nopeuden tai havaittavien kohteiden nopeuksien synnyttämien dopplertaajuuksien mukaisesti. Dopplertekniikan avulla tutka kykenee sekä erottamaan maalin paremmin paikallaan olevasta tai maalia hitaammin liikkuvasta tutkavälkkeestä että mittaamaan maalin nopeuden. Modernit hävittäjä- ja pommittajatutkat käyttävät lisäksi dopplererottelua maastokuvan muodostamiseen (ground mapping) SAR-tutkan tavoin.

Dopplersuodatinta kutsutaan usein suodatinpankiksi (doppler bank), koska se muodostuu useasta pienestä suodattimesta, jotka on sijoitettu hieman limittäin siten, että taajuusalue, joka yksittäisen suodattimen osalta vastaa minimissään integrointiajan käänteisarvoa, katetaan kokonaisuudessaan.

Suodatinpankissa olevien suodattimien taajuusvasteiden tulee olla hieman limitettyjä, jotta vasteiden välissä olevien signaalien häviöt saadaan minimoitua. Yksittäisten suodattimien kaistanleveys voidaan laskea kaavalla:

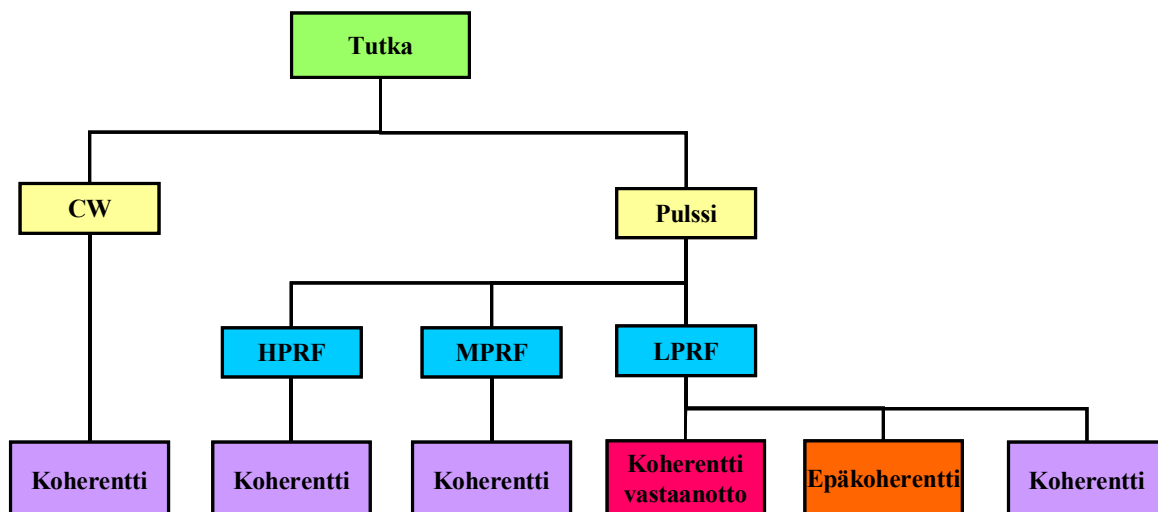
$$BW_{3db} = \frac{1}{t_{int}} = \frac{PRF}{N}$$

jossa t_{int} on pulssien integroimiseen käytettävä aika. Yksinkertainen approksimaatio yksittäisten suodattimien kaistanleveydestä saadaan, kun käytettävä pulssintoistotaajuus PRF jaetaan integroinnissa käytettävien pulssien lukumäärällä N . Kaava antaa ainoastaan pienimmän hyväksyttävissä olevan taajuuskaistan. Hyvin usein yksittäisten suodattimien taajuuskaistat ovat huomattavasti leveämmät diskreettien suodattimien rakenteen tai digitaalisen suodattimien ikkunointifunktion painotuksen vuoksi.



Kuva 187 Maalikaiun taajuuskomponentit jaetaan eri dopplersuodattimiin, jolloin maalin liikkeestä aiheutuva dopplertaajuuden muutos kyetään havaitsemaan.

Yleisesti voidaan todeta, että yksi pulssidopplertutkan tärkeimmistä parametreista on pulssintoistotaajuus. Se määrää onko tutkan havaintoetäisyys ja dopplertaajuuden mittauskky yksikäsitteinen vai ei. Kuten tutkatekniikan perusteissa esitettiin, yksikäsitteisellä havaintoetäisyydellä tarkoitetaan sitä etäisyyttä, jolta tutka kykenee mittaamaan maalista heijastuneen pulssin yksikäsitteisesti. Vastaavasti dopplertaajuuden yksikäsitteisellä mittauskvyllä tarkoitetaan sitä, kykeneekö tutka mittaama maalin liikkeestä aiheutuvan dopplersiirtymän ja siten maalin radiaalisen nopeuden yksikäsitteisesti. Erityisesti hävittäjätutkien pulssintoistotaajuu- det valitaan aina vallitsevan tilanteen tai tehtävän mukaan; onko tarpeellista saavuttaa pitkä yksikäsitteinen havaintoetäisyys vai havaita kaikki maalit tutkavälkkeen seasta, vai jokin edellä mainittujen vaihtoehtojen kompromissi.



Kuva 188: Tutkan käyttämä integrointi riippuu PRF-valinnasta.

Koska pulssintoistotaajuuden valitsemisella on erittäin suuri merkitys tutkan suorituskykyyn erityisesti lentokoneissa, niitä on alettu luokitella ymmärtämisen helpottamiseksi kolmeen eri kategoriaan; LPRF-, HPRF- ja MPRF-moodeihin. Eri moodeja ei luokitella käytetyn pulssintoistotaajuuden arvon mukaisesti, vaan luokitteluperusteena on se saavutetaanko käytetyllä PRF:llä yksikäsitteinen havaintoetäisyys ja dopplertaajuuden mittauskyky.

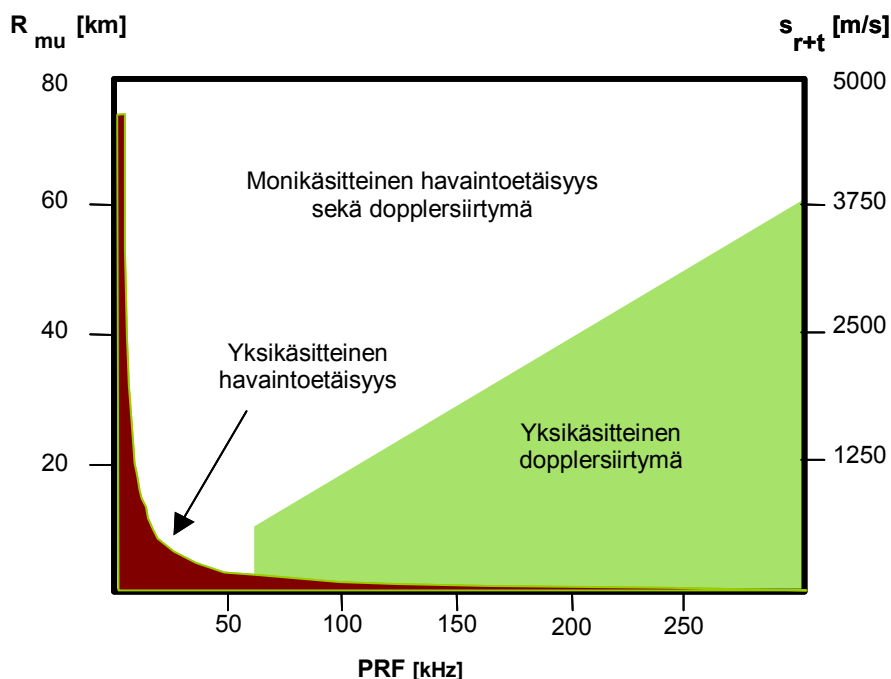


Kuva 190: F-18 Hornetin APG-65 pulssidopplertutkan antennin takaosassa näkyvät antennin kääntökoneisto sekä aaltojohdot. [Patria]

LPRF-moodilla (Low PRF) saavutetaan maksimaalinen yksikäsitteinen havainto-etäisyys, mutta dopplertaajuuden mittauskyky ei ole yksikäsitteinen. Esimerkiksi 10 GHz:n taajudella toimivan hävittäjätutkan LPRF-moodi toimii noin 250 ja 4000 Hz:n taajuudella, jolloin tutkan yksikäsitteinen mittausetäisyys vaihtelee 600 km:sta 37,5 km:iin.

HPRF-moodilla (High PRF) saavutetaan maalien nopeuksien (dopplertaajuuksien yksikäsitteinen mittauskyky) erinomainen erottelukyky sekä parannetaan tutkan ominaisuuksia havaita maalit helpommin välkkeen seasta. HPRF-moodin taajuusalue on noin 100 – 300 kHz, jolloin yksikäsitteinen havaintoetäisyys on pieni ja etäisyyden mittaus ei ole mahdollista yksittäisten pulssien avulla. Etäisyydenmittauskykyä kasvatetaan vaihtelemalla pulssintoistotaajuutta aiemmin kerrotulla tavalla.

MPRF-moodissa (Medium PRF) havaintoetäisyys ja dopplersiirtymä eivät kummatkaan ole yksikäsitteisiä. MPRF:n taajuusalueen määrittely on jossain määrin häilyvämpi kuin kahden edellä mainittujen moodien taajuusalueet, mutta hyvänä estimaattina voidaan pitää 10 – 30 kHz:n pulssintoistotaajuuksia X-alueella.



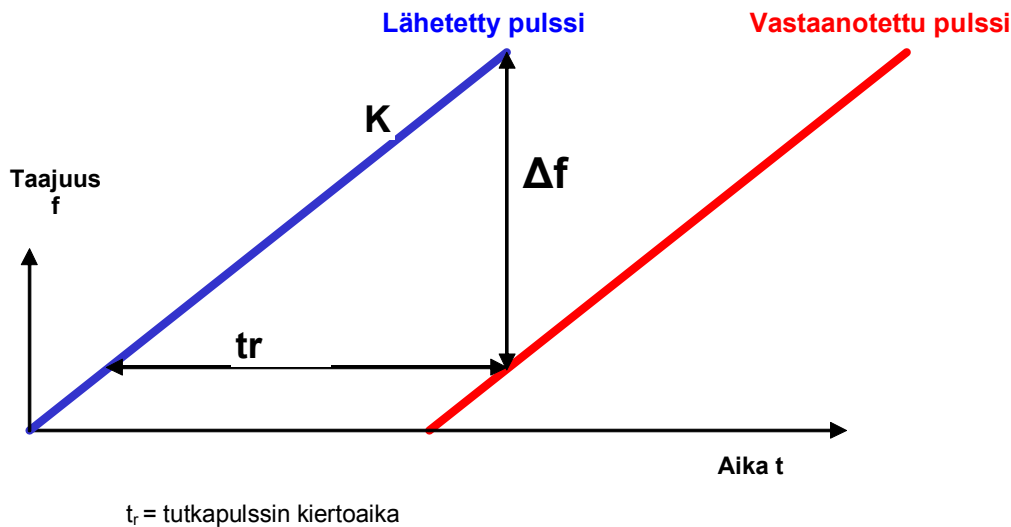
Kuva 191. Pulsintoistotaajuuden valinnalla on suuri merkitys tutkan yksikäsitteiseen havaintoetäisyyteen ja dopplersiirtymän mittausskykyyn. Kuvan alueet on laskettu x-alueen ($\lambda=3$ cm) hävittäjäutkalle, jonka oma nopeus $s_r = 514$ m/s. S_{r+t} on sekä tutkan että maalin yhteinen säteittäinen nopeuskomponentti.

LPRF-moodilla tutka kykenee mittaamaan etäisyyden yksikäsitteisesti yksinkertaisella pulssin kulkaikaan perustuvalla mittauksella, jolloin se kykenee hylkäämään sivukeiloista saapuvat heijastukset aika- eli etäisyystasossa. Toisaalta LPRF-moodin ongelmana on sen heikko kyky erotella signaalia taajuustasossa, joten sen on altis maassa liikkuvista kohteista tulevien heijastusten aiheuttamille häiriöille. Normaalisti LPRF-taajuuksien käyttö rajoittuu maahan sijoitettuihin valvonta- ja seurantatutkiin, joiden tarkoituksena on valvoa erittäin suurta ilmatilaa. Lentokoneissa LPRF-moodia käytetään lähinnä tilanteissa, joissa pääkeilasta saapuva maavälke voidaan välttää. Tällaisia tilanteita ovat esimerkiksi toiminta avoveden yläpuolella, kohteiden etsintä tutkan yläpuolelta niin ettei pääkeila osu maahan ja silloin, kun tutkapulssi heijastuu maasta yksikäsitteisen havaintoetäisyyden jälkeen.

HPRF-moodilla voidaan erotella helposti pääkeilasta saapuva välke, koska liikkuvista kohteista heijastuvien kaikujen dopplertaajuudet erottuvat selvästi. Ainoastaan tilanteet, joissa maali liikkuu tutkan tangentin suunnassa (ei siis lähesty eikä loittone), maalia ei kyetä erottamaan taustavälkkeestä. HPRF-moodissa maalin etäisyyden määrittely ei onnistu pulssin kulkaikaeron mittauksella, joten sen etäisyydellä käytetään ns. FM-pyyhkäisyä (FM ranging). Siinä lähetteen taajuutta muutetaan hitaasti, jolloin maalin etäisyys voidaan päätellä kaikupulssin tuloajan sijasta kaikupulssin taajuudesta. Maalin etäisyys voidaan laskea kaavalla

$$R = \frac{c \cdot \Delta f}{2 \cdot K}$$

jossa c on pulssin etenemisnopeus (valon nopeus), Δf lähetetyn ja vastaanotetun pulssin taajuusero ja K lähetystaajuuden muutosnopeus.



Kuva 192. HPRF-moodissa etäisyyden mittausta voidaan laskea lähetystaajuuden muutosnopeudesta sekä lähetetyn ja vastaanotetun pulssin taajuuserosta.

FM-mittauksen tarkkuus riippuu sekä tutkan kyvystä mitata tuleva maalikaiku taajuustasossa (dopplersuodattimen taajuudenmittausresoluutiosta) että lähetteen taajuuspyyhkäisyn nopeudesta (kulmakerroin K edellisessä kuvassa). Etäisyystarkkuus voidaan laskea kaavalla:

$$R_{\text{acc}} = \frac{BW_{3\text{dB}} \cdot c}{2 \cdot K}$$

jossa $BW_{3\text{dB}}$ on yksittäisen dopplersuodattimen (3 dB:n) kaistanleveys. Jos esimerkiksi oletetaan, että HPRF-moodissa toimivan tutkan dopplersuodattimen kaistanleveys on 100 Hz, taajuuspyyhkäisyn nopeus 5 MHz/s ja lähetetyn sekä vastaanotetun pulssin taajuusero kaiun vastaanottohetkellä lähetettävään pulssiin on 2480 Hz, saadaan maalin etäisyydeksi 74 km ja etäisyysmittauksen tarkkuudeksi noin 3 km.

MPRF-moodi on kehitetty yhdistämään sekä LPRF- että HPRF-moodien hyvät ominaisuudet. MPRF-moodilla ongelmaksi tulee kuitenkin sen lyhyt yksikäsitteinen havaintoetäisyys ja heikohko kyky mitata dopplertaajuuksia. MPRF:n käytön suurimpina etuina voitaneen pitää sokeiden nopeuksien eliminoiminen sekä hyvä kyky erotella liikkuvat maamaalit lentävistä kohteista. Kuten aiemmin on esitetty, sopiva pulssintoistaajuus riippuu aina tilanteesta ja siitä mitä tutkan ominaisuutta halutaan kulloinkin korostaa. Tämän vuoksi moderneissa pulssidopplertutkissa PRF:ää voidaan vaihdella tilanteen mukaan. Taulukossa 10 on esitetty eri PRF-moodien ominaisuuksia.

Moodi	Vahvuudet	Haitat
LPRF	<ol style="list-style-type: none"> 1. Etäisyyden mittaus mahdollista yhden pulssin perusteella 2. Hyvä etäisyysmittauskyky ja etäisyysresoluutio voidaan saavuttaa samanaikaisesti 3. Erittäin hyvä ilmasta ilmaan ja maasta ilmaan havaitseminen sekä SAR-kyky 4. Sivukeilavälke voidaan hylätä etäisyyserottelun avulla 5. STC:n (Sensitivity Time Control) avulla lähialueen välke sekä jaksontakaiset kaiut saadaan hylättyä helposti 6. Signaaliprosessoinnin vaatimukset täytettävissä nykytekniikalla helposti 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Useat maalit saattavat peittyä helposti pääkeilan välkkeeseen 2. Dopplertaajudet eivät ole mitattavissa yksikäsitteisesti 3. Erityisesti hävittäjäutkien pienen antennikoon vuoksi on käytettävä korkeampia taajuuksia, mikä aiheuttaa ongelmia maa- ja ilma-maalien erottelussa 4. Normaalisti vaaditaan korkeampi huipputeho tai tehokkaampi pulssikompressio kohtuullisen havaintoetäisyyden saamiseksi
HPRF	<ol style="list-style-type: none"> 1. Nopeasti lähestyvät maalit ovat kokonaan dopplerspektrin välkevapaalla osalla 2. Korkea keskimääräinen lähetysteho mahdollista pulssintoistotaajuutta nostamalla. 3. Pääkeilasta heijastuva välke on helppo poistaa 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Sivukeilasta heijastuva välke saattaa lyhentää hitaasti lähestyvien maalien havaintoetäisyyttä 2. Perinteinen maalien etäisyyden mittaus ei ole mahdollista 3. Nolla-nopeudella lähestyvät kohteet saattavat hävitä tutkan oskillaattori-vuotoon
MPRF	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tyydyttävä yksikäsitteisen etäisyyden ja dopplertaajuuden mittauskyky 2. Maassa liikkuvat kohteet helposti hylättävissä 3. Etäisyysmittaus yhden pulssin perusteella ainoastaan lievästi rajoittunut: vaadittava PRF:n määrä pienempi kuin HPRF:ssä 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Sivukeilavälke saattaa huonontaa erittäin hitaasti tai hyvin nopeasti liikkuvien kohteiden havaitsemista 2. Sekä etäisyyden että dopplertaajuuden mittauksen monikäsitteisyys on ratkaistava 3. Suurista kohteista heijastuneen ja sivukeilasta saapuvan kaiun hylkääminen edellyttää erityismittausta

Taulukko 10. Eri PRF-moodien vahvuudet ja heikkoudet.

ELEKTRONINEN TIEDUSTELU JA VALVONTA

Kuten jo aiemmin todettiin, taistelun voittaminen edellyttää sähkömagneettisen spektrin hallintaa. Sillä tarkoitetaan kykyä havainnoida sähkömagneettista säteilyä koko spektrin alueella sekä kykyä kontrolloida säteilyn käyttöä. Siten spektrin hallinta edellyttää kykyä havaita ja hyödyntää sekä vihollisen että omien järjestelmien tahallisia ja tahattomia lähteitä. Vihollisen lähteiden sisältämää informaatiota käytetään sekä tilannekuvan muodostamiseen että vastatoimenpiteiden valmisteluun. Vastatoimenpiteet voivat olla sekä fyysisiä että elektronisia hyökkäyksiä (EA, Electronic Attack) tai suojautumistoimenpiteitä

(EP, Electronic Protection).²² Spektrin hallinta ja elektroninen hyökkäys vaativat omat tähän tehtävään erikoistuneet tukijärjestelmänsä.

Vihollisuuden erityyppisen luonteen vuoksi joukolta edellytetään kolmitasoisista spektrin valvonta- ja tiedustelukykyä:

1. Tietoisuutta omia joukkoja vastaan hyökkäävien järjestelmien suorituskyvyistä sekä teknisistä parametreista - *Mitä potentiaalista voimaa vihollisella on?*
2. Tietoisuutta taistelukentällä vastassa olevista järjestelmistä – *mitä järjestelmiä ja joukkoja vihollisella on, missä ne ovat ja mitä ne ovat parhaillaan tekemässä?*
3. Reaaliaikaista uhkavaroitusta - *Kuka on kimpussani juuri nyt?*

Vastaukset näihin kaikkiin kolmeen kysymykseen pyritään saamaan elektronisilta tiedustelu- (ELINT, Electronic Intelligence) ja tukijärjestelmiltä (ESM, Electronic Support Measures) sekä erilaisilta alustakohtaisilta varoitusjärjestelmiltä (kuten tutkavaroituksjärjestelmiltä, RWR, Radar Warning Receiver, laservaroitusjärjestelmiltä LWR, Laser Warning Receiver sekä ohjusvaroitimilta MAW, Missile Approach Warner). Tässä luvussa keskitytään taistelun tukemiseen käytettäviin ELINT- ja ESM-järjestelmiin. Tutka-, laser- ja ohjusvaroitimia käsitellään *omasuojajärjestelmä* -luvussa.

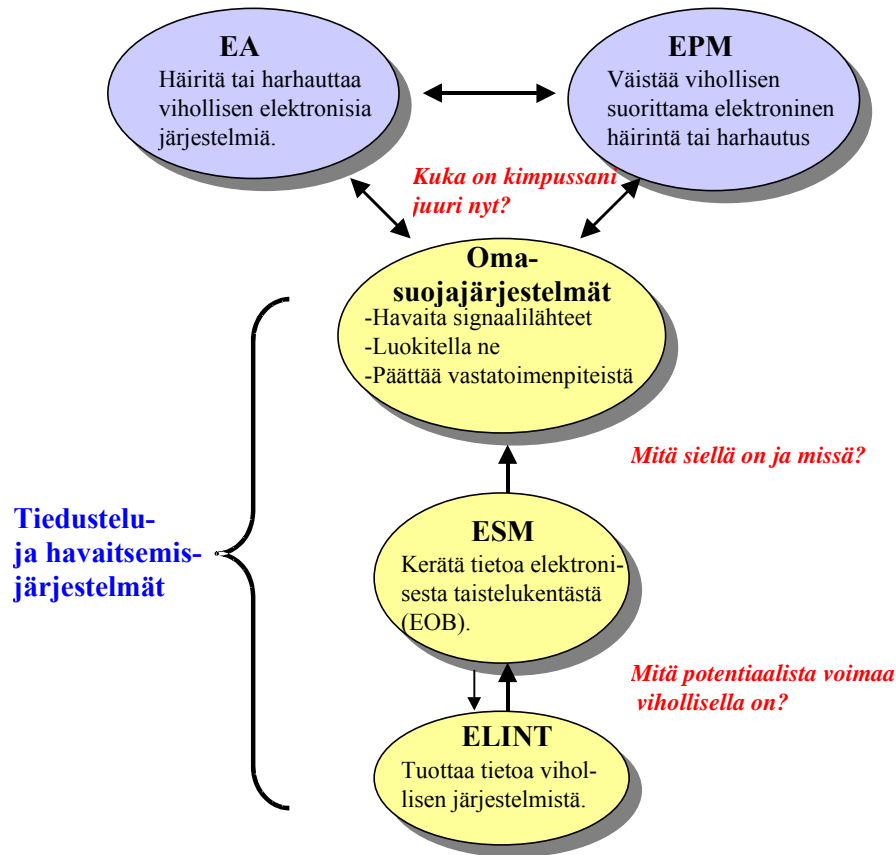
Signaalitiedustelu

Signaalitiedustelulla tarkoitetaan vihollisen eri järjestelmien tuottamien signaalien sieppaamista, lajittelua ja analysointia oman taistelutoiminnan tukemiseksi. Signaalitiedustelu voidaan jakaa viestiliikennetiedusteluun (COMINT, COMMunications INTelligence) ja elektroniseen tiedusteluun (ELINT, ELeKtronic INTelligence).

Viestiliikennetiedustelu kattaa nimensä mukaisesti vihollisen johtamistoiminnassaan ja sensori- sekä asejärjestelmien ohjaamisessa käyttämät viestijärjestelmät. Elektroninen tiedustelu kattaa muut kuin viestijärjestelmien läheteet, kuten radiomajakat, omatunnistuslaitteistot, herätesytyttimet, sekä järjestelmien sisäiset komento- ja datalinkit. Viesti- ja tutkatiedustelun sekä elektronisen tiedustelun tekniikka ja toiminta periaatteet ovat samankaltaisia, joten niitä käsitellään kootusti tässä luvussa. Laser- ja infrapunatiedustelua käsitellään laser- ja infrapunasensoreita käsittelevissä luvuissa.

Edellä kuvattujen tiedustelumuotojen lisäksi strategisella tasolla käytetään hyväksi vihollisen järjestelmien kehitysvaiheessa testisignaalien telemetriatiedustelua (TELINT, TELemetry INTelligence) ja käyttöön otettujen järjestelmien lähettämän hajasäteilyn tiedustelua (RINT, Radiation INTelligence). Strategisen tason järjestelminä nämä eivät kuulu tämän kirjan aihepiiriin.

²² Elektronisesta hyökkäyksestä on aiemmin käytetty nimeä ECM, Electronic Counter Measures. Siitä on luovuttu EA:n hyväksi, koska elektroninen hyökkäys on haluttu nähdä osana yhtymän kokonaistaistelua eikä vain elektronisina vastatoimenpiteinä. Vastaavasti nykyisissä teksteissä 'vastatoimenpiteiden vastatoimenpiteet' (ECCM, electronic counter-counter measures) on nimetty elektronisiksi puolustustoimenpiteiksi EPM



Kuva 193: Tilannekuvan saaminen elektroniselta taistelukentältä edellyttää kolmitasoista tiedustelukykä, joka sisältää vastassa olevien järjestelmien luokittelutiedot (ELINT), taistelukentällä olevien järjestelmien havainnoinnin (ESM) ja paikantamisen (DF, Direction Finding) sekä yksittäisten asejärjestelmien omasuojavaroittimet (RWR, LWR, MAW).

Signaalin havaitseminen

Signaalin havaitseminen sisältää kaksi erillistä prosessia, joiden kummankin onnistuminen on edellytys havainnon tekemiselle. Ensimmäistä kutsutaan lähetteen sieppaukseksi ja toista sen ilmaisuksi. Lähettimen signaali on siten kyttävä sekä sieppaamaan että ilmaisemaan. Sieppaamisella tarkoitetaan sitä, että vastaanotin kykenee saamaan ilmaisimelleen signaalin tiedusteltavalta järjestelmältä. Tämä edellyttää sitä, että vastaanottimessa on oikea taajuus, vastaanottimen antenni on suunnattu oikein lähetteen suuntaan ja että lähetin lähettää signaalia tiedusteluvastaanottimen suuntaan. Pelkällä sieppaamisella ei voida havaita lähetintä, vaan tiedusteluvastaanottimen on lisäksi kyttävä ilmaisemaan lähetteen olemassaolo. Ilmaisus edellyttää riittävän suuren signaalitason saamista vastaanottimeen.

Varoitinjärjestelmissä pelkkä signaalin havaitseminen saattaa olla riittävää: Esimerkiksi laservaroitin valvoo haluttua aallonpituusaluetta ja ilmoittaa vaunun henkilöstölle mahdollisesta uhasta, mikäli jollain aallonpituudella havaitaan lähete. Tiedustelujärjestelmissä on kuitenkin havaitsemisen jälkeen ryhdyttävä signaalin parametrien mittaamiseen ja analysointiin. Tähän tarvitaan pidempi aika ja suurempi signaalitaso kuin pelkän havainnon tekemiseen. Seuraavissa luvuissa käsitellään signaalin sieppaamista ja ilmaisua sekä parametrien analysointia.

Signaalin sieppaaminen

Ennen kuin teoreettisia mahdollisuuksia signaalin sieppaamiselle on, signaali on saatava niin sanottuun sieppausikkunaan. Sieppausikkunaksi kutsutaan ajanhetkeä, jolla kaikilla lähetteen sieppaamiseksi edellytettävillä parametreilla on oikea arvo. Signaalin sieppaus edellyttää, että:

1. Lähetteen on tiedusteluvastaanottimen sieppauskaistan sisällä **JA**
2. Mikäli tiedusteluantenni on suuntaava, on sen osoitettava lähettimen suuntaan **JA**
3. Mikäli lähettimen antenni on suuntaava sen on osoitettava tiedusteluvastaanottimen suuntaan **JA**
4. Lähetin lähettää samalla hetkellä kun em. ehdot ovat voimassa.

Mikäli tiedustelujärjestelmässä käytetään pyöritettävää suuntaavaa antennia, on mahdollista, että lähetin on suunta-antennin päikeilan ulkopuolella lähetyshetkellä. Lisäksi on mahdollista, että tiedusteluvastaanotin on lähettimen antennikeilan ulkopuolella lähetyshetkellä, eikä tiedusteluvastaanotin saa riittävää signaalia, vaikka sen antenni osoittaisi lähetintä kohti. Sieppaustodennäköisyys POI (Probability of Intercept) on

$$POI = P_{\text{scan}} \cdot P_{\text{rx}} \cdot P_{\text{tx}}$$

jossa P_{scan} on vastaanottimen pyyhkäisykaistanleveyden suhde tiedusteltavaan taajuusalueeseen, P_{rx} ja P_{tx} ovat keilaavien antennien keilanleveyksien suhteet keilattavaan sektoriin. Jos esimerkiksi tiedusteltava taajuusalue on 1 GHz ja pyyhkäisevän vastaanottimen kaistanleveys on 10 MHz, ja vaakatasossa pyörivien tiedustelu- ja lähetysantennien keilanleveydet ovat $3,6^\circ$, saadaan sieppaustodennäköisyydeksi:

$$POI = \frac{10 \cdot 10^6}{1 \cdot 10^9} \cdot \frac{3,6}{360} \cdot \frac{3,6}{360} = 10^{-6}$$

Käytännössä tiedusteluantenni ei yleensä pyyhkäise koko atsimuuttitasoa, vaan pienemmän sektorin, jolloin sieppaustodennäköisyys kasvaa mikäli lähetin sijaitsee tällä sektorilla. Sieppaustodennäköisyyttä pyritään parantamaan tiedustelujärjestelmään liitettävällä laajakaistaisella vastaanottimella, johon kytketään ympärisäteilevä antenni, jolloin sieppaustodennäköisyys kasvaa 10 000 -kertaiseksi P_{scan} :n ja P_{rx} :n ollessa 1. Tällöin tarkempaa analysointia suorittavan suunta-antennia käyttävän tiedustelujärjestelmän sieppaustodennäköisyyteen vaikuttaa ainoastaan lähetysantennin suunta, mikäli sivukeilataseja ei kyetä kuuntelemaan.

Tiedusteluvastaanotin voi havaita lähetitteitä yhtäaikaaisesti koko lähetteen mahdollisella taajuusalueella tai se voi tarkastella kapeaa signaalikaistaa kerrallaan ja siirtyä uudelle kaistalle, mikäli tarkasteltava kaista on tyhjä. Tällaisista vastaanottimista käytetään nimitystä pyyhkäisevä (scanning) vastaanotin.

Signaalin ilmaisu

Sieppaamisen lisäksi vastaanottimelle on saatava riittävä signaalikohinasuhde, jotta signaali kyetään ilmaisemaan. Lähettimestä lähtevä signaali vaimenee etäisyyden kasvaessa ja sekoittuu ennen pitkää taustakohinaan. Tiedusteluvastaanottimeen tulevan taustakohinan taso riippuu monesta tekijästä, mutta ennen kaikkea vastaanottimen kaistanleveydestä: Mitä suurempi se on, sitä korkeampi on vastaanottimen oman pohjakohinan taso ($N=kTBF$). Signaalikohinasuhdetta puolestaan voidaan parantaa:

1. Lisäämällä antennivahvistusta, jolloin antennin keila kaventuu.
2. Vähentämällä pohjakohinan tasoa kapeammalla hetkellisellä kaistanleveydellä. Tällöin todennäköisyys, että vastaanotin on lähetteen taajuudelle pienenee

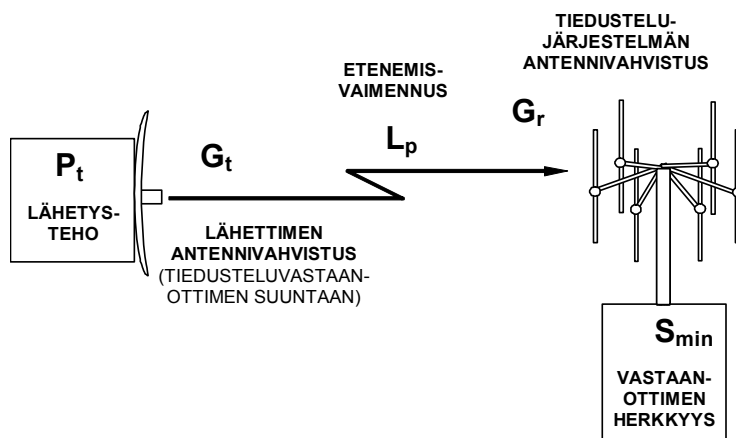
Ikkunafunktion osalta sieppaustodennäköisyyttä voidaan kasvattaa:

1. Leventämällä vastaanottimen hetkellistä sieppauskaistaa. Tällöin tiedusteluvastaanottimen pohjakohinan taso kasvaa.
2. Kasvattamalla vastaanotinantennin antennikeilaa. Tällöin tiedusteluvastaanottimen antennivahvistus pienenee.

Molemmat ikkunafunktion sieppaustodennäköisyyden lisäämiseksi käytettävissä olevat keinot johtavat tiedusteluvastaanottimelle saatavan signaalikohinasuhteen pienenemiseen ja siten ilmaisutodennäköisyyden vähenemiseen. Tiedustelujärjestelmän suunnittelussa on kyettävä saavuttamaan oikea suhde ikkunafunktion (signaalin sieppaus) ja signaalikohinasuhdevaati-
musten (signaalin ilmaisu) kesken. Kompromissi riippuu luonnollisesti tiedusteltavien järjestelmien luonteesta.

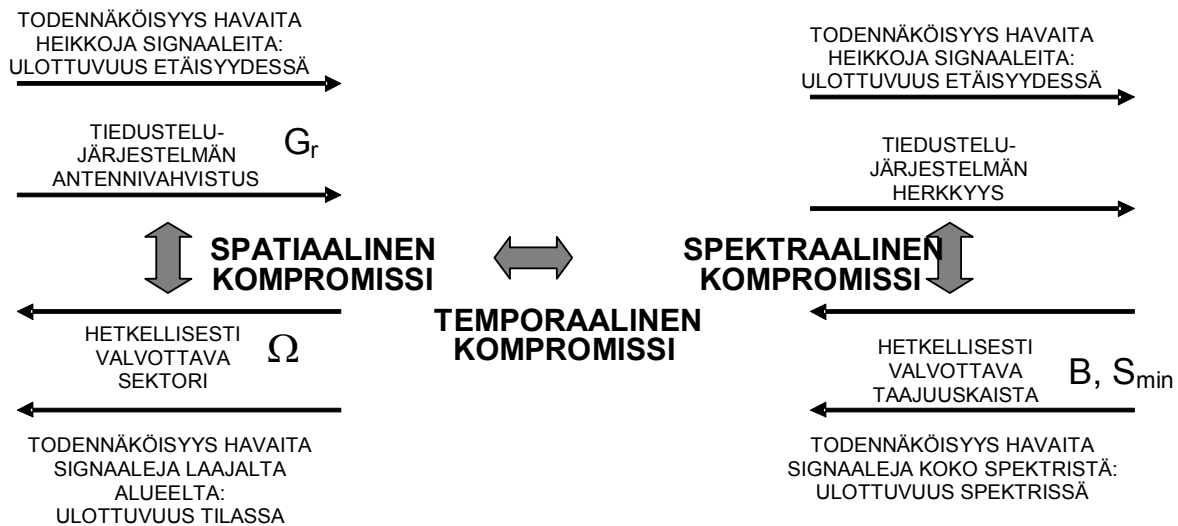
Tiedustelun ulottuvuus

Tiedustelun keskeinen ominaisuus on sen ulottuvuus, minkä tiedustelujärjestelmä pyrkii maksimoimaan ja vastaavasti tiedustelun kohteena oleva järjestelmä minimoimaan. Ulottuvuus riippuu tiedusteltavan ja tiedustelevan järjestelmän ominaisuuksista sekä lähettimen ja tiedusteluvastaanottimen välisestä etenemisreitistä.



Kuva 194: Tiedustelun ulottuvuus riippuu ensisijaisesti suurimmasta sallittavasta etenemisvaimennuksesta L_p , joka puolestaan riippuu lähettimen ERP-tehosta *tiedusteluvastaanottimen suuntaan* sekä tiedusteluvastaanottimen antennivahvistuksesta *lähettimen suuntaan* ja tiedustelujärjestelmän herkkyydestä.

Tiedustelun ulottuvuuden kannalta on olennaista, päästäänkö järjestelmää tiedustelemaan sen pääkeilasta, vai joudutaanko signaali sieppaamaan sivukeilasta, jonka taso saattaa olla 20-30 dB alle pääkeilan. Vastaavasti tiedustelujärjestelmän kannalta keskeistä on löytää oikea kompromissi valvottavan sektorin ja järjestelmän antennivahvistuksen kesken.: mitä laajempi hetkellisesti valvottava sektori on, sitä pienempi järjestelmän antennivahvistus on ja sitä lähemmäs järjestelmän on päästävä tiedusteltavaa kohdetta. Toisaalta antennivahvistuksen lisääminen kaventaa hetkellisesti valvottavissa olevaa sektoria ja saattaa siten pienentää hetkellistä havaitsemistodennäköisyyttä, jos tiedusteltava kohde lähettää vain hetkellisesti.



Kuva 195: Elektronisen tiedustelujärjestelmän mitoituksen kolme kompromissialuetta: spatiaalinen (hetkellisesti valvottavaan tilavuuteen liittyvä), spektraalinen (hetkellisesti valvottavaan taajuuskaistaan liittyvä) ja temporaalinen (käytettävissä olevaan aikaan ja hetkelliseen havaitsemistodennäköisyyteen liittyvä).

Vastaava kompromissi on löydettävä myös sieppaustodennäköisyyden ja hetkellisen valvottavan taajuusalueen osalta: mitä laajempi hetkellinen kaista on, sitä todennäköisemmin vastaanotin on oikealla taajuusalueella lähettimen aktivoituessa, mutta vastaanottimen herkkyys on pienempi laajan kaistan myötä nousseen pohjakohinatasen vuoksi.

Kuva 195 esittää elektronisen tiedustelujärjestelmän mitoitukseen ja suunnitteluun liittyvää problematiikkaa; on löydettävä sopivat kompromissit

- a) hetkellisesti valvottavissa olevan tilan ja järjestelmän ulottuvuuden väliltä: mitä suurempi kantama halutaan, sitä pienempi on tiedustelujärjestelmän antennin pääkeila ja sitä pienempää tilaa järjestelmä kykenee hetkellisesti valvomaan.

$$\text{Perustuu kaavaan } G \approx \eta \frac{4 \cdot \pi}{\theta \cdot \phi}$$

Jos antennin keila (atsimuuttitasossa θ ja elevaatiotasossa ϕ) on pienempi kuin valvottava tila ($\theta\phi=\Omega$), joudutaan antennia keilaamaan mekaanisesti tai elektroni-

- b) hetkellisesti valvottavissa olevaan taajuuskaistan ja herkkyyden välillä: mitä laajempi vastaanottimen hetkellinen taajuuskaista on, sitä laajempi on kohinakaista ja vastaanottimelle pääsevä pohjakohinataso.

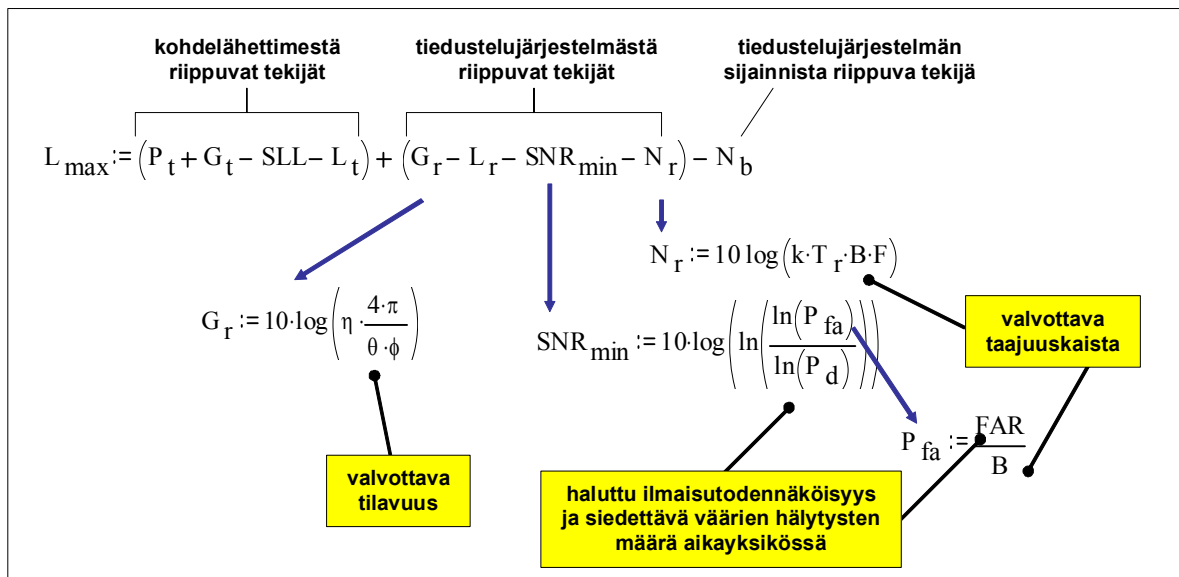
$$N = N_o \cdot B$$

Perustuu kaavaan

Jos hetkellinen taajuuskaista on pienempi kuin koko valvottava kaista, joudutaan vastaanottimen kulloinkin valvomaa taajuusaluetta muuttelamaan lähetteiden etsimiseksi, esimerkiksi pyyhkäisemällä hetkellistä taajuusaluetta yli koko valvottavan kaistan.

- c) hetkellisesti valvottavissa olevaan spatiaaliseen ja spektraaliseen ulottuvuuteen suhteessa vaadittavaan havaitsemistodennäköisyyteen vaaditussa ajassa: mitä kapeampi spektraalinen tai spatiaalinen ulottuvuus on, sitä pidempään järjestelmällä kuluu tietyn havaitsemistodennäköisyyden saavuttamiseksi.

Näiden tekijöiden fysikaalista taustaa hahmotetaan kuvassa 196. Tarkempaa analyysiä varten lukijaa kehoitetaan tutustumaan *tietoliikennejärjestelmät*-luvussa esitettyihin linkkibudjetin ja etenemisvaimennuksen kappaleisiin sekä liitteessä 2 esitettyyn analyysiin signaalin havaitsemistodennäköisyydestä.



Kuva 196: Tiedustelujärjestelmän ulottuvuuden keskeinen tekijä on suurin mahdollinen etenemisvaimennus lähettimeltä tiedusteluvastaanottimelle (L_{\max}). Se määräytyy tiedusteltavan järjestelmän ominaisuuksien lisäksi sekä tiedustelujärjestelmän ominaisuuksista että sen sijoituspaikan ominaisuuksista (erityisesti taustakohinan tasosta N_b).

Kohdejärjestelmän tärkein parametri on sen tiedustelujärjestelmän suuntaan säteilemä EIRP-teho. Tiedustelujärjestelmän häviöt ja toimintalämpötila sekä kohinaluku ovat paljolti teknologian tasosta riippuvia, eivätkä niinkään tilanteen mukaisesti valittavia. Tämän vuoksi keskeiset järjestelmäsuunnittelussa määriteltävät parametrit ovat:

1. Hetkellisesti valvottava tilavuus (avaruuskulma $\Omega = \theta \phi$, kuvassa kulmat radiaaneina).

2. Haluttu ilmaisutodennäköisyys P_d ja suurin sallittu värien hälytysten todennäköisyys P_{fa} , joka määräytyy suurimmasta siedettävissä olevasta värien hälytysten lukumäärästä aikayksikköä kohti (FAR, False Alarm Rate).
3. Hetkellisesti valvottava taajuuskaista.

Signaalin havaitsemistodennäköisyyteen liittyvää problematiikkaa on havainnollistettu liitteessä 2 *Signaalin havaitsemistodennäköisyyden laskeminen*.

Havaitsemisen virhelähteet

Elektronisen tiedustelun virhelähteet voidaan jakaa järjestelmävirheisiin ja olosuhdevirheisiin. Molempia voidaan vähentää huolellisella suunnittelulla ja virhelähteistä aiheutuvien epätarkkuuksien hallinnalla. Suurimmat olosuhdevirheet aiheutuvat asemapaikan valinnasta. Järjestelmävirheitä aiheuttavat:

- Virheet tiedusteluantennin suuntaavuudessa, vahvistuksessa, keilanleveydessä, korkea sivukeilataso, matala etu/taka-suhde ja suuntaavilla antenneilla pääkeilan osoitus-tarkkuus. Ympärisäteilevien antennien tai antenniryhmien tarkkuuteen vaikuttaa pääosin säteilykuvion tasaisuus sekä vahvistus.
- Vastaanottimen radiotekniset parametrit, kuten peilitaajuusvaimennus, kohinaluku, välitaajuussuodattimien hyvyys ja videokaistanleveyden suhde RF-kaistanleveyteen.
- Aika- sekä taajuusreferenssien tarkkuus, stabiilisuus ja niiden ryömintä.

Nyky aikaisten tiedustelujärjestelmien tekninen taso on niin korkea, että havaitsemisen, suuntimisen ja analysoinnin dominoiviksi virhelähteiksi syntyvät asemalla toimivan henkilöstön suorituskyky (tekninen osaaminen, motivaatio, väsymystila yms. seikat) sekä asemapaikan ominaisuudet. Toisin sanoen järjestelmän teoreettinen tekninen tarkkuus on huomattavasti suurempi kuin luonnollisista ja inhimillisistä virhelähteistä aiheutuvat epätarkkuudet. Henkilöstön koulutustason merkitys on suurin signaalin analysoinnissa ja luokittelussa, joka yhä edelleen perustuu suurelta osin ihmisen avustamaan tietokoneprosessiin – tai on osittain manuaalista. Asemapaikan oikealla valinnalla vähennetään monitie-etemisestä sekä lähellä sijaitsevista häiriölähteistä aiheutuvia virheitä. Teoriassa tiedusteluasema tulisi perustaa aina korkean mäen huipulle muista maastonkohdista heijastuvien signaalien vaikutuksen minimoimiseksi. Asemapaikan perustaminen voimalinjojen, teollisuusalueiden, junaratojen tai radiomastojen läheisyyteen ei ole suotavaa, koska nämä kaikki nostavat pohjakohinatasoa useilla desibeleillä. Tällöin pienitehoisten signaalien havaitsemistodennäköisyys pienenee ja vika-hälytysten määrää kasvaa. Käytännössä asemapaikan valinnassa joudutaan ottamaan huomioon sekä omien joukkojen että vihollisen ryhmitys ja niiden muutokset, minkä vuoksi tiedusteluasema joudutaan usein sijoittamaan muualle kuin teknisesti parhaaseen paikkaan.

Elektroninen tuki, ES

ESM-järjestelmä (Electronic Support Measures²³) on tarkoitettu keräämään sähkömagneettisesta spektristä informaatiota taistelevien joukkojen hyväksi. Yhdessä muiden tiedustelutieto-

²³ Vaikka elektronisen sodankäynnin termistössä elektroninen tuki (ES) onkin korvannut termin elektroniset tukitoimet (ESM, Electronic Support Measures), jälkimmäistä käytetään edelleen varsin usein puhuttaessa elektronisen tuen järjestelmistä.

jen kanssa tämä informaatio auttaa yhtymän johtoa tekemään oikeita päätöksiä käytettävästä taktiikasta ja joukkojen sijoittamisesta sekä mahdollistaa taistelun kulun seuraamisen myös sähkömagneettisen spektrin kautta. ESM-järjestelmien tuottamaa tietoa voidaan hyödyntää myös suoraan taistelun käymiseen, esimerkiksi ilma- ja panssarintorjunnan uhkasuuntien ja uhan luonteen määrittelyssä. ESM-järjestelmien pääasiallinen tehtävä on kuitenkin tietojen kerääminen yhtymän ja ylempien johtoportaiden tilannekuvan luomiseksi ja ylläpitämiseksi. Koko yhtymää tukeva ESM-järjestelmä voi koostua erityyppisistä sensoreista, jotka käyttävät hyväkseen spektrin eri osia. Näiden eri sensoreiden tuottamat tiedot kootaan sensorifuusion avulla yhtenäiseksi tilannekuvaksi.

ESM-järjestelmän päätehtävänä on kerätä mahdollisimman paljon informaatiota taistelukentällä olevista vihollisen sähkömagneettista spektriä käyttävistä järjestelmistä. Koska ESM-järjestelmillä havaitaan vain järjestelmien läheteitä, niillä kyetään tiedustelemaan vain aktiivisia järjestelmiä passiivisten ase-, viesti- ja sensorijärjestelmien jäädessä havaitsematta. ESM-järjestelmien kohteina ovat perinteisesti olleet lähinnä tutka- ja viestijärjestelmät, mutta digitaalisella taistelukentällä tietoja voidaan kerätä myös lukuisista muista järjestelmistä, kuten radiomajakoista ja transpondereista, omatunnistusjärjestelmistä, tutkavalaisujärjestelmistä (puoliaktiiviset ohjusjärjestelmät ja säteenseuraajaohjukset), sääluotainkalustoista sekä erilaisista radionavigointijärjestelmistä. ESM-järjestelmän antamia tietoja voidaan yhdistää esimerkiksi akustisen tiedustelujärjestelmän tietoihin. Tällöin esimerkiksi helikoptereita ja tuliyksiköitä voidaan paikantaa passiivisilla järjestelmillä myös silloin kun ne eivät emittoi sähkömagneettiseen spektriin.



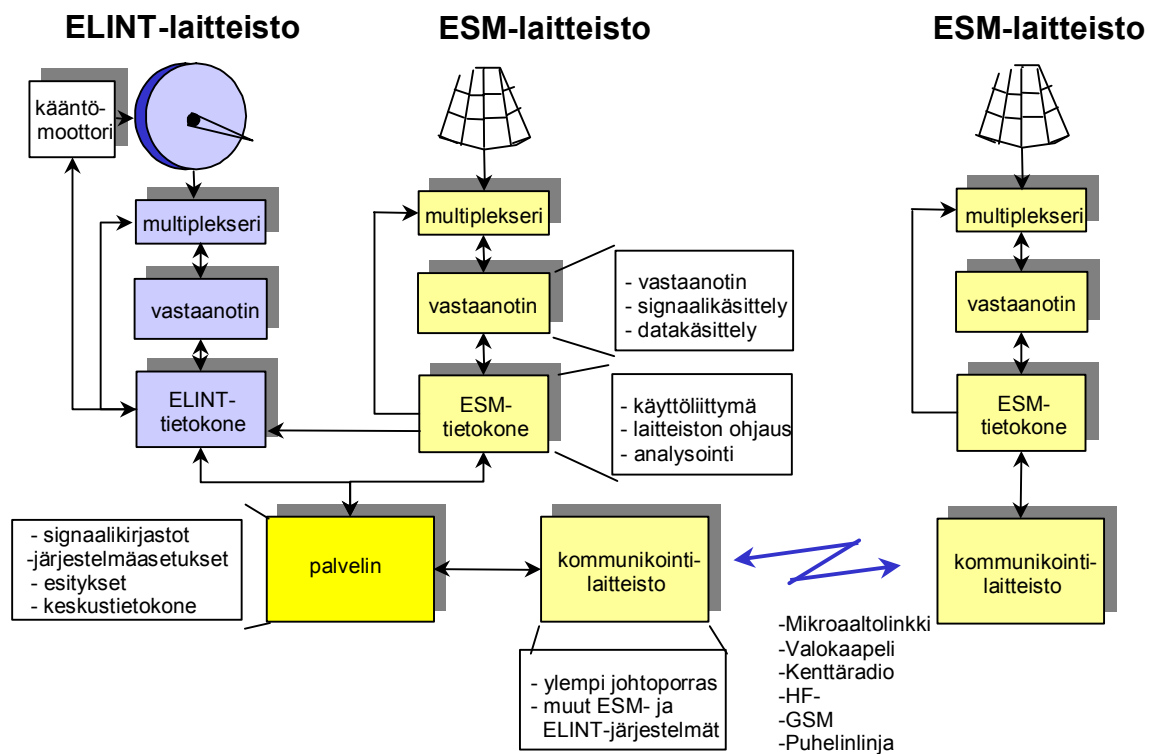
Kuva 197: Elektroninen tuki tuottaa olennaisen osan rauhanturvaoperaatioissa tarvittavista tiedustelutiedoista. [Rohde & Schwarz]

Elektroninen tiedustelu, ELINT

ELINT-järjestelmän (Electronic Intelligence) tarkoituksena on kerätä informaatiota vihollisen järjestelmistä ja tuottaa tietoa ESM-järjestelmille signaalien luokitteluun tarvittavista parametreista. Lisäksi järjestelmän tavoitteena on elektroniseen hyökkäykseen ja vastatoimenpiteisiin liittyvien parametrien selvittäminen. Elektronisen tiedustelun järjestelmien signaalikirjastot sisältävät vihollisen järjestelmien signaalien luokitteluun ja vastatoimenpiteiden käynnistämiseen tarvittavat parametrit. Elektronisia signaalikirjastoja kootaan jo rauhan aikana. Koska tiedustelu tehdään rauhan aikana maan rajojen sisäpuolelta tai kansainväliseltä merialueelta käsin, keskittyy se luonnollisesti kauaksi eteneviin signaaleihin, kuten HF- ja VHF-radiolähetteisiin sekä tutkasignaaleihin.

Järjestelmäkokonaisuus

ELINT- ja ESM-järjestelmät voivat toimia itsenäisesti, kuten edellisessä kappaleessa todettiin, mutta järjestelmistä saavutetaan paras hyöty, jos ne tukevat toisiaan. Sotilaselektronikkajärjestelmissä käytetään yleisesti rauhantilan ja sodan aikana erilaisia parametreja (kuten toimintataajuus, taajuuden vaihtonopeus, salausta yms.) rauhanaikaisen signaalitiedustelun vaikeuttamiseksi. Kriisitilanteessa otetaan käyttöön niin sanotut sotamoodit (war mode). Tämän vuoksi ESM-järjestelmien rauhanaikaiset signaalikirjastot ovat riittämättömät, ja niitä on täydennettävä ELINT-järjestelmiltä saatavilla tiedoilla. Osa parametreista ei muutu siirryttäessä rauhanajan valmiudesta sotatilaan. Esimerkiksi kenttäradion käyttämä taajuusalue pysyy samana, mutta hajaspektritekniikkaa ei ole välttämättä käytetty rauhan ajan harjoituksissa tai sen valesatunnaista hyppykoodia voidaan muuttaa kriisin puhjetessa.



Kuva 198: Lohkokaaviokuva ELINT/ ESM-järjestelmästä.

Taktinen tiedustelujärjestelmä koostuu yleensä muutamasta ELINT-laitteistosta, jotka analysoivat taistelukentällä olevia signaaleja sekä päivittävät signaalikirjastoja ja useammasta (2-5 kappaletta) ESM-laitteistosta, jotka käyttävät signaalikirjastoista saamiaan tietoja taistelukentän tilannekuvan luomiseen havaitsemalla, luokittelemalla, suuntimalla sekä paikantamalla vihollisen lähteitä.

Tavallisesti järjestelmäkokonaisuuden keskusasemana on ELINT-järjestelmä, jonka yhteyteen on sijoitettu myös yksi ESM-yksikkö. Ne pyritään integroimaan samaan ajoneuvoon tai siirrettävään konttiin. Laitteistojen ja ohjelmistojen keskinäistä integrointia suurempi ongelma on sijoittaa integroidun järjestelmän antennit samaan mastoon. Tämä voidaan ratkaista esimerkiksi niin, että ELINT-antennit ja niiden kääntömootori asennetaan kontin tai ajoneuvon yhteydessä olevaan mastoon ja ESM-antennit sijoitetaan erillisessä perävaunussa olevaan mastoon. ESM-perävaunun tiedustelujärjestelmiä voidaan kauko-ohjata radio- tai johdinyhteyksillä johtoasemasta, millä mahdollistetaan useiden miehittämättömien ESM-järjestelmien liittäminen keskusasemaan. Tämä kuitenkin vaatii useita ajoneuvoja. Toisena vaihtoehtona on käyttää riittävän suurta mastoa, johon asennetaan kaikki antennit, esimerkiksi kuvan 199 mukaisesti.



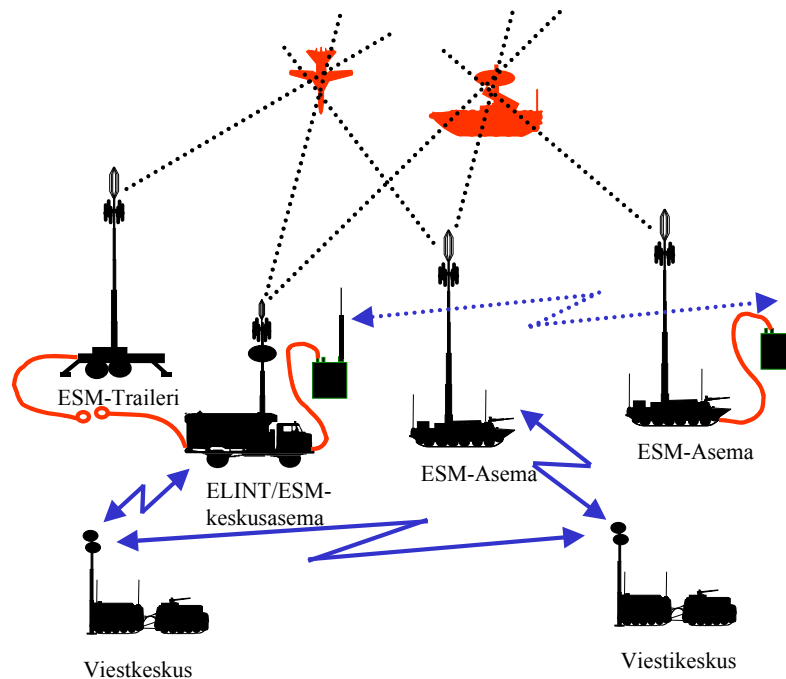
Kuva 199: ELINT- ja ESM-asemien mastoissa korkeataajuisimmat antennit asennetaan yleensä ylimmiksi. Saksalaisen EADS:n valmistama ESM-antenni. [EADS Ewation]

ELINT/ESM-järjestelmäkokonaisuus toimii niin, että ESM-asetat valvovat haluttua taajuusaluetta ja suuntivat sekä luokittelevat havaittuja signaaleja signaalikirjastossa olevien luokittelutietojen mukaisesti. Havaitut signaalit tallennetaan ESM-järjestelmän omaan tietokantaan, josta ne kootaan keskusaseaman palvelimen tietokantaan, jossa ESM-asetilta saatujen suuntimistulosten perusteella lasketaan lähetinten sijainnit. Mikäli ESM-järjestelmä ei onnistu signaalin tunnistuksessa, se suorittaa esianalysoinnin ja ilmoittaa tunnistamattomasta lähteestä ELINT-asetalle. Jos tunnistamaton signaali on edelleen olemassa, suuntaa ELINT-laitteisto antenninsa sitä kohti ja suorittaa tarkemman analysoinnin. Muussa tapauksessa analysointi suoritetaan tallennetusta näytteestä.

Analysoitavat signaaliparametrit

Elektronisen tiedustelun on kyettävä havaitsemaan, paikantamaan ja tunnistamaan sekä mahdollisuuksien mukaan yksilöimään taistelukentällä toimivat vihollisen lähettimet. Havaitseminen edellyttää vain muutaman parametrin mittaamista – esimerkiksi signaalin keskitaajuuden ja tason. Paikantamiseen tarvitaan myös signaalin tulosuunnan – ja usein

lähetyksajan – määrittäminen. Lähettävän järjestelmän tunnistaminen läheteestä edellyttää tätä useampien parametrien mittaamista ja analysointia. Lähettimen luokittelu puolestaan edellyttää vielä useampien parametrien mittaamista sekä tunnistamista ja paikantamista parempaa mittaustarkkuutta.



Kuva 200: ELINT/ESM-järjestelmäkokonaisuus analysoi, luokittelee, suuntii ja paikantaa taistelukentällä havaitut vihollisjärjestelmät. Näiden tietojen perusteella muodostetaan tilannekuva taistelun vaiheesta sekä vastassa olevista joukoista. Osajärjestelmien integroituminen yhtenäiseksi kokonaisuudeksi voidaan toteuttaa mikroaaltolinkkien, taktisen kenttätelejärjestelmän, kenttäradioiden tai optisten yhteyksien avulla.

Kaikista radioläheteistä voidaan periaatteessa mitata ja analysoida ns. perusparametrit

- signaalin keskitaajuus
- signaalin tulosuunta
- signaalin amplitudi ja sen vaihtelu ajan funktiona
- lähetteen polarisaatio
- signaalin kaistanleveys
- läheteessä käytetty modulaatiotyyppi ja symbolinopeus sekä modulointiparametrit, kuten taajuusdeviaatio, modulaatiosyvyys tai symbolinopeus digitaalisissa läheteissä

Pulssimuotoisista läheteistä, kuten pulssitutkista ja taajuushypintäjärjestelmistä, voidaan edellä mainittujen lisäksi mitata

- pulssin tuloaika (havaintohetki)
- pulssin pituus
- pulssin toistotaajuus (PRF) ja toistoväli (PRI)
- pulssin ominaisuuksien (pituus, PRF) vaihtelu
- pulssin nousunopeus, pituus ja laskunopeus
- pulssin sisäinen modulaatio

Vakionopeudella pyörivistä antenneista voidaan lisäksi mitata

- antennin pyörimisnopeus
- antennin pääkeilan leveys
- antennin sivukeilatase
- antennin etu/takasuhde

Järjestelmä:	Portable Signal Collection System	Järjestelmä:	WB-2000-6
Valmistaja:	Wide Band System inc.	Valmistaja:	S.T. Research Corporation
Käyttötarkoitus:	SIGINT	Käyttötarkoitus:	SIGINT
Taajuusalue:	500 MHz – 18 GHz	Taajuusalue:	500 MHz – 18 GHz
Suurin pulssitiheys:	4 miljoonaa pulssia / s	Suurin pulssitiheys:	1,5 miljoonaa pulssia / s
Suurin lähetintiheys		Suurin lähetintiheys:	500
Antenni:	ympärisäteilevä/pyöritettävä	Antenni:	monopoli
Näkökenttä:	360 °	Näkökenttä:	360 °
Vastaanotin	IFM / superhetero	Vastaanotin:	superhetero
Herkkyys	-65 dBm	Herkkyys:	- 75 dBm
Järjestelmä:	HFX-1000	Järjestelmä:	Sigma
Valmistaja:	Southwest Research Corp.	Valmistaja:	Daimler-Benz Aerospace
Käyttötarkoitus:	COMINT	Käyttötarkoitus:	taistelukentän ESM / DF
Taajuusalue:	2-30 MHz (HF)	Taajuusalue:	1 MHz – 3 GHz
Antenni:	monopoli / kehä	Antenni:	dipoli Adcock / kehä
Näkökenttä:	360 °	Näkökenttä:	360 °
Vastaanotin	rinnakkainen superhetero	Vastaanotin:	DSP-pohjainen
Herkkyys	1 μ V/m *	Herkkyys:	kohinaluku 11 dB
DF-periaate	apertuurivaihteinterferometri		
Järjestelmä:	CS-5060	Järjestelmä:	SCR-2900DF
Valmistaja:	Condor Systems Inc.	Valmistaja:	Andrew SciComm
Käyttötarkoitus:	taktinen ELINT/ESM	Käyttötarkoitus:	ELINT
Taajuusalue:	0,5 – 18 GHz	Taajuusalue:	0,5 – 18 GHz
Suurin pulssitiheys:	2 miljoonaa pulssia / s	Suurin pulssitiheys:	2,5 miljoonaa pulssia / s
Suurin lähetintiheys	1024	Suurin lähetintiheys:	valmistajan ilm. ääretön
Antenni:	ympärisäteilevät / pyöritettävä	Antenni:	ympärisäteilevä / pyöritettävä
Näkökenttä:	360 °	Näkökenttä:	360 °
Vastaanotin	IFM / superhetero	Vastaanotin:	superhetero
Herkkyys	- 85 dBm	Herkkyys:	90 dBm

• HF-alueella ulkoinen kohina määrää pienimmän havaittavan signaalin, ei vastaanottimen herkkyys.

Taulukko 11: Esimerkkejä erilaisten signaalitiedustelujärjestelmien ominaisuuksista.

Lähde: Don Herskovitz: A Sampling of SIGINT Systems. Journal of Electronic Defence December 1996.

Pyörivän antennin säteilykuvion vaihtelun perusteella voidaan laskea antennin isotrooppinen vahvistus. Elektronisesti keilaavien antennien säteilykuvion mittaaminen ei ole mahdollista, mikäli keilaus perustuu valesatunnaiseen algoritmiin.

Lähettimen tunnistaminen perustuu läheteestä mitattujen perusparametrien avulla tehtävään luokitteluun. Lähettimen yksilöinti on kaikkein vaativin mittausta, joka voidaan toteuttaa tiedusteltavasta lähteestä riippuen erilaisilla sormenjälkianalyysillä. Sormenjälkianalyysi perustuu lähettimien yksilöllisiin eroihin, jotka toistuvat jokaisessa läheteessä. Lähetteen sormenjälkianalysointi sekä yksilöinti voidaan mitata esimerkiksi:

- Lähettimen oskilloinnista, kun taajuus vaihtelee ennen kuin se on lukkiutunut ja varsinaisen hyötyinformaation lähetys voidaan aloittaa.
- Lähettimen tehon nousuajasta lähetyksen alussa ja lopussa.
- Lähetteen moduloinnin ja kantoaallon loppumishetkestä lähetteen lopussa.
- Muista lähetyksen aikana toistuvista kytkentäpiikeistä.



Kuva 201: Tietokoneella luotu kuva tiedustelujärjestelmästä, joka on asennettu suomalaisen Patria Vehicles:n AMV-panssariajoneuvon alustalle. [Patria Vehicles]

Seuraavassa käydään läpi eri mitattavat parametrit sekä niin merkitys signaalin luokittelussa.

Taajuus

Nykyaikaisissa tiedustelujärjestelmissä taajuus mitataan signaalin havaitsemisen yhteydessä, joten taajuuden mittaamiseen ei kulu ylimääräistä aikaa. Signaalin taajuusalueen perusteella voidaan päätellä, minkälainen järjestelmä mahdollisesti on kyseessä. Esimerkiksi tutka-taajuuksilla L- ja S- kaistoilla on lähinnä valvontatutkia kun taas ylemmillä C-, X- ja Ku-kaistoilla valvonta- ja seurantatutkia. Tätä ylemmillä kaistoilla ovat maalinosoitus- navigointi-, seuranta- ja hävittäjätutkat, ja kaikkein lyhyimmillä aallonpituuksilla ohjusten hakupäät. Länsimaiset kenttäradiot toimivat vakiodulla 33 - 88 MHz:n taajuusalueella. Varsovan Liiton kenttäradiot toimivat osittain samalla taajuusalueella, mutta niiden kaista on yleensä hieman pienempi tai se alkaa matalammalta.

Taajuuden mittaustarkkuus riippuu olennaisesti tiedusteluvastaanottimen tyypistä. Eri vastaanottimien taajuustarkkuus voi vaihdella 0,01 - 10 % välillä. Perinteisesti IFM-vastaanottimella se on noin 1% kun superheterovastaanottimella päästään alle 0,5% tarkkuuksiin.

Suunta

Suuntimisella mitataan lähetteen tulosuunta (bearing, AOA, Angle Of Arrival tai DOA, Direction of Arrival) tiedusteluantenniin nähden. Kun tämä tieto yhdistetään antennin ja tiedusteluajoneuvon tms. lavetin pohjoissuuntaan, saadaan lähetteen maantieteellinen tulosuunta. Siten suunnan mittauksen tarkkuutta arvioitaessa on otettava huomioon suuntimismenetelmän tarkkuuden lisäksi antennin sekä lavetin suuntatarkkuus.

Tuloaika

Tuloaika (TOA, Time Of Arrival) on yksi tärkeimpiä mittaussparametreja, sillä sen perusteella eri asemilta saadut tulokset yhdistetään ja synkronoidaan kohteen paikantamiseksi. Aika tulee yleensä kyetä mittaamaan vähintään 100 ns tarkkuudella lähetteen luokittelun mahdollistamiseksi ja riittävän paikannustarkkuuden saavuttamiseksi. Tällöin aseman taajuusnormaaliksi riittää erittäin hyvin esimerkiksi C/A-koodia (Coarse Acquisition) käyttävä DGPS-vastaanotin (Differential Global Positioning System) tai NATOn sotilaskoodia (P-koodi) käyttävä GPS-vastaanotin.

Periaatteessa absoluuttisen ajan mittaaminen ei ole tarpeellista asemien synkronoinnin toteuttamiseksi. Tahdistaminen voidaan toteuttaa myös tarkkoilla ja stabiileilla aika- ja taajuusnormaaleilla, jotka keskusasema kalibroi tarpeellisiin väliajoin. Tämä ratkaisu toimii erittäin hyvin silloin kun asemat yhdistetään toisiinsa johdinyhteyksillä, jolloin kalibrointisignaali ei synnytä ylimääräistä paljastumisen uhkaa. Mikäli asemien välinen kommunikointi toteutetaan radiolähetteellä on absoluuttisen ajan käyttö perusteltua. Toisaalta suhteellinen ajan mittaaminen ei mahdollista syystä tai toisesta irrallaan olevan osajärjestelmän toimintaa, jolloin jälkikäteen tapahtuva tietokantojen yhdistäminen on mahdotonta.

Amplitudi

Signaalin amplitudi pyritään mittaamaan ensimmäisen havainnon yhteydessä. Amplitudi antaa approksimaation tiedusteltavan kohteen etäisyydestä lähetystehon ja antenni-vahvistuksen tulona, mikäli radioaaltojen eteneminen kyetään mallintamaan riittävällä tarkkuudella. Näiden kahden parametrin tulo kertoo lähetteen isotrooppisen tehon, jonka perusteella lähetintyyppi voidaan alustavasti luokitella. Lähetteen amplitudin muutoksia voidaan käyttää luokittelutietona. Tämä perustuu siihen, että erilaisilla lähettimillä lähetysteho nousee ja laskee lähetyksen alkaessa ja päättyessä hieman eri tavoin.

Kaistanleveys

Signaalin kaistanleveys tarkoittaa sitä taajuuskaistaa, jolle lähetteen energia on levinnyt. Kaistanleveydestä voidaan päätellä, onko kyseessä perinteinen kapeakaistainen lähete vai kohinan sekaan piiloutuva hajaspektrilähete. Siitä voidaan myös joissakin tapauksissa tehdä johtopäätöksiä esimerkiksi tutkan erottelukyvystä tai viestijärjestelmän siirtokapasiteetista.

Modulaatio

Modulaatiota voidaan käyttää lähetteen tyyppin luokitteluun esimerkiksi analogiseen ja digitaaliseen. Modulaatio kertoo lisäksi jotakin signaalin käyttötarkoituksesta: siirtyvissä maajärjestelmissä käytetään yleensä FSK:ta, GSM:ssä GMSK:ta, langattomissa digitaalisissa puhelimissa QPSK:ta jne.

Polarisaatio

Polarisaatio ei itsessään ole niin tärkeä luokitteluparametri kuin esimerkiksi taajuus tai suunta. Lähetteen polarisaatio on kuitenkin tiedettävä elektronisen hyökkäyksen optimoimiseksi tai elektronisen suojautumisen valmistelemiseksi.

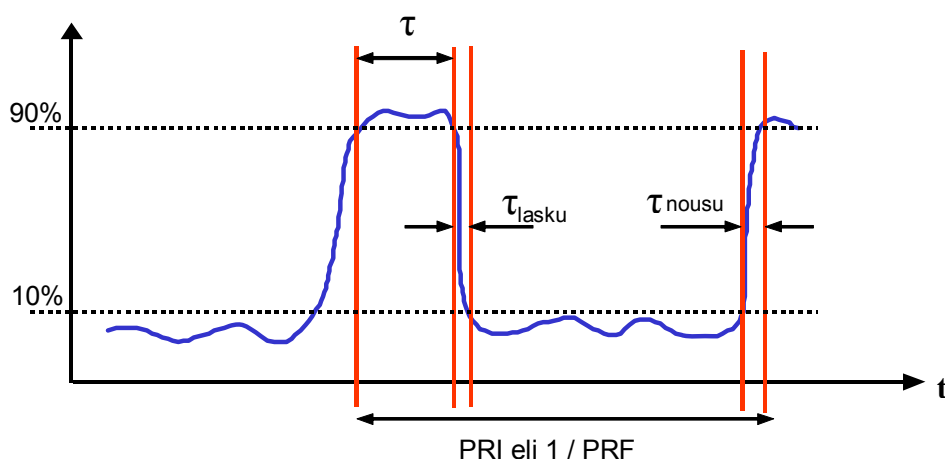
Pulssintoistotaajuus

Pulssintoistotaajuus PRF ja pulssin toistoväli PRI mitataan yleensä vain tutkista. PRF:n yksikkö on hertsi ja PRI:n sekunti. PRF voidaan mitata myös purske- tai taajuushypintälähteistä, mikäli seuraavan lähetteen tuloaika halutaan ennustaa pulssimaisen häirinnän optimoimiseksi. Tutkatiedustelussa PRF:ää käytetään yhtenä luokittelun perusparametrina.

Lähetteen pituus, värähtely ja nousu- sekä laskuaika

Lähetteen pituuden perusteella voidaan erotella esimerkiksi tutkajärjestelmiä toisistaan, sillä pulssin pituus on normaalisti kiinteä järjestelmäparametri, joka voi kuitenkin muuttua toiminnan aikana. Tiedusteltaessa viestijärjestelmiä yksittäisen lähetteen pituuden perusteella voidaan arvioida, onko kyseessä datan tai puheen siirto. Datansiirrossa voidaan myös arvioida, onko kyseessä lyhyiden tulikomentojen tai maali-ilmoitusten lähetyksen vai pidempi käskyjen ja toimintaohjeiden tai tilanneilmoitusten lähetyksen.

Moduloinnin alkamisen jälkeistä tehoitiheyden muuttumista kutsutaan rippeliksi. Rippelin suuruus vaihtelee lähetintyyppien mukaan, joten sitä voidaan käyttää hyväksi lähettimen luokittelussa



Kuva 202: Signaalin nousu- ja laskuaikojen, lähetteen pituuden ja pulssintoistotaajuuden (PRF) sekä pulssin väliajan (PRI) määrittely.

Lähetteen nousuaika on se aika, joka kuluu signaalitason noustessa 10 %:n tehosiheydestä 90 %:iin. Vastaavasti laskuaika tarkoittaa lähetteen tason putoamista 90 % tasolta 10 %:iin²⁴. Nousu- ja laskuaikaa käytetään viesti- ja tutkatiedustelussa ns. sormenjalkianalysoinnissa, jolla pyritään yksilöimään lähetin ja seuraamaan sen liikkumista taistelukentällä. Esimerkiksi tutkajärjestelmissä käytettävien magnetroneiden nousuaika on huomattavasti pidempi kuin klystroneiden ja kulkuaaltoputkien tai puolijohdevahvistinten. Tietoa voidaan käyttää tiedustelussa hyväksi arvioitaessa tiedusteltavan järjestelmän tyyppiä ja ominaisuuksia, joista tärkein on elektronisen sodankäynnin kesto.

Keskitaajuuden vaihtelu

Keskitaajuuden vaihtelulla tarkoitetaan lähettimen ominaisuutta värähdellä ennen kuin lähetyspiiri on lukkiutunut asetetulle taajuudelle. Hyötylähetettä ei voida aloittaa ennen lähetyspiirin lukkiutumista. Lähetystaajuuden värähtely on laitetyypistä ja yksilöstä riippuva hyvin yksilöllinen piirre, jota käytetään sormenjalkianalyysissa.

Keilanleveys, säteilykuvio ja antennivahvistus

Tiedusteltavan kohteen antennin säteilykuvioista voidaan saada erittäin paljon informaatiota. Suoraan mittaamalla saatavia parametreja ovat pää- ja sivukeilojen leveydet ja tasot, säteilykuvion pääkeilan suhde takakeilaan sekä säteilykuvion minimi. Näiden avulla voidaan laskea antennin vahvistus ja sen perusteella arvioida lähetysteho. Säteilykuvion mittaukseen tarvittavan ajan pituus sekä signaalitason satunnaiset vaihtelut aiheuttavat ongelmia ja rajoittavat menetelmän käyttökelpoisuutta. Mittaamiseen kuluva aika riippuu oleellisesti tiedusteltavan kohteen antennin keilausnopeudesta. ESM-järjestelmät eivät yleensä kykene mittaamaan säteilykuvioita pienen antennivahvistuksensa vuoksi. Tällainen mittaustiedustelu annetaan yleensä ELINT-järjestelmän tehtäväksi.

Oman ongelmansa muodostavat elektronisesti keilaavat antennit, joiden säteilykuvioita on käytännössä mahdoton mitata. Mikäli tutka pyyhkäisee atsimuuttitasossa mekaanisesti ja elevaatiotasossa elektronisesti, saattaa eri aikaan mitattujen säteilykuvioiden vertailu olla mahdollista. Antennin säteilykuvion mittaaminen on mahdollista vain mikäli antenni pyörii, mikä käytännössä tarkoittaa valvontatutkaa. Lentokoneiden IFF-antennit eivät pyöri samoin kuin viestijärjestelmien, seurantatutkan tai valaisututkan antennit, joten niiden säteilykuvioita ei voida mitata.

Vastaanottimet

Taistelukentällä käytetään hyväksi hyvin laajaa sähkömagneettista spektriä. Tämä edellyttää tiedustelujärjestelmiltä saman yhtä laajan taajuusalueen peittoa, jotta kaikista olemassa olevista signaaleista saataisiin maksimaalinen hyöty. Laajan taajuusalueen, suuren signaali- tiheyden sekä nykyaikaisen lähetystekniikan vuoksi vastaanottimilta vaaditaan yhä suurempaa tiedonkäsittelykapasiteettiä sekä suurempaa sieppauskaistanleveyttä. Tiedustelu-tietojen reaaliaikaisuusvaatimus edellyttää järjestelmiltä kykyä toimia samanaikaisesti useilla eri taajuuskaistoilla.

²⁴ Joissakin järjestelmissä nousu- ja laskuajan määrittely- ja mittauskriteerinä käytetään 50% tehotasoa (ns. 3dB taso), minkä vuoksi nousu- ja laskuajojen mittaamisen tai vaatimusmäärittelyn yhteydessä tulisi aina myös mainita, miten nämä ajat on määritetty.

Tiedusteluvastaanottimen tärkeimmät parametrit ovat *tietoliikennejärjestelmät* -luvussa esiteltyjen radioteknisten vastaanotinparametrien lisäksi:

- laaja valvottava taajuusalue
- eri taajuuksien signaalien samanaikainen havaitseminen tai suuri taajuusalueen pyyhkäisy nopeus
- suuri signaalien havaitsemistodennäköisyys ja pieni väärin hälytysten ilmenemistiheys
- havaittujen signaalien nopea varmentaminen ja signaaliparametrien analysointi
- signaaliparametrien, kuten taajuus ja tulosuunta, hyvä mittaustarkkuus
- kyky ilmaista, mitä modulaatiota läheteessä käytetään
- kyky mitata lähetteen polarisaatio

Tiedusteluvastaanottimen määrittelyssä tulisi käyttää aina toiminnallista herkkyyttä, jolla on välitön merkitys järjestelmän käytön kannalta. Toiminnallinen herkkyys riippuu laitteen pohjakohinasta ja pienimmästä sallitusta signaalikohinasuhteesta, kuten *tietoliikennejärjestelmät* -luvussa olevassa vastaanotinluvussa todettiin. Pienin sallittu signaali-kohinasuhde puolestaan riippuu:

1. Suurimmasta sallitusta väärin ilmaisujen määrästä aikayksikössä (FAR, False Alarm Rate), joka riippuu virheilmaisujen todennäköisyydestä P_{fa} ja RF-kaistan leveydestä B_{RF} :

$$FAR \approx P_{fa} \cdot B_{RF}.$$

Suurin sallittu FAR riippuu siitä, kuinka monta uutta lähetintä järjestelmä kykenee prosessoimaan aikayksikössä.

2. Järjestelmältä edellytetystä ilmaisutodennäköisyydestä P_d ja ilmaisuun käytettävässä olevasta ajasta t_d .
3. RF-kaistanleveyden (kaistanleveys ennen demodulaattoria) suhteesta videokaistanleveyteen (kaistanleveys demodulaattorin jälkeen) B_{RF}/B_V . Kuvassa 203 on esitetty signaali-kohinasuhdevaatimuksia eri B_{RF}/B_V -suhteella, kun $P_{fa}=10^{-6}$.

Esimerkki:

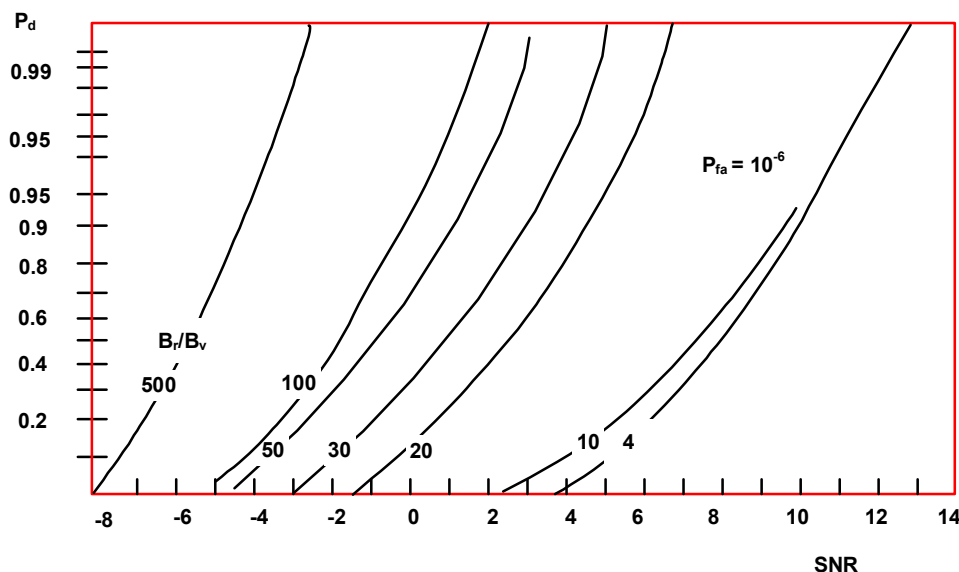
Vastaanottimen RF-kaistanleveys on 100 MHz ja videokaistanleveys 1 MHz. Vastaanottimen kohinaluku on 10 dB. Järjestelmältä edellytetään 99 % havaitsemistodennäköisyyttä ja vääriä havaintoja voidaan prosessoida korkeintaan 10 minuutissa.

Pohjakohinan taso on $N = k \cdot T \cdot B_{RF} \cdot F = -114 + 10 \lg 100 + 10 = -84$ dBm.

Väärin ilmaisujen esiintymistiheyden perusteella saadaan $P_{fa} = FAR / B_{RF} = 1,7 \cdot 10^{-9}$.

Tätä vastaava signaali-kohinasuhdevaatimus B_{RF}/B_V -suhteelle 100 on $SNR_{min} = 1$ dB.

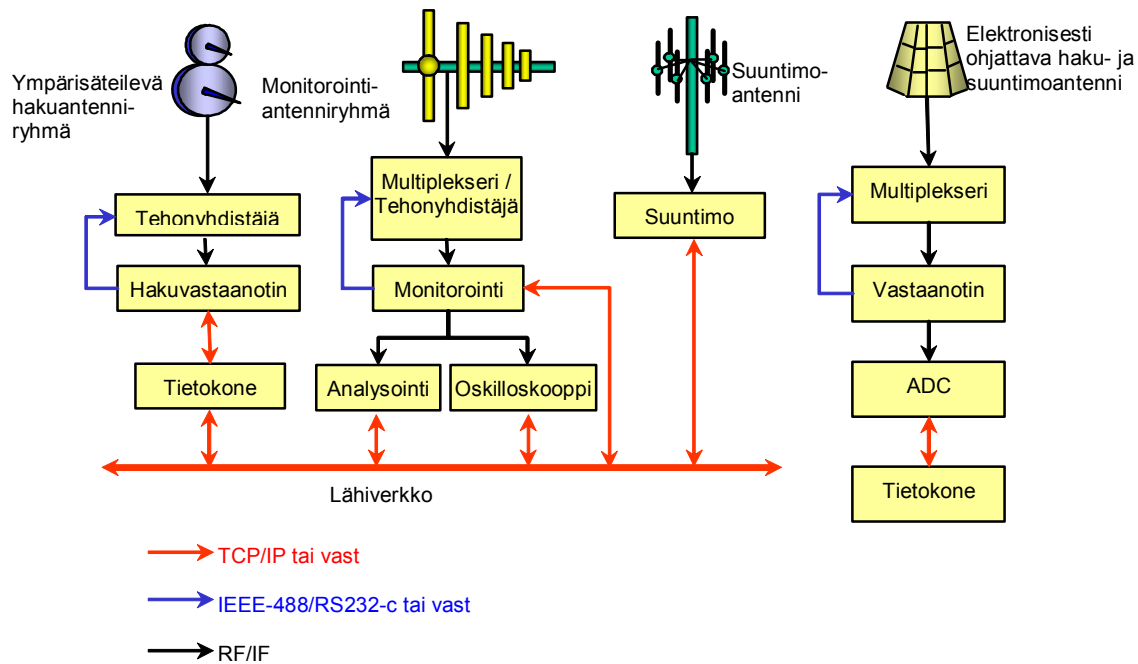
Tällöin vastaanottimen toiminnallinen herkkyys on $S_{min} = N + SNR_{min} = -83$ dBm.



Kuva 203: Saavutettava havaitsemistodennäköisyys signaali-kohinasuhteen funktiona eri B_{RF}/B_v -suhteilla.

Dynaaminen alue määritellään 1 dB:n kompressiopisteen ja pienimmän ilmaistavan signaalin erotuksena. Lähellä sijaitsevat tai suuritehoiset lähettimet edellyttävät järjestelmältä kykyä vastaanottaa ja käsitellä suuritehoisia signaaleita. Toisaalta kaukana sijaitsevien tai pienitehoisten signaalien havaitseminen edellyttää kykyä havaita samaan aikaan suuritehoisten signaalien kanssa myös hyvin pienitehoisia signaaleita. Määriteltäessä suurin vastaanotettavissa ja käsiteltävissä oleva signaaliteho, tulisi myös määritellä ne olosuhteet, joissa näin suuri signaali voidaan vastaanottaa. Olennaista on esimerkiksi se, tarkoittaako suurin signaaliteho yksittäistä signaalia vai päteekö se myös tilanteessa, jossa vastaanottimeen tulee useita suuritehoisia signaaleita.

ESM-järjestelmän tulee kyetä havaitsemaan laajalla taajuusalueella toimivat mahdollisesti hyvinkin lähellä toisiaan olevat signaalit. Tämä edellyttää järjestelmältä hyvää herkkyyttä, selektiivisyyttä ja dynamiikkaa sekä suurta pyyhkäisynopeutta ja hyvää suuntatarkkuutta. Vanhemmissa tiedustelujärjestelmissä tämä vaatimuskombinaatio on ratkaistu erillisillä hakuvastaanottimilla, suuntimoilla ja tarkkailuvastaanottimilla. Löydettyään uuden signaalin hakuvastaanotin ilmoittaa signaalin taajuuden tarkkailuvastaanottimelle sekä suuntimolle. Ilmoituksen jälkeen hakuvastaanotin jatkaa uusien taajuuksien hakemista samalla, kun suuntimo pyrkii suuntimaan edellisen signaalin ja tarkkailuvastaanottimeen kytketyt analysointilaitteet pyrkivät suorittamaan analysoinnin. Tämänkaltaisen laitteistokokoonpanon ongelmana on kuitenkin suhteellinen hitaus, koska järjestelmä kykenee sekä suuntimaan että analysoimaan vain yhden taajuuden kerrallaan. Mikäli analysointi- ja suuntimojärjestelmät ovat varattuna uuden signaalien löytyessä, saattaa sen käsittely jäädä kokonaan väliin tai vaihtoehtoisesti sitä ei enää ole olemassa, kun kyseiset järjestelmät vapautuvat edellisestä tehtävästä. Periaatteellinen ero vanhemman ja uudemman tiedustelujärjestelmän välillä nähdään kuvassa 204.



Kuva 204: Nykyaikainen integroitu ESM-järjestelmä vie huomattavasti vähemmän fyysistä tilaa, samalla kun se mahdollistaa lähes reaaliaikaisen havaitsemisen, suuntimisen sekä analysoinnin. Vanhemmissa järjestelmissä jokainen osatekijä suoritetaan erillisillä laitteistoilla, minkä vuoksi reaaliaikaisuus ja signaalin havaitsemistodennäköisyys on pienempi ja näin ollen analysoinnin tehokkuus laskee.

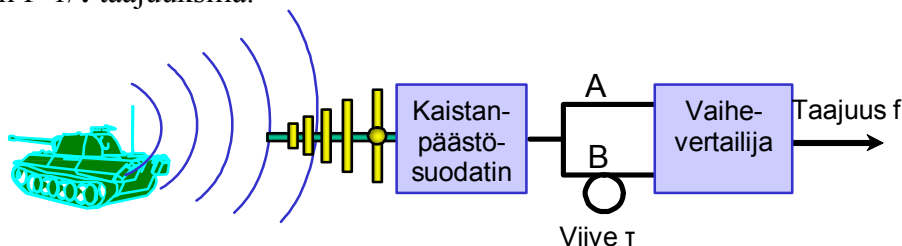
Nykytekniikalla ongelma ratkaistaan hieman eri tavalla. Yleisimmin käytetään useita rinnakkain toimivia ns. multirole-vastaanottimia, jotka on sovitettu halutulle taajuusalueelle niin, että ne peittävät sen kokonaan. Vastaanottimet toimivat samalla haku-, suuntimo- ja tarkkailukäytössä. Ne kytketään elektronisesti ohjattuun antenniryhmään joka kattaa koko atsimuuttitasen. Antenniryhmässä olevia elementtejä kytketään vuoron perään multiplekserin kautta samalla taajuusalueella toimiviin vastaanottimiin, jotka mittaavat uuden signaalin ilmestyessä perusparametrit, kuten tuloajan, taajuuden, amplitudin, suunnan sekä polarisaation. Samaan aikaan järjestelmä tallentaa digitaalisen näytteen hetkeä myöhemmin tapahtuvaa tarkempaa analysointia varten. Analysoinnin jälkeen mitatut parametrit yhdistetään samaan tietokantaan perusparametrien kanssa. Näin tiedustelutiedot kyetään saamaan lähes reaaliaikaisesti samalla kun järjestelmä havaitsee lähestulkoon kaikki havaitsemisetaisyydellä olevat signaalit. Etuna on myös tallennettu näyte jokaisesta lähettimestä, jotka voidaan säilyttää myöhempää käyttöä varten²⁵. Myös analogisissa tiedustelujärjestelmissä signaali voidaan tallentaa digitaalisella tai analogisella nauhurilla, jonka kaistanleveys on riittävän laaja signaalin tallentamiseksi.

IFM-vastaanotin

IFM-vastaanotin (Instantaneous Frequency Measurement) on laite, joka mittaa signaalin taajuuden vertailemalla vaihe-eroa suoran ja viivästetyn linjan välillä. Mikäli viivelinjan pituus on L , saadaan sen aiheuttamaksi vaihe-eroksi $\Delta\sigma = 2\pi L/\lambda$. Jos L valitaan sopivasti, voidaan taajuus mitata ulostulojen I (In-phase) ja Q (Quadrature) vaihe-erona.

²⁵ Kaikista havaituista signaaleista voidaan tallentaa esimerkiksi lyhyt n. 200 ms:n pituinen näyte, koska parametrejä ei välttämättä saada heti analysoidua. Tallentamisen etuna on myös se, että tunnistamattomat näytteet voidaan lähettää ELINT-asemalle lähetteen luokittelumiseksi.

Vastaanottimen taajuusalueen alapäässä vaihe-ero on 0° ja yläpäässä 360° . Vastaanottimen taajuusresoluutio riippuu viivelinjan viiveen pituudesta. Mitä pitempi viive on, sitä tarkempi taajuusresoluutio saavutetaan. Resoluution kasvattaminen kaventaa kuitenkin valvottavaa taajuusaluetta sillä viiveen aiheuttamaan vaihe-eroon perustuva mittausta ei anna yksikäsitteisiä tuloksia yli $f=1/\tau$ taajuuksilla.



Kuva 205: Signaalin taajuuden mittaamisen peruseriaate käyttämällä IFM-vastaanotinta (Instantaneous Frequency Measurement).

Signaalin vaihe-ero vaihevertailijassa on: $\Delta\theta = \omega \cdot \tau = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \tau$

Lähtetimen toimintataajuus voidaan laskea kaavasta

$$f = \frac{\Delta\sigma}{2 \cdot \pi \cdot \tau}$$

jossa $\Delta\sigma$ on vaihe-ero radiaaneina ja τ on viivelinjan viive. Suurin yksikäsitteinen mittaustaajuus (taajuus jolla spektri ei laskostu) riippuu viivelinjan viiveestä. Jos käytetään I- ja Q-ilmiasua, saadaan maksimitaajuudeksi:

$$f_{\max} := \frac{1}{\tau}$$

IFM-vastaanottimen taajuustarkkuus riippuu vaihevertailijan tarkkuudesta. Oletetaan, että vertailijan tarkkuus on α radiaania (rms). Tällöin taajuusresoluutio lasketaan kaavasta:

$$\Delta f = \frac{\alpha \cdot B}{2 \cdot \pi}$$

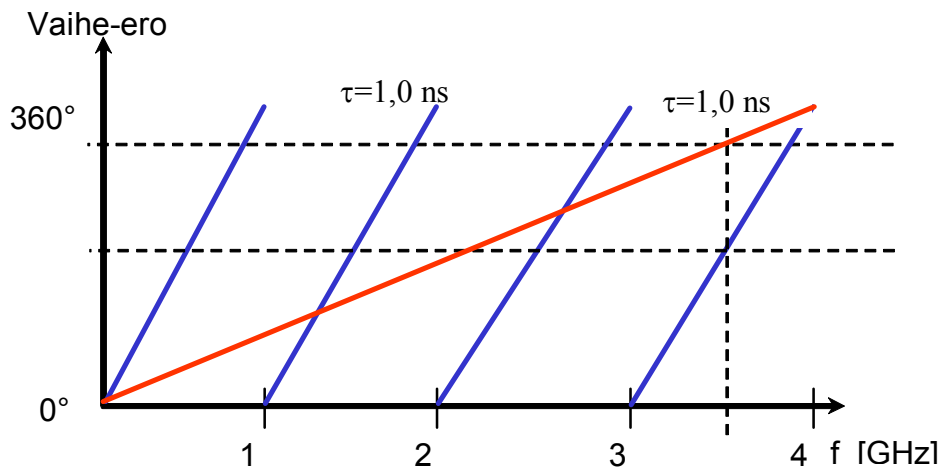
jossa B on vastaanottimen kaistanleveys. Vaihevertailijan tarkkuuden ollessa 1% ja kaistanleveyden ollessa 4 GHz, joka vastaa 1 ns viivettä, saadaan vastaanottimen taajuusresoluutioksi 40 MHz. Tämä on riittävä tarkkuus esimerkiksi tutkavaroitinille, mutta ei ESM-järjestelmälle. Tarkkuuden parantamiseksi voidaan käyttää useita rinnakkaisia vastaanottimia, joissa on eripituiset viivelinjat. Esimerkiksi:

- | | | |
|-----------|--------------|----------------------|
| 1. linja: | viive 250 ps | taajuusalue 4 GHz |
| 2. linja: | viive 1 ns | taajuusalue 1 GHz |
| 3. linja: | viive 4 ns | taajuusalue 250 MHz |
| 4. linja: | viive 8 ns | taajuusalue 62,5 MHz |

Mikäli vaihevertailijan erottelukyky on 90 astetta ($\pi/2$ radiaania), on viivelinjojen porrastus 4. Tällöin ensimmäisen viivelinjan perusteella saadaan selville, onko taajuus 0 – 1, 1 – 2, 2 – 3 vai 3 – 4 GHz:n alueella. Jos signaalin taajuus on esimerkiksi välillä 0 – 1 GHz välillä,

saadaan toisen viivelinjan vaihevertailijan avulla selville, onko signaalin taajuus välillä 0 – 250, 250 – 500, 500 – 750 vai 750 – 1000 MHz. Kolmannen vaihevertailijan avulla selvitetään, onko signaali (esimerkiksi) 0 – 62,5, 62,5 – 125, 125 – 187,5 vai 187,5 – 250 MHz:n alueella. Neljännen vertailijan avulla voidaan ratkaista, kuuluuko signaali välille 0 – 15,625, 15,625 – 31,25, 31,25 – 46,875, 46,875 – 62,5 MHz. Esimerkiksi signaali, jonka taajuus on 2,375 GHz pääteltäisiin seuraavasti:

1. viivelinja: signaali on välillä 2-3 GHz
2. viivelinja: signaali on välillä 2,25 – 2,5 GHz
3. viivelinja: em. alueella signaali on välillä 2,25 – 2,875 GHz
4. viivelinja: em. alueella signaali on välillä 2,25 – 2,40625 GHz



Kuva 206: Kaksi viivelinjaa sisältävällä IFM-vastaanottimella saavutetaan suurempi taajuusalue sekä parempi taajuusresoluutio kuin saman kaistan peittäväällä yhden viivelinjan sisältävällä vastaanottimella.

Signaali kyettäisiin siten luokittelemaan oikealle kaistalle 15,625 MHz:n resoluutiolla. Tässä yhteydessä on huomattava, että mikäli tällaiseen IFM-vastaanottimeen päästetään yli 4 GHz:n signaaleita, ne laskostuvat 0 – 4 GHz:n kaistalle. Siten 6,375 GHz signaali pääteltäisiin saman taajuiseksi kuin edellä kuvattu 2,375 GHz signaali. Laskostuminen estetään yleensä suodattamalla pois ne signaalikomponentit, joita ei voida yksikäsitteisesti mitata. Jos vaihevertailijan erottelukyky on esimerkiksi 45 astetta ($\pi/8$ radiaania), on viivelinjojen porrastus 8. Tällöin neliportaisella järjestelmällä, jolla ensimmäisen linjan taajuusalue on 4 GHz, saadaan kokonaisuuden resoluutioksi noin 1 MHz.

IFM-vastaanottimen hyviä puolia ovat:

- Laaja ilmaisukaistanleveys.
- Laajasta kaistasta johtuva erittäin suuri yksittäisten läheteiden sieppaustodennäköisyys (100 %).
- Kohtuullinen taajuusresoluutio (1 % taajuusalueesta) ja nopea keskitaajuuden mitaus jokaisesta pulssista. Tämä mahdollistaa nopeasti hyppivien FH-läheteiden ilmaisun.
- Laaja taajuusalueen peitto.
- Kyky mitata hyvin lyhyitä (100 ns luokkaa olevia) läheteitä tarkasti, mutta pulssin on kuitenkin oltava pidempi kuin pisimmän viivelinjan viive.
- Laaja dynaaminen alue.

Heikkouksia puolestaan ovat:

- Vaatimaton herkkyys (-60 .. -70 dBm)
- Jotta tulevan signaalin tasojen muutokset eivät aiheuta virhettä vaihevertaajissa, on tuleva signaali vahvistettava ja rajoitettava vakiotasoiseksi. Tämän vuoksi IFM-vastaanottimesta ei saada amplituditietoa
- Kahden samaan aikaan tulevan signaalin erittely ei ole mahdollista: jos ilmaisee tulee kaksi samanaikaista signaalia, laite ilmaisee niistä voimakkaamman.
- Lähellä olevat jatkuvalähteiset signaalit aiheuttavat ongelmia pulssitettujen signaalien havaitsemisessa.

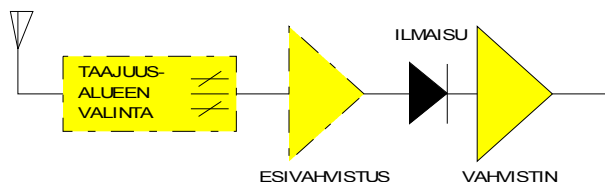
IFM-vastaanotin soveltuu heikosti ESM-vastaanottimeksi, koska se ei kykene ilmaisemaan useita samanaikaisia signaaleja. Mikäli vastaanottimen kaistalla on samaan aikaan useampia signaaleja, vastaanotin ilmaisee niistä vahvimman. IFM-vastaanottimen heikkouksista huolimatta sitä käytetään edelleen vanhemmissa tiedustelujärjestelmissä.

Kidevastaanotin

Kidevastaanotin (crystal video receiver) on yksinkertainen vastaanotin, joka ilmaisee radio- taajuuden signaalin suoraan ilman välimuunnoksia. Ilmaisimena voidaan käyttää yksinkertaista diodia, jolle radiosignaali tuodaan – mahdollisesti vahvistettuna ja esisuodatettuna halutulle ilmaisukaistalle. Ilmaisimen jälkeen signaali vahvistetaan yleensä logaritmisella vahvistimella, jonka avulla voidaan ilmaista tulevan signaalin teho.

Kidevastaanottimen hyviä ominaisuuksia ovat:

- Yksinkertainen rakenne ja siitä johtuva halpuus sekä pieni koko ja tehonkulutus.
- Hyvin laaja kaistanleveys.
- Kykenee mittaamaan pulssin amplitudin ja pituuden sekä tuloajan ja mahdollistaa karkean tulosuunnan määrittämisen.



Kuva 207: Kidevastaanotin sisältää yksinkertaisimmillaan ilmaisimen ja vahvistimen. Vastaanottimen herkkyyttä voidaan parantaa käyttämällä kaistanpäästösuodatinta ja signaalin esivahvistinta ennen ilmaisua.

Huonoina puolina voidaan pitää seuraavia ominaisuuksia:

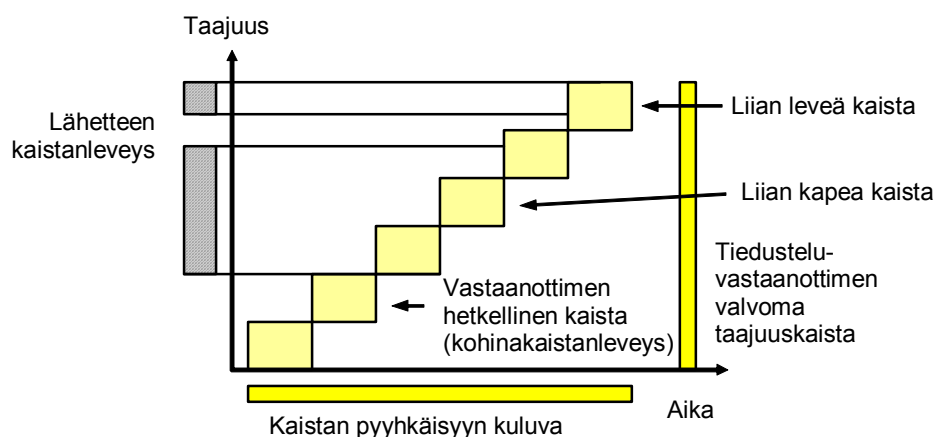
- Laajasta kaistasta johtuva huono herkkyys (ilman etuvahvistinta -40 dBm, etuvahvistimella -60 dBm) ja vaatimaton dynaaminen alue.
- Vastaanotin ei kykene mittaamaan signaalin taajuutta eikä vaihetta
- Ei kykene erottamaan useita samanaikaisia signaaleja toisistaan.
- Vastaanotin ei kykene prosessoimaan kahta perättäistä signaalia, joiden väli on vähemmän kuin diodin asettumisaika.

Kidevastaanotinta käytetään jonkin verran varoitinjärjestelmissä sen laajan kaistan ja yksinkertaisen rakenteen vuoksi.

Superheterovastaanotin

Superheterodynevastaanottimet (superheterodyne receiver) voidaan jakaa kapea- ja laajakaistaisiin niiden välitaajuuden kaistanleveyden perusteella. Kapeakaistaisella tarkoitetaan vastaanotinta, jonka kaistanleveys on kapea suhteessa tiedusteltavaan taajuusalueeseen. Vastaanotin pyyhkäisee halutun taajuusalueen kapealla kaistalla halutulla pyyhkäisy-nopeudella, jolloin koko taajuusalueen peitto on mahdollista. Vastaanottimen kaistanleveys valitaan niin, että se peittää tiedusteltavalla alueella olevien lähettimien signaalikaistanleveyden. Tiedustelujärjestelmien kaistanleveyttä voidaan yleensä muuttaa, jotta kaikkien signaaliparametrien mittaaminen mahdollistetaan riittävällä tarkkuudella. Mikäli tiedusteluvastaanottimen kaistanleveys on liian kapea, menetetään osa informaatiosta. Vastaavasti jos kaista on liian leveä, aiheuttaa ilmaisimeen päässyt ylimääräinen kohina vääristymiä. Tämän vuoksi oikean signaalikaistanleveyden löytäminen on erittäin tärkeää.

Pyyhkäisevän kapeakaistaisen vastaanottimen ilmaisutarkkuus riippuu oleellisesti sen kaistanleveydestä ja pyyhkäisyaskeleesta. Kaistanleveyden ja pyyhkäisyaskeleen suhteen tulee olla 1, jotta sieppaustodennäköisyys voidaan optimoida. Suhteen ollessa pienempi kuin 1, jää tiedusteltavaan taajuusalueeseen aukkoja, joissa olevia signaaleja ei havaita. Vastaanottimen kaistanleveyden ja pyyhkäisyaskeleen suhde tulee sovitaa tiedusteltavan signaalin kaistanleveyteen. Jos tiedusteltavan signaalin kaistanleveyden oletetaan olevan 500 kHz sekä vastaanottimen kaistanleveyden ja askelvälin oletetaan olevan 25 kHz, vastaanotin ilmaisee saman signaalin useaan kertaan ilmoittaen operaattorille vähintään 19 rinnakkaisen signaalin olemassaolosta. Toisaalta liian suuri vastaanottimen kaistanleveys aiheuttaa vääristymiä signaalin analysoinnissa. Kapeakaistaisen vastaanottimen suorituskykyä hyppivätaajuisia lähetteitä vastaan on arvioitu liitteessä 2.



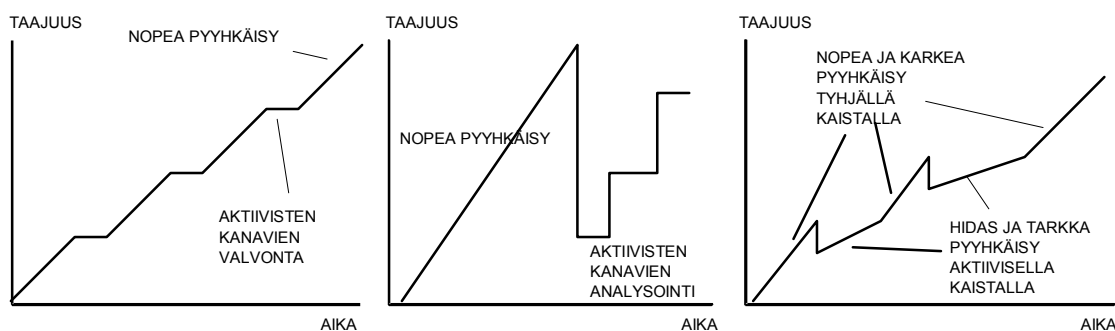
Kuva 208: Liian pieni tai laaja analysointikaistanleveys aiheuttaa vääristymiä vastaanotettavaan signaaliin ja voi johtaa informaation katoamiseen.

Pyyhkäisevän vastaanottimen pyyhkäisy nopeus riippuu kaistanleveydestä, josta taas riippuu vastaanottimen taajuusresoluutio ja kohinataso. Tämän sidoksen vuoksi pyyhkäisevä vastaanotin voi käyttää erilaisia etsintästrategioita erityyppisten signaalien havaitsemiseksi, kuten:

1. Nopea taajuuspyyhkäisy karkealla tarkkuudella.

2. Nopea pyyhkäisy, joka pysäytetään aktiivisille kanaville taajuusresoluution parantamiseksi.
3. Nopea pyyhkäisy laajalla IF-kaistalla läpi koko taajuusalueen ja sen jälkeen aktiivisiksi todettujen muistiin tallennettujen kanavien tarkka mittaaminen kapealla IF-kaistalla.
4. Nopea pyyhkäisy hiljaisilla kanavilla. Kun havaitaan lähete, vastaanotin palaa hieman takaisinpäin ja pyyhkäisee lähetteen sijaintikaistan uudelleen hitaammalla nopeudella tarkemman resoluution mahdollistamiseksi.

Tällaisten älykkäitä menetelmiä käytettäessä hakunopeus riippuu voimakkaasti vastaanottiin tulevien lähetteen määrästä. Mikäli signaalitiheys on suuri, ei älykkäistä hakumenetelmistä ole olennaista hyötyä. Kuvassa 209 on esitetty esimerkkejä erilaisten hakutaktiikoiden periaatteista.



Kuva 209: Esimerkki taajuuspyyhkäisyä käyttävän tiedusteluvastaanottimen erilaisista etsintämenetelmistä. On huomattava, että hakuvastaanottimen etsintäaika [s] ja hakunopeus [MHz/s] riippuu löydettyjen aktiivisten lähetinten määrästä.

Pyyhkäisynopeus riippuu vastaanottimen IF-kaistanleveydestä ja paikallisoskillaattorin asettumisnopeudesta askeltavissa vastaanottimessa. Vastaanottimen siirryttyä uudelle kanavalle, sen suodattimen impulssivasteen on hävitävä ennen kuin vastaanotin voi päätellä onko kanavalla liikennettä. Impulssivasteen ja kaistanleveyden välillä voidaan käyttää approksimaatiota $T = 1/B$. Siten vastaanottimen on pysyttävä kanavalla yli ajan T . Tämän perusteella vastaanottimen pyyhkäisynopeus olisi maksimissaan $f_{\text{sweep}} = B_{\text{IF}}^2$. Käytännössä pyyhkäisynopeus on tätä pienempi. Suurin pyyhkäisynopeus edellyttää kuitenkin Gaussian suodattimien käyttöä. Nämä hylkäävät osan kanavalla olevasta energiasta. Signaalienergian hyväksikäyttämisen kannalta optimaalista olisi käyttää mahdollisimman jyrkkäreunaisia suodattimia. Kuitenkin tällaisen suodattimen impulssivaste on pidempi, mikä johtaa pienempään pyyhkäisynopeuteen.

Superheterodynevastaanottimella saavutetaan erinomainen herkkyys (-100 ... -90 dBm) ja dynamiikka (60 - 80 dB) laajalla taajuusalueella. Muita etuja ovat:

- Mahdollisuus jakaa taajuusalue priorisoitaviin kaistoihin.
- Signaalien nopea ja selektiivinen ilmaisu, joka mahdollistaa erittäin lyhyiden pulssien havaitsemisen ja nopean pyyhkäisyn.
- Suuren vahvistuksen vuoksi myös pienitehoiset signaalit voidaan ilmaista.
- Pyyhkäisynopeutta ja -kaistaa voidaan säätää etsittävien signaalien mukaan. Tarvittaessa pyyhkäisy voidaan pysäyttää havaitun signaalin tarkempaa analysointia varten.
- Mahdollistaa signaalin vaiheen mittaamisen, jota voidaan käyttää signaalin tulosuunnan määrittämiseen.

Superheterovastaanottimen huonoja puolia ovat:

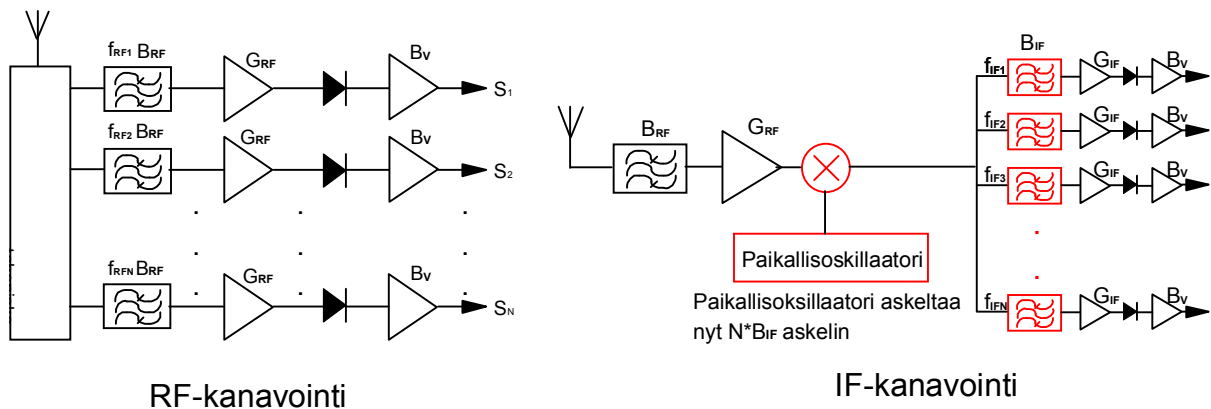
- Hajaspektritekniikka käyttävien lähettimien havaitseminen saattaa tuottaa ongelmia varsinkin kapeakaistaiselle vastaanottimelle.
- Kapeakaistaisella vastaanottimella on huono sieppaustodennäköisyys.

Hyvän herkkyytensä ja selektiivisyytensä vuoksi superheterovastaanotin on yleisin elektronisessa tiedustelussa käytetty vastaanotin.

Kanavoitu vastaanotin

Kanavoitu vastaanotin (channelized receiver) jakaa tiedusteltavan laajan kaistan pienempiin osakaistoihin, joita se valvoo rinnakkaisesti. Kanavoituja vastaanottimia on kolme eri tyyppiä: rinnakkaisista vastaanottimista muodostuva, kaistan eri osat yhdistävä ja aikajakoinen. Rinnakkaisiin vastaanottimiin perustuvassa tekniikassa vastaanotin koostuu periaatteesta useasta erillisestä osavastaanottimesta, jotka peittävät yhdessä koko tiedusteltavan taajuusalueen. Esimerkiksi 18 GHz kaistan valvomiseen tarvittaisiin 9 kpl 2 GHz vastaanottimia. Kaistan eri osat yhdistävässä vastaanottimessa RF-kaista jaetaan osiin, jotka kukin sekoitetaan samalle valvottavalle välitaajuudelle. Tällöin laaja valvottava spektri itse asiassa laskostuu kapealle välitaajuuskaistalle. Aikajakoisessa vastaanottimessa vain ne kaistat, joilla on liikennettä sekoitetaan yhteiselle välitaajuuskaistalle.

Vastaanottimen taajuusalue ei voi olla kovin laaja, mikäli alivastaanottimien kaistanleveys joudutaan rajoittamaan kapeaksi esimerkiksi digitalisoinnin vaatiman maksimikaistanleveyden vuoksi. Asia voidaan ratkaista monella rinnakkain toimivalla superheterodynevastaanottimella, jotka kykenevät toimimaan laaja- tai kapeakaistaisessa toimintatilassa. Laajakaistaisessa toimintatilassa vastaanotin havaitsee toimintakaistalla olevan signaalin ja voi siirtyä havaitsemisen jälkeen kapeakaistaiseen tilaan tarkempien mittausten suorittamiseksi.



Kuva: Timo Pulkkinen

Kuva 210: Kanavoinnilla tiedusteltava spektri jaetaan useisiin osittain päällekkäin oleviin vastaanotinkanaviin. Kanavointi voidaan toteuttaa joko kantataajuudella tai vastaanottimen välitaajuudella.

Kanavoidun vastaanottimen etuja ovat:

- Superheterovastaanottimen erinomainen herkkyys, selektiivisyys, taajuusresoluutio ja dynamiikka yhdistettynä hyvään sieppaustodennäköisyyteen.
- Mahdollisuus havaita sekä prosessoida signaaleja samanaikaisesti eri taajuuskaistoilla.
- Vastaanottimessa ei tarvita teknisesti vaativaa taajuuspyyhkäisyä.

Kanavoidun vastaanottimen käytön rajoittavia ominaisuuksia ovat:

- Monitoimivastaanottimet ovat kalliita.
- Vastaanottimen tilantarve on suuri.
- Suuritehoiset lähetteet voivat peittää heikkotasoisia signaaleita (ns. splatter-ilmiö).

Kompressiovastaanotin

Kompressiovastaanottimen (micro-scan receiver) toiminta perustuu dispersiiviseen viivelinjaan (Dispersive Delay Line), jonka viive riippuu lineaarisesti signaalin taajuudesta. Signaalin taajuus saadaan selville viivelinjan aiheuttaman viiveen perusteella. Viive mitataan paikallisoskillaattorin pyyhkäisyn aloittamishetkestä. Toteutusta vaikeuttaa se, että viivelinjan on oltava erittäin laajakaistainen ja lineaarinen koko IF-kaistalla.

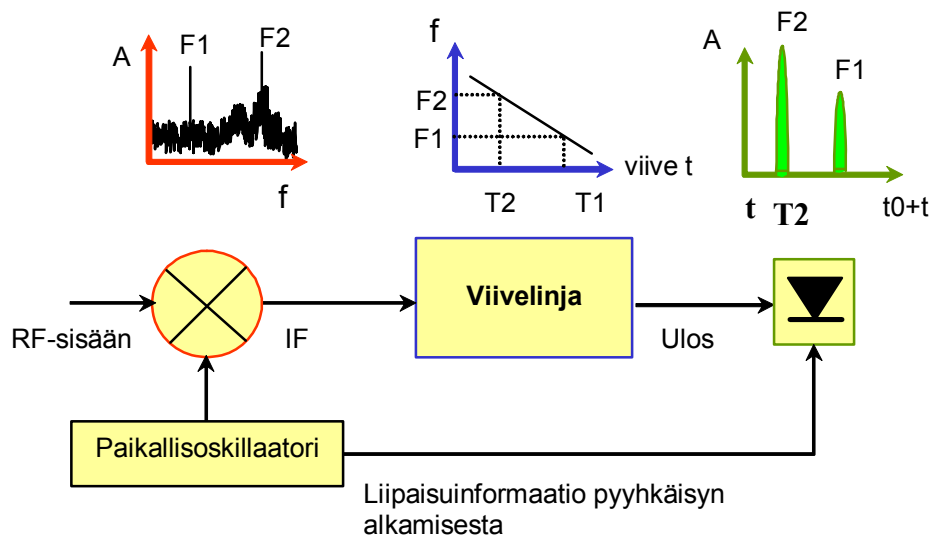
Kompressiovastaanottimen hyviä ominaisuuksia ovat:

- Laajasta kaistasta (1-2 GHz) johtuva erittäin suuri yksittäisten läheteiden sieppaus-todennäköisyys (100%), mikäli lähetteet eivät ole liian lyhyitä.
- Hyvä eritaajuisten läheteiden erottelukyky.
- Laaja dynaaminen alue (60 dB).
- Erittäin halpa toteutus.

Kompressiovastaanottimen huonoina puolina voidaan pitää:

- Vastaanotin ei kykene mittaamaan pyyhkäisyjaksoa pidempien läheteiden pituutta.
- Vastaanotin ei kykene havaitsemaan erittäin lyhyitä pulsseja²⁶.

Kompressiovastaanotinta käytetään erityisesti tutkatiedustelussa sekä signaalitiedustelussa hakuvastaanottimena.



Kuva 211: Kompressiovastaanotin perustuu dispersiivisen viivelinjan käyttöön. Viive riippuu signaalin taajuudesta, joten eri taajuudet kyetään erottelemaan aikatasossa.

²⁶ Kompressiovastaanottimen lyhyiden signaalien sieppaustodennäköisyys PoI riippuu analyysikaistanleveyden B_f ja pyyhkäisykaistanleveyden B_c suhteesta: $PoI = B_f / B_c$.

Akusto-optinen vastaanotin

Akusto-optinen ns. Braggin soluun (Bragg cell) perustuva vastaanotin ilmaisee siepatun signaalin akusto-optisen materiaalin läpi kulkeneella laservalolla, jonka taipumiskulma riippuu signaalin taajuudesta. Taipunut säde ilmaistetaan pienistä elementeistä kootulla valoilmallisimella, joka kertoo käytetyn taajuuden.

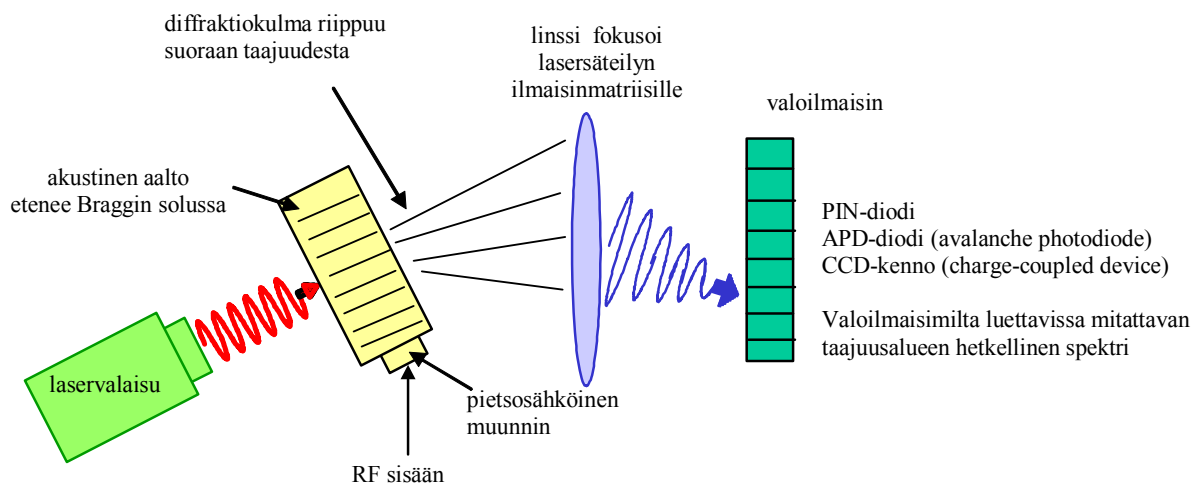
Akusto-optisen vastaanottimen eduksi voidaan laskea:

- Laaja välitön kaistanleveys (esim. 2 GHz) ja siitä johtuva 100% sieppaustodennäköisyys.
- Reaaliaikainen signaalin prosessointi.
- Suuri herkkyys (jopa -90 dBm).
- Pieni koko ja yksinkertaisesta rakenteesta johtuva hyvä luotettavuus.

Vastaanottimen käyttöä rajoittavat:

- Signaaliparametrien mittaamiseen tarvitaan erillinen laitteisto.
- Soveltuu teknisten parametriensa takia ainoastaan 500 - 3000 MHz:n alueelle.
- Pieni dynaaminen alue (n. 35 dB).

Akusto-optinen vastaanotin ei ole yleinen taktisissa järjestelmissä, koska sillä ei kyetä mittaamaan kaikkia signaaliparametreja. Tämän vuoksi sen käyttö rajoittuu lähinnä spektri-analysointitehtäviin. Mikäli järjestelmälle riittää pelkkä taajuustieto, voidaan akusto-optista vastaanotinta periaatteessa käyttää kaikissa elektronisen sodankäynnin sovelluksissa, joissa vastaanotettavien signaalien tehotaso on kapean dynaamisen alueen sisällä.

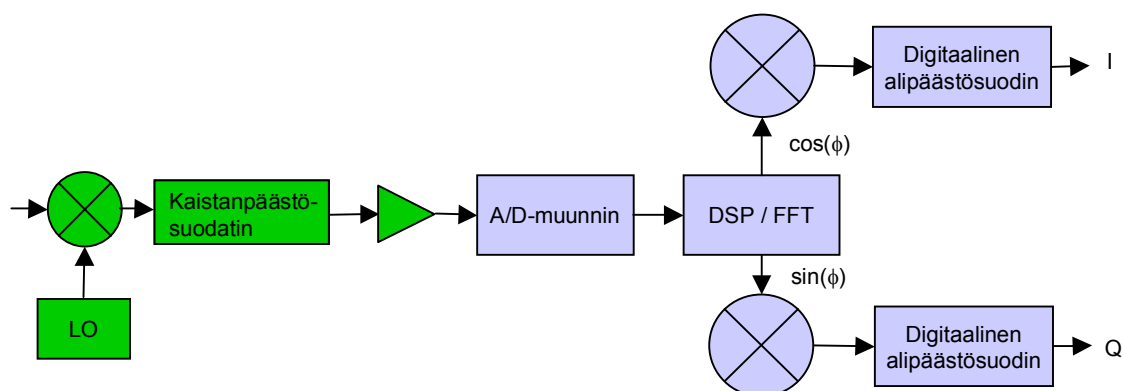


Kuva 212: Braggin solu taivuttaa tulevaa laservaloa kulmassa, joka riippuu tulevan RF-signaalin taajuudesta. Taipumiskulma mitataan valoilmaisimatriisin avulla.

Digitaalinen vastaanotin

Digitaalisella vastaanotin toimii periaatteessa samalla tavoin kuin perinteinen analoginen vastaanotinkin. Keskeisenä erona analogisen ja digitaalisen vastaanottimen välillä on lähteen ilmaisu ja demodulointitekniikka, jotka digitaalisessa vastaanotimessa perustuvat AD-muuntimella tehtyyn näytteistykseen. Digitaalivastaanottimien etuna on se, että demodu-

lointi ja ilmaisu voidaan muuttaa tarpeen mukaan digitaalisessa signaalinkäsittelyä käytettyjen algoritmien ja ohjelmistojen päivityksellä. Toistaiseksi AD-muuntimien näytteenotonopeudet ja kaistanleveydet rajoittavat näytteenottamisen ainoastaan välitaajuuksille eikä suora digitointi ole mahdollista suoraan korkeammilta taajuuksilta.



Kuva 213. Digitaalinen vastaanotin koostuu sekä perinteisestä analogiaosasta kuten vastaanottimen etupäästä, kaistanpäästösuodattimista ja välitaajuuden alassekoittajista sekä digitaalisella signaalikäsittelyllä toteutetusta läheteiden ilmaisusta ja demodulointiosasta.

Vastaanotinten vertailu

Mikään yksittäinen vastaanotin ilmaisee ei sovellu kaikkiin käyttötarkoituksiin. Vastaanottimen valintaan vaikuttavat muun muassa valvottavan taajuusalueen koko, saman aikaisten läheteiden määrä, läheteiden pienin ja suurin pituus, vaadittu signaalien sieppaus- ja ilmaisutodennäköisyys, signaaliparametrien määrä ja mittaustarkkuus. Lisäksi valintaan vaikuttavat radiotekniset perusparametrit, kuten herkkyys, kohinaluku, selektiivisyys, viereisen kanavan vaimennus ja dynaaminen alue. Taulukossa 12 on esitetty eri vastaanottimien tyypillisiä ominaisuuksia.

Suuntiminen

Elektronista läheteiden suuntimista käytetään omasuojajärjestelmissä karkean uhkasuunnan määrittelyyn ja tiedustelujärjestelmissä lähetinten paikantamiseen. Lisäksi suuntimis-tekniikoita käytetään navigoinnissa, paikannuksessa ja omien joukkojen etsinnässä esimerkiksi radiomajakoiden (beacon) avulla. Mitatun suunnan muutosta voidaan käyttää hyväksi uhan liikkeenopeuden arvioimiseen.

Suuntimojärjestelmät voidaan jakaa esimerkiksi niiden käsittelemän informaation tyyppin mukaan, eli skalaari- ja vektorisuuntimoihin. Edelliset hyödyntävät vain signaalin amplitudia tai vaihetta, jälkimmäiset perustuvat tulevan aaltorintaman vaiheen ja amplitudin mittaamiseen ja analysointiin. Suuntimot voidaan jakaa myös kapea- ja laaja-apertuurijärjestelmiin. Edelliset mittaavat ja analysoivat vain pienen osan (esimerkiksi alle yhtä aallonpituuden mittaa vastaavan osan) tulevasta aaltorintamasta ja jälkimmäiset taas mittaavat ja analysoivat aaltorintamaa useita aallonpituuksia vastaavalta leveydeltä. Laaja-apertuurisuuntimot kykenevät havaitsemaan ja kompensoimaan aaltorintamassa olevia paikallisia virheitä, joita syntyy

esimerkiksi monitie-etenemisestä. Niiden ongelmana on niiden vaatima suuri antennin koko. Tämän vuoksi taktiset suuntimojärjestelmät ovat yleensä kapea-aperttuurisuuntimoita.

Digitaalinen IFM-vastaanotin	Taajuusalue	1-2	2-4	4-8	8-12	12-18	GHz
	Kaistanleveys	1,1	2,1	4,2	4,2	6,4	GHz
	Herkkyys	- 65	- 65	- 65	- 65	- 60	dBm
	Taajuusresoluutio	0,52	1,04	2,08	2,08	3,12	MHz
	Min. pulssinpituus	95	60	45	45	40	ns
	Käsittelyviive	185	150	135	135	130	ns
	Kidevastaanotin	Taajuusalue	esim. 1 – 18 tai 4 – 26 GHz				
Kaistanleveys		oktaavi tai vähemmän					
Herkkyys		– 45 dBm (- 60 dBm RF-esivahvistimella)					
Selektiivisyys		- 60 dB					
Videokaistanleveys		20 MHz (esim.)					
Dynaaminen alue		45 – 55 dB					
Laajakaistainen superhetero	Taajuusalue	0,5 – 18 GHz (esim.)					
	Kaistanleveys	oktaavi tai vähemmän					
	Herkkyys	- 80 dBm					
	Kohinaluku	10 - 18 dB					
	RF IF-kaistanleveys	0,5 - 1 GHz					
	Peilitaajuusvaimennus	80 dB					
	Dynaaminen alue	70 dB					
	PoI riippuu	pyyhkäisy nopeudesta ja lähetteen pituudesta					
ELINT-kompressiovastaanotin	Analyysikaistanleveys	250 MHz					
	Taajuusresoluutio	6 (signaaliero 3 dB) – 60 MHz (ero 50 dB)					
	Dynaaminen alue	50 dB					
	Prosessointiviive	750 ns maksimissaan					
	Sieppaustodennäköisyys	50 – 100%					
COMINT-kompressiovast.otin	Analyysikaistanleveys	6-25 MHz					
	Resoluutio	50 kHz (signaalien ero 3 dB)					
	Dynaaminen alue	35-40 dB					
	Sieppaustodennäköisyys	50 – 100%					
Kanavoitu vastaanotin	Taajuusalue	0,5 – 18 GHz (esim.)					
	Kaistanleveys	2 GHz (tyypillinen)					
	Herkkyys	-85 dBm					
	Taajuusresoluutio	10 (signaaliero 0 dB) – 30 MHz (ero 50 dB)					
	Dynaaminen alue	60-70 dB					
	Pienin pulssin pituus	100 ns					
	Sieppaustodennäköisyys	100%					
Akusto-optinen vastaanotin	Keskitaajuus	3 GHz					
	Kaistanleveys	2 GHz					
	Herkkyys	- 60 dBm					
	Dynaaminen alue	45-50 dB					
	Taajuusresoluutio	10 MHz					
	Sieppaustodennäköisyys	100%					

Taulukko 12: Eri tiedusteluvastaanotintyyppien vertailu. Luvut ovat kullekin vastaanotintyypille tyypillisiä tai käyttötarkoituksen mukaan esimerkinomaisia.



Kuva 214: Kuuntelutiedustelujärjestelmän kapea-aperttuurinen suuntimoasema.
[EADS Ewation]

Kolmas tapa luokitella suuntimot perustuu niiden käyttämään tekniikkaan. Tärkeimmät tekniikat ovat tulokulman (AOA, Angle of Arrival), tuloajan (TDOA, Time Difference of Arrival) ja dopplersiirtymän (FDOA, Frequency Difference of Arrival) mittaus ja suunnan laskeminen näiden mitattujen suureiden perusteella. Tässä kirjassa suuntimot käsitellään tämän jaon mukaisesti.

DF-järjestelmä koostuu antennista ja vastaanottimesta sekä suunnan laskevasta prosessointiyksiköstä ja näytöstä. Kahden keskeisimmän elementin, eli antennin ja vastaanottimen tärkeimmät parametrit suuntimisen kannalta ovat²⁷:

1. Antenni

- Suuntakuvio silloin kun antenni on asennettu mastoon ja/tai ajoneuvoon.
- Ristipolarisaatiovaimennus, eli kyky estää mittaukselta häiritsevien ristikkäisesti mitattavan signaalin kanssa polarisoituneiden signaalien pääsy vastaanottimelle.
- Taajuusvaste koko analysoitavalla kaistalla.

²⁷ Antennin ominaisuuksia ja antenniparametreja on käsitelty luvussa *sähkömagneettinen spektri* ja liitteessä 1. Radiovastaanottimen ominaisuuksia on käsitelty *tietoliikennejärjestelmät* -luvussa.

2. Vastaanotin

- Herkkyys ja dynaaminen alue, eli pienin ja suurin suunnittavissa oleva signaali.
- Lineaarisuus.
- Kyky sietää useita samanaikaisia signaaleja ilman että niiden keskinäismodulaation synnyttämät harhasignaalit häiritsevät suunnan laskemista.
- Vaiheen ja amplitudin stabiilisuus.

Suuntimojärjestelmältä vaadittavat radiotekniset ominaisuudet ovat:

1. Suunnan tarkkuus
2. Herkkyys (antenni ja vastaanotin)
3. Riippumattomuus tulevan säteilyn polarisaatiosta
4. Vääristyneiden aaltorintamien sietokyky
5. Viereisten kanavien häiriöiden sietokyky
6. Samakanavahäiriöiden sietokyky
7. Nopea mittaus ja lyhyt analysointiaika
8. Mittaustarkkuuden riippumattomuus lähetteen tulosuunnasta atsimuutti- ja elevaatiotasoissa
9. Lähetteen modulaation sietokyky

Mitattu suunta on luonteeltaan tilastollinen, eli se vaihtelee tilanteesta riippuvan virherajan sisällä. Suuntatuloksen virhe muodostuu

1. Laitevirheistä

- Antennin, kaapeloinnin ja vastaanottimen lämpökohinasta, eli käytännössä tulevan signaalin signaalikohinasuhteesta vastaanottimella.
- Vastaanottimen kanavien keskinäisistä eroista, esimerkiksi amplitudi- tai vaihe-eron mittauksessa.
- Antennielementtien keskinäiskytkennästä, jossa osa yhden antennin vastaanottamasta energiasta kytkeytyy toisen elementin kautta vastaanottimelle.
- Prosessointiyksikön ja näyttölaitteen virheistä ja rajallisesta resoluutiosta.

2. Paikkavirheistä

- Monitie-etenemisestä lähettimen ja suuntimon välillä. Suuret maastonpiirteet ja rakennukset aiheuttavat heijastumia, jotka synnyttävät suuntavirhettä. Pahimmassa tapauksessa heijastunut säde on voimakkaampi kuin suoraan kulkenut, jolloin suuntimo suuntii lähettimen täysin väärään suuntaan.
- Aallon kohtaamasta refraktiosta.
- Lähellä suuntimoa sijaitsevista metallirakenteista tapahtuvasta sironnasta ja heijastuksista.

3. Aaltorintaman interferenssivirheistä

- Suoraan etenevän ja heijastuneiden signaalikomponenttien välisestä interferenssistä.

4. Etenemisvirheistä

- HF-taajuuksilla refraktio, VHF-taajuuksilla kanavoituminen, liikkuvat ajoneuvot yms. Korkeammilla taajuuksilla myös kasvillisuus ja sää vaikuttavat aallon etenemiseen ja näennäiseen lähettimen suuntaan.
- Heijastusten tai ionosfäärin muuttamasta aallon polariteetista.

Järjestelmätekniset virheet voidaan minimoida huolellisella suunnittelulla. Muut virheet on otettava huomioon järjestelmän käyttötekniikkaa ja -taktiikkaa määriteltäessä. Paikkavirheiden lisäksi merkittävin virhelähde on kohina. Tämän vuoksi vastaanotetun signaalin signaalikohinasuhde asettaa teoreettisen rajan saavutettavissa olevalle suuntimistarkkuudelle. Tätä rajaa kutsutaan Cramer-Rao-rajaksi ja se saadaan normalisoidun signaalikohinasuhteen avulla kaavasta:

$$\sigma_{\text{AOA}} \geq \frac{\lambda}{2\pi \cdot d \cdot \cos(\phi) \cdot \sqrt{\frac{E}{N_0}}}$$

jossa λ on lähetteen aallonpituus, d mittauskannan leveys, ϕ lähetteen ja kannan normaalin välinen kulma ja E/N_0 signaalienergian suhde kohinatehotiheyteen.

Normaalisti lähettimen paikantaminen perustuu useiden suuntimojen antamien suuntien ns. ristisuuntien laskentaan. Lähettimen paikka lasketaan mitattujen suuntien painotettujen keskiarvojen perusteella. Yleensä huonoimmat – eli keskiarvosta liikaa poikkeavat – suuntamittaukset karsitaan pois ennen laskentaa. Suunnalle lasketaan hyvyysluku, jolla sen huojuntaa ja epätarkkuutta arvioidaan. Hyvyysluku voi koostua esimerkiksi suunnan integrointiaikana tapahtuneesta vaihtelusta, signaali-kohinasuhteesta tai se voidaan laskea molempien avulla.

Pyörítettävä kapeakeilainen suuntimoantenni (Spinning DF)

Yksinkertaisin suuntimismenetelmä on atsimuuttitasossa pyörítettävä kapeakeilainen peiliantenni. Samalla kun antennia pyöritetään, vastaanotin tallentaa lähetteen kentänvoimakkuuden pyörimisajan funktiona ja ilmoittaa mistä suunnasta saadaan voimakkain signaali. Tekniikan heikkoutena on suuntimisen hitaus, minkä vuoksi järjestelmä ei sovellu lyhytkestoisten purskelähteiden suuntimiseen. Kapeakeilaisen peiliantennin vahvistus on suuri, mikä parantaa järjestelmän herkkyyttä ja kasvattaa tiedusteluetaisyysyettä.

Mitä korkeampaa taajuutta yritetään suuntia, sitä paremmaksi tekniikaksi spinneri (Spinning DF) osoittautuu, ilmakehän ja ilmaston aiheuttamien vaimennusten vuoksi. Pyörivän suuntimon suuntatarkkuuden rms-virheen teoreettinen alaraja on:

$$\Delta\theta = \frac{\sqrt{2} \cdot \lambda \cdot 180}{\pi^2 \cdot D \cdot (2 \cdot \text{SNR})^{0.5}}$$

jossa D on antennin halkaisija ja SNR signaali-kohinasuhde. Antennin halkaisijalla on siten suora vaikutus suuntimistarkkuuteen. Lisäksi se vaikuttaa suuntimistarkkuuteen epäsuorasti antennivahvistuksen ja signaalikohinasuhteen kautta. Antennin koon alarajan asettaa matalin suunnittavaksi haluttava taajuus ja pienin sallittu antennivahvistus.



Kuva 215: Kannettavaa hakusuuntimoa voidaan käyttää sekä lähettimien – kuten vihollisen radioiden tai salakuuntelulaitteiden – paikantamiseen, että lähetysten kuunteluun ja signaaliparametrien tallentamiseen. Suuntiminen perustuu pistoolimaisen suunta-antennin kääntelyyn ja signaalin voimakkuuden määrittämiseen. [Rohde & Schwartz]

Signaalikohinasuhteen lisäksi pyöritettävän suuntimon virhelähteenä on antennin sähköisen ja fyysisen suunnan ero, jota voidaan hallita suunnittelemalla ja kalibroimalla antenni, radomi, pyörityskoneisto ja masto yhdessä. Pyörityskoneiston servon virhe aiheuttaa suunnan määrittämiseen oman virheensä, joka on tyypillisesti alle 0,1 astetta. Lähetteen tason vaihtelu aiheuttaa mittausvirhettä, sillä vastaanotin määrittää tulosuunnaksi sen suunnan, jolla lähetteen taso on maksimissaan. Signaalitason vaihtelu voidaan poistaa ympärisäteilevällä apuantennilla, jonka antama signaali vähennetään peiliantennin antamasta signaalista.

Monopulssisuuntiminen

Tutkien lisäksi monopulssitekniikkaa käytetään passiivisissa ESM- ja ELINT-järjestelmissä. Monopulssitekniikan toimintaperiaate esiteltiin jo seurantatutkien yhteydessä, joten sitä ei toisteta tässä. Amplitudimonopulssitekniikan suuntavirhe lasketaan kaavalla

$$\Delta\theta = \frac{\Delta R_{dB} \cdot \theta^2}{24 \cdot S}$$

jossa R_{dB} on kahden syötön amplitudien erotus desibeleissä, θ on 3 dB keilanleveys ja S on kallistuskulma syöttöjen säteilykuvioiden välillä. Amplitudimonopulssisuuntimisen suunta-tarkkuutta saadaan paremmaksi vähentämällä antennin keilanleveyttä, parantamalla vastaanottimien radioteknistä tasapainoa toisiinsa verrattuina tai harittamalla syöttöjen säteilykuvioita toisistaan.

Interferometrisuuntimo

Interferometrisuuntimo perustuu siihen, että suuntimoantennin mittauskantaan tulevan sähkömagneettisen säteilyn vaihe-ero kahdessa pisteessä riippuu säteilyn tulokulmasta. Tällöin signaalin tulokulma θ aiheuttaa vaihe-eron ϕ vaihevertailijan lähtöön. Vaihe-ero saadaan kaavasta:

$$\phi = \frac{2 \cdot \pi \cdot d \cdot \sin(\theta)}{\lambda}$$

Tästä saadaan laskettua signaalin tulokulma θ ;

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{\phi \cdot \lambda}{2 \cdot \pi \cdot d} \right)$$

Derivoimalla vaihe-eron antava kaava saadaan suunnan-mittauksen herkkyys vaihemittauksen virheelle:

$$\frac{d}{d\theta} \phi = \frac{2 \cdot \pi \cdot d}{\lambda} \cdot \cos(\theta)$$

jossa $\Delta\phi$ on vaihemittauksen virhe.

Se riippuu signaalin tyypistä ja ennen kaikkea signaalikohinasuhteesta. Sähköisen vaihemittauksen virhe radiaaneina

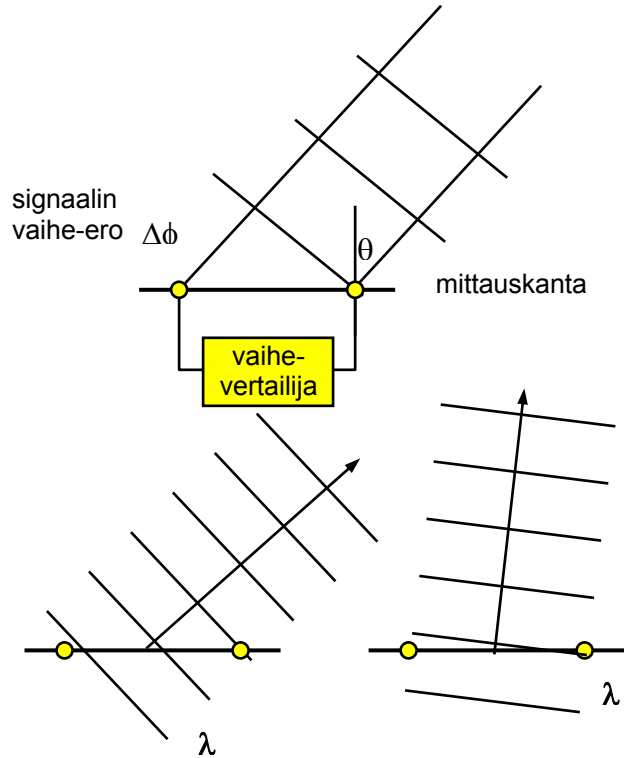
saadaan kaavasta:

$$\delta\phi := \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \frac{S}{N}}}$$

Vastaavasti kokonaisuuntavirhe radiaaneissa signaalikohinasuhteen funktiona saadaan kaavasta:

$$\delta\theta = \frac{\lambda}{2 \cdot \pi \cdot d \cdot \cos(\phi) \cdot \cos(\beta) \cdot \sqrt{2 \cdot \text{SNR}}}$$

jossa β on elevaatiokulma. Kaavasta huomataan, että antennien välimatkan d kasvattaminen lisää suuntatarkkuutta. Kun välimatkaa lisätään yli puolen aallonpituuden, syntyy tilanne, jossa toisessa antennielementissä mitattavan signaalin edellisen jakson vaihetta verrataan toisessa elementissä toisen jakson vaiheeseen. Tällöin suuntimo ei kykene laskemaan signaalin tulosuuntaa oikein. Ongelma ratkaistaan lisäämällä mittauskantaan useampia elementtejä eri etäisyyksille. Kaukana sijaitsevat antennielementit parantavat



Kuva 216: Eri tulokulmia, jotka antavat saman vaihe-eron antennielementtien välille.

suunnan mittaustarkkuutta ja lähellä toisiaan sijaitsevat antennielementit ratkaisevat sen, mistä laskostuneesta keilasta lähete on tullut.



Kuva 217: Mastoon asennettu viisikanavainen interferometrisuuntimo, joka toimii 20 – 1000 MHz:n taajuusalueella. [EADS Ewation]

Koska interferenssisuuntimion suuntatarkkuus riippuu tulevan lähetteen ja peruslinjan välisestä kulmasta, interferometrisuuntimoissa on yleensä joko kolmion muotoinen mittauskanta tai sitten antennielementit on asennettu ympyränmuotoon.

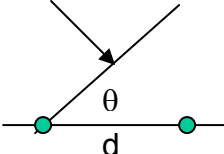
Interferometrisuuntimion etuja ovat laajakaistaisuus, mutta haittoina sen mukanaan tuoma epäherkkyys vastaanottimessa sekä antennivahvistus antenniryhmässä, joka taktisessa käytössä koostuu yleensä puolialtrodipoleista. Interferometrisuuntimoita käytetään kaikissa soveluksissa sekä viesti- että tutkasignaalien suuntimiseen.

Interferometrisuuntiminen on TDOA:n kanssa suosituin suuntimismenetelmä. Sitä käytetään hyvin laajalla taajuuskaistalla VHF-alueelta lähtien. Sillä saavutetaan käytännössä puolen aallonpituuden mittaisella mittauskannalla ja hyvällä signaali-kohinasuhteella (50 dB) 0,1 asteen suuntatarkkuus. 20 dB signaali-kohinasuhteella tarkkuus on vielä 3 asteen luokkaa.

Aikaerosuuntiminen, TDOA

Aikaerosuuntiminen on pulssimaisten lähetteen tulosuunnan mittaamiseen soveltuva periaatteessa taajuudesta ja lähetteen polarisaatiosta riippumaton menetelmä. Se perustuu kahden antennielementin vastaanottaman signaalin aikaeron mittaamiseen. TDOA-suuntimion haasteena on riittävän tarkka aika- ja taajuusnormaali. Mitä lyhyempi on antennielementtien

etäisyys toisistaan, sitä tarkempi aikaeron mittaussyky vaaditaan. TDOA-suuntimo mittaa kahden tai useamman antennielementin vastaanottaman lähetteen tuloaikojen välisen aikaeron:

$$\delta t := \frac{d \cdot \sin(\theta)}{c}$$


jossa δt on signaalin mitattu aikaero. Suunta saadaan laskettua kaavasta:

$$\theta = \sin^{-1} \left(c \cdot \frac{\Delta t}{d} \right)$$

TDOA-suuntimon mittaustarkkuus asteina saadaan tulokulman θ [deg] ja aikaeromittauksen virheen δt [ns] funktiona kaavasta:

$$\Delta \theta := \frac{17.2 \cdot \delta t}{d \cdot \cos(\theta)}$$

Pulssin johtoreunan mittaamiseen perustuvan ajanmittauksen rms-virhe saadaan kaavasta:

$$\delta t := \frac{1}{B_{if} \sqrt{2 \cdot \text{SNR}}}$$

jossa B_{if} on välitaajuuskaistan leveys (olettaen että pulssin nousuaika $\tau_{\text{nousu}} = 1/B_{if}$) Aikaerosuuntimisen ongelmana on koodaamattomien CW-lähetteen suuntiminen. Mikäli lähete on jatkuvaa ja siinä ei ole tavallisen moduloinnin lisäksi varsinaista koodausta, johon vastaanottimet voisivat lukittua, ei aikaeroa kyetä mittaamaan.

TDOA-menetelmissä tarvitaan vähintään kolmen antennielementin ryhmä atsimuuttitason mittaamiseen. Elevaatiokulman mittaamiseksi lisätään yleensä vielä neljäs antenni, joka on riittävän paljon korkeammalla kuin atsimuuttitason muodostavat antennielementit. TDOA-järjestelmä suuntatarkkuus riippuu oleellisesti antennielementtien sijaintien ja keskinäisten etäisyyksien sekä käytössä olevan aika- ja taajuusstandardin tarkkuuksista. Esimerkiksi 10 ns:n virhe aikaeron mittaamisessa synnyttää 80 metrin suuntimokannalla noin 5 asteen virheen. Vastaavasti 20 cm:n virhe suuntimokannan pituudessa synnyttää 1 asteen virheen.

TDOA-suuntimot jaetaan lyhyt ja pitkäkantaisiin. Periaatteessa niiden määrittelyyn ei ole olemassa absoluuttista arvoa, mutta käytännössä lyhytkantaisina suuntimoja ovat ne, joiden kannan suhde pisimpään tiedusteltavaan aallonpituuteen on vähemmän kuin 10 - 20 ja pitkäkantaisina ne, joilla tämä suhdeluku on yli 20.

Pitkäkantainen aikaerosuuntiminen

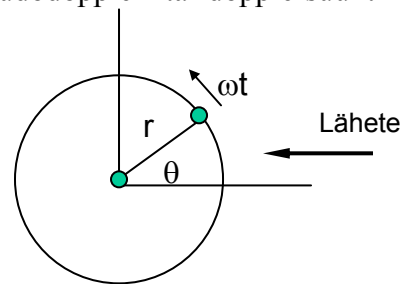
Pitkäkantainen aikaerosuuntiminen eroaa lyhytkantaisesta suuntimisesta siinä, että yksittäiset asemat eivät itsenäisesti laske suuntaa havaittuun maaliin, vaan maaliin suunta määritellään

keskusasemalla. Se korreloi yksittäisten asemien muodostamat havainnot ja laskee havaintoaikojen erotusten perusteella suunnan maaliin. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että pitkäkantaisen aikaerosuuntimojärjestelmän asemat koostuvat yksinkertaisimmillaan vastaanottimesta, joka ainoastaan mittaa lähteen taajuuden ja havaintoajan sekä siirtää informaation tiedonsiirtojärjestelmän kautta keskusasemalle prosessoitavaksi. Pitkäkantaisessa aikaerosuuntimojärjestelmässä voidaan hyväksyä yksittäisten asemien heikompi paikannus- ja aika-tarkkuus, jolla vielä on mahdollista saavuttaa kohteiden parempi paikannustarkkuus verrattuna lyhytkantaiseen järjestelmään. Tämä johtuu yksittäisten sensoriasemien välisestä pidemmästä välimatkasta d , joka kompensoi aikaeromittauksessa sekä asemien sijaintien määrittelyissä tapahtuneita epätarkkuuksia. Pitkäkantaisen suuntimojärjestelmän reaaliaikaisen toiminnan perusedellytyksenä on riittävän luotettava ja nopea tiedonsiirtoyhteys asemien välillä.

Dopplersuuntiminen

Lähteen suuntimiseen voidaan käyttää hyväksi myös dopplersiirtymää. Tällöin laitteistoa kutsutaan FDOA- (Frequency difference of arrival), pseudodoppler- tai dopplersuuntimoksi. Dopplertaajuuksien käyttö suuntimisessa vaatii sekä antennin liikenopeuden että tiedusteltavan taajuuden tuntemista. Jos antennin oletetaan pyörivän r -säteisen ympyrän kehällä kulmanopeudella ω , antennin näkemä dopplertaajuus:

$$f_d := \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{\lambda} \cdot f_r \cdot \sin(\omega \cdot t)$$



jossa ω on antennin kulmanopeus ja f_r lähteen todellinen taajuus. Kun kulmanopeus tunnetaan ja lähteen taajuus mitataan paikallaan pysyvää referenssiantennia vasten, voidaan lähteen tulosuunta laskea dopplertaajuuden perusteella: lähete on suunnassa, jossa dopplersiirtymä on nolla ja kohtisuoraan maksimaalisen dopplersiirtymän antavia suuntia vastaan. Käytännössä pseudodopplersuuntimossa ei ole pyörivää antennia, vaan useita antennikehille kiinteästi asennettuja antenneja, joita kytetään vuoron perään vastaanottimeen. Tuloksena on vastaanottimen kannalta lähes samanlainen dopplerilmiö kuin jos antennit todellisuudessa liikkuisivat.

Dopplersuuntimoja käytetään VHF- ja UHF taajuuksilla yleensä viestisignaalien suuntimiseen. Dopplersuuntimisen ongelmana on nopeiden lähteiden suuntiminen, koska virtuaali-antennin on pyörähdettävä vähintään puoli kierrosta ennen kuin suuntimo kykenee mittaamaan dopplersiirtymän. Lisäksi taajuussiirtymään perustuvan mittauksen ongelmana on signaalissa olevien taajuusmuutosten, kuten modulaation, vaikutus suuntimatarkkuuteen. Signaalin modulaation vaikutusta voidaan vähentää vertaamalla pseudodopplerantennin antamaa signaalia ympärisäteilevän apuantennin signaaliin. Diskreetti näytteenotto prosessi luo harhasignaaleja vastaanottimelle, mikä rajoittaa pseudodopplersuuntimon soveltuvuutta tiheään signaaliympäristöön.

Suuntimojärjestelmän suorituskyvyn arvioiminen

Suuntimojärjestelmien suorituskykyä voidaan arvioida useilla tavoilla. Yksi teollisuuden käyttämiä suunnittelukriteerejä on ns. Cramer-Rao-raja (Cramer-Rao boundary), jonka avulla

voidaan arvioida suuntimossa käytettävän antennin suuntatarkkuutta sen fyysisten mittojen perusteella. Crame-Rao-rajaaan perustuva suuntatarkkuus voidaan laskea kaavalla:

$$\Delta\phi \geq \frac{\lambda}{2 \cdot \pi \cdot d \cdot \cos(\phi) \cdot \sqrt{\frac{E}{N_0}}}$$

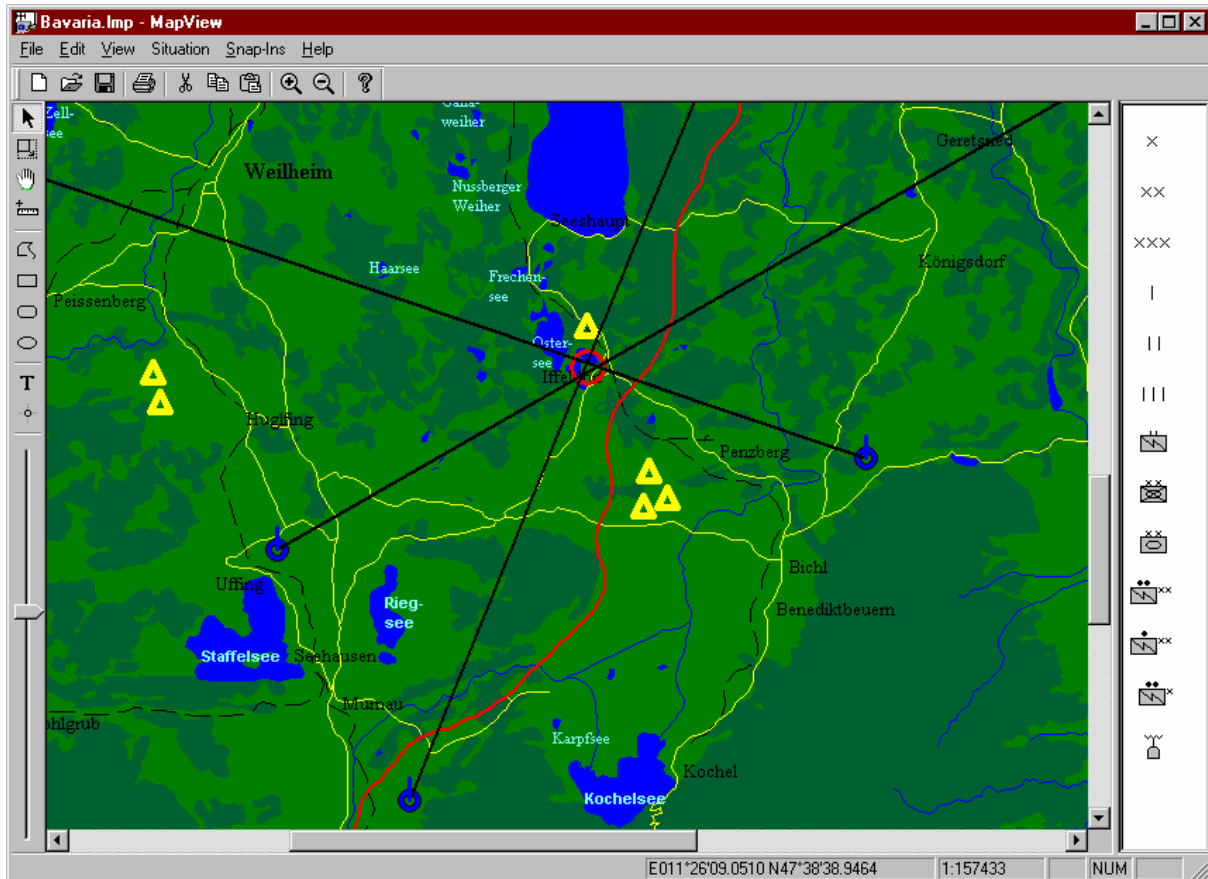
jossa d on antennielementtien kannan pituus, ϕ radioaallon tulokulma, E vastaanotetun signaalin energia ja N_0 kohinatehoitiheys, joka voidaan laskea kaavalla $N_0 = kTBF$.



Kuva 218: SSL-paikantaminen HF-taajuuksilla edellyttää laajaa antenniryhmää, joka kykenee mittaamaan saapuvan aallon atsimuutin lisäksi sen elevaation. Kuvan ristikehä-antenneista koostuva antenniryhmä on yksi mahdollisuus HF-lähetteen tiedusteleseen. [EADS Ewation]

Paikantaminen

Signaalin lähettäin paikannetaan yhdistämällä kahdesta tai useammasta suuntimosta saadut tulokset ja laskemalla todennäköisin lähettimen sijainti. Paikantaminen ei käytännössä yleensä onnistu yhden aseman mittaus tulosten perusteella, sillä etäisyyden arviointi on erittäin vaikeata lähettimen parametrien ja etenemisvaimennuksen suuruuden arvioimisen vaikeuden vuoksi. Poikkeuksen tästä muodostaa SSL (Single Site Location) eli yhdellä suuntimoasemalla tapahtuva paikantaminen, joka perustuu HF-taajuuksilla tapahtuvaan ionosfääri-heijastukseen. Mitatun elevaatiokulman ja arvioidun ionosfäärin virtuaalisen heijastuskorkeuden perusteella voidaan laskea lähettimen etäisyys. Sen ja atsimuuttikulman perusteella puolestaan voidaan laskea lähettimen koordinaatit.



Kuva 219: Suuntimoiden suuntatulokset yhdistämällä saadaan laskettua lähettimen sijainti. Suuntimojärjestelmä esittää suuntimat ja paikannetut lähettimet digitaalisen kartan ja/tai maastomallin päällä. [Roshde & Schwarz]

Paikannuksen hyvyysluku voidaan laskea käytettyjen suuntatulosten hyvyyslukujen perusteella, joko suoraan keskiarvona tai painotettuna, jolloin sijainnin hyvyysluku perustuu paikantamisessa käytettyjen suuntatulosten painotuksen suhteeseen. Suuntatulosten hyvyyslukujen raja-arvojen perusteella tiedustelujärjestelmä kykenee päättämään automaattisesti hylättävät ja hyväksyttävät suunnat, joiden perusteella lähettimen sijainti lasketaan.

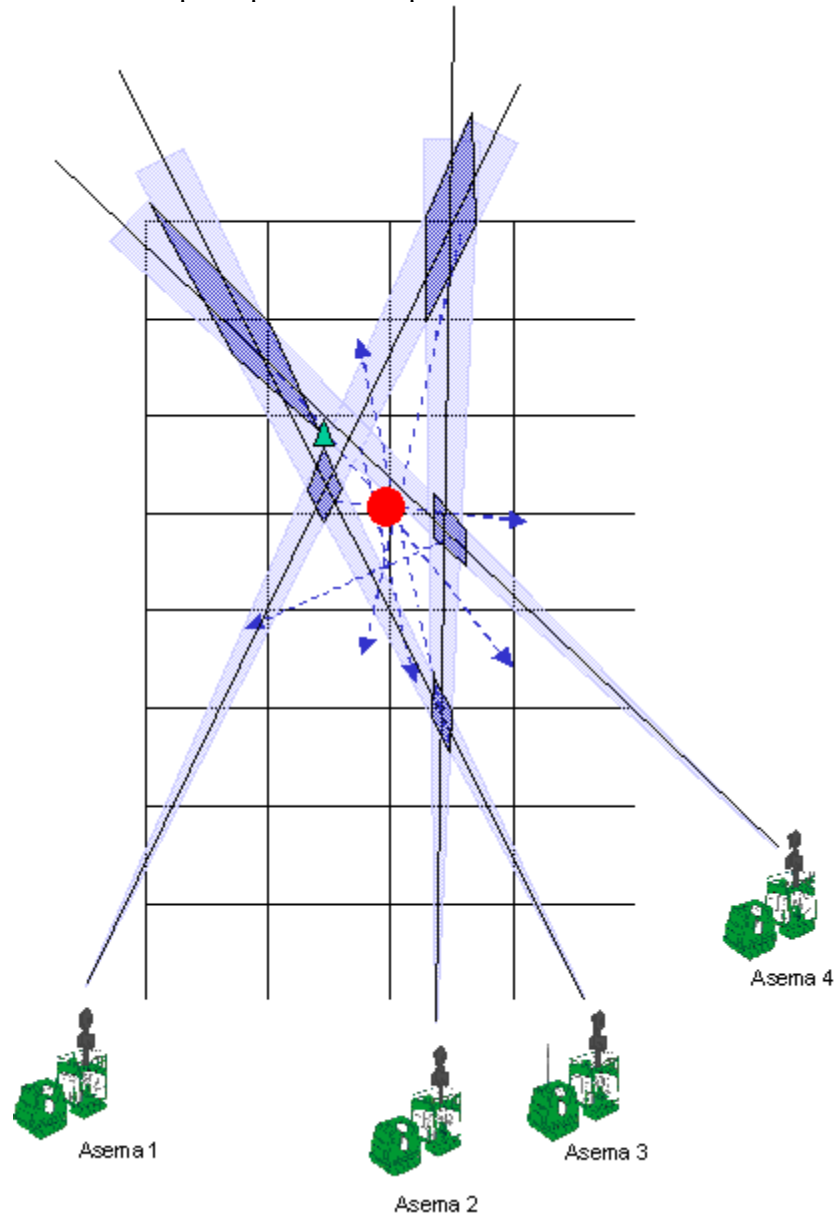
Paikantamiseen aiheuttaa virhettä edellä kuvattujen suuntimisen virheiden lisäksi myös suuntimon paikan määrittämisen virhe. Jos suuntimon paikan virhe on ε_{sl} ja suuntimisvirhe on ε_{df} , niin kokonaisvirheeksi saadaan:

$$\varepsilon_{\Sigma} := \sqrt{\varepsilon_{sl}^2 + \varepsilon_{df}^2}$$

Eri järjestelmävalmistajat ovat kehittäneet omia paikanlaskenta-algoritmeja, mutta eniten käytetään algoritmia, joka käyttää paikanlaskennassa ainoastaan kolmea parasta mitattua suuntatulosta, jotka valitaan suuntuloksille määritettyjen hyvyyslukujen perusteella. Mikäli käytössä on enemmän kuin kolme hyvää suuntatulosta, huomioidaan myös suuntimokannan geometria. Paikannuksessa käytettyjen suuntatulosten perusteella on mahdollista laskea varsinaisen sijainnin lisäksi paikannuksen todennäköisyysellipsi, jonka avulla voidaan hahmottaa alue, jonka sisällä paikannettu lähete sijaitsee esimerkiksi 50 % todennäköisyy-

dellä. Normaalisti käyttäjä voi määrittellä todennäköisyssellipsin laskennassa käytettävän todennäköisyysarvon.

Eräs tapa valita kolme lähettimen sijainnin laskentaan käytettävää suuntavektoria perustuu menetelmään, jossa etsitään kolme suuntaa, joiden muodostamien kolmen leikkauspisteen etäisyys kaikkien suuntien painopisteestä on pienin.



Kuva 220: Paikannustarkkuus riippuu oleellisesti mittausgeometriasta ja suuntimistarkkuudesta

Kuvan 220 mukaisesti ensin määritellään punaisella pallolla merkitty kaikkien leikkauksien painopiste seuraavasti:

1. Piirrä apuviiva (sininen katkoviiva) kaikista leikkauspisteistä siten, että se puolittaa muodostuneet kulmat. Apuviivat tulee piirtää osoittamaan kaikkien leikkauspisteiden määrittelemän alueen sisälle päin.
2. Määrittele viivojen yhteinen painopiste

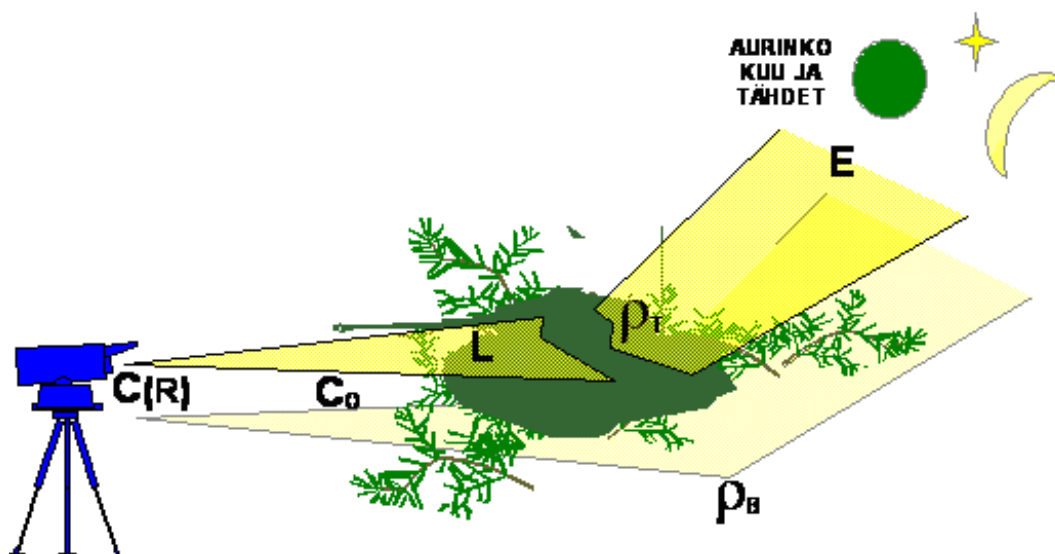
Tämän jälkeen lasketaan suuntien leikkauspisteiden etäisyys painopisteestä, joiden laskennan jälkeen määritellään ne kolme suuntatulosta, joiden leikkauksien etäisyyksien summa painopisteestä on pienin. Kuvan 220 tilanteessa pienimmän summan muodostavat asemien 1,3 ja 4 suunnat. Lopuksi lasketaan lähettimen sijainti kolmen valitun suunnan leikkauspisteiden painotettuna keskiarvona, joka on sijoitettu kuvaan vihreänä pallona suuntavektoreiden muodostaman kolmion sisään.

Esimerkkinä ELINT/ESM-järjestelmistä mainittakoon tsekkiläinen BORAP, joka on ilma-, maa- ja merimaalien etsintään, tunnistamiseen ja seurantaan tarkoitettu passiivinen valvontajärjestelmä. Se käyttää hyväksi laaja-kaistaisia interferometritekniikkaan pohjautuvia suuntimovastaanottimia, joita täydennetään erillisellä ELINT-analyysijärjestelmällä. Järjestelmä kykenee havaitsemaan ja analysoimaan tutkasignaalien lisäksi IFF-järjestelmien, ilma-voimien navigointijärjestelmien (TACAN), häirintäjärjestelmien sekä tietoliikennejärjestelmien lähteitä. Samanaikaisten lähteiden maksimimäärä on noin 200. Vähintään kahdesta suuntimosta koostuvaa järjestelmää voidaan käyttää maali tiedusteluun, ennakkovaroituksen antamiseen ja maalinseurantaan osana torjuntaoperaatiota.

OPTRONISSET SENSORIT

Näkyvyys ja kontrasti

Valaistusvoimakkuus E ilmaistaan valovoimana I (yksikkönä kandela, cd) pinta-alayksikköä (m^2) kohti. Valaistusvoimakkuuden yksikkö on luxi [$1 \text{ lux} = 1 \text{ cd}/m^2$]. Valaistustaso vaihtelee luonnossa kirkkaan kesäpäivän $7 \cdot 10^4$ luksista tähtikirkkaan yön 10^{-3} luksiin, tai pimeässä talviyössä vieläkin vähempään. Ihmisen kipukynnys on noin 10^5 luksia ja näkökynnys noin 10^{-6} luksia, joten ihmisen dynaaminen alue on erittäin laaja, 110 dB! Kuutamolla valaistus on noin 0,1 luksia, hämärässä noin 10 luksia ja pilvisenä päivänä noin $3 \cdot 10^2$ luksia.



Kuva 221: Kohteen ja sen taustan välinen kontrasti (C_0) riippuu näkyvän valon alueella kohteen ja sen taustan heijastuskerrointen (ρ_T ja ρ_B) erosta ja kohteen valaisusta E . Kontrasti pienenee etäisyyden kasvaessa arvoon $C(R)$.

Kohteesta heijastuvan säteilyn taso riippuu heijastuskertoimesta (ρ). Kohteen luminanssi määritellään kohteesta heijastuvaksi valovoimaksi ($\rho \cdot E$) avaruuskulmassa ($\Omega = \pi$):

$$L = \frac{\rho \cdot E}{\pi} \text{ [cd/m}^2\text{]}$$

Kohteen ja taustan välinen kontrasti määritellään kohteen ja taustan luminanssin avulla:

$$C_o = \frac{L_T - L_B}{L_B}$$

Näkyvän valon ja lähi-infrapunan alueella kohteen ja taustan välinen kontrasti riippuu vain kohteen ja taustan heijastuskertoimista ρ_T ja ρ_B :

$$C_o = \frac{\rho_T - \rho_B}{\rho_B}$$

jossa ρ_T on kohteen ja ρ_B taustan heijastuskertoimen. Etäisyydellä R kontrasti pienenee ilmakehän vaimennuskertoimen (σ) määräämänä:

$$C(R) = C_o \cdot e^{-\sigma R}$$

Tällöin sensorin maksimitoimintamatka R_{\max} määräytyy pienimmästä havaitusta kontrastieroista C_{\min} :

$$R_{\max} = \frac{\ln\left(\frac{C_o}{C_{\min}}\right)}{\sigma}$$

Näkyvyydellä tarkoitetaan sitä etäisyyttä, jolla kontrasti on pienentynyt minimiin. Minimi-kontrasti riippuu käyttötarkoituksesta. Esimerkiksi sotilaskäytössä rajana on usein 5 % kontrasti, mutta meteorologisessa näkyvyydessä 2 %²⁸. Koska silmän herkkyys riippuu siitä missä avaruuskulmassa kohde näkyy, 2 % raja soveltuu käytettäväksi suurten kohteiden tarkasteluun, mutta 5 % on soveliaampi raja-arvo tarkasteltaessa pieniä kohteita maastotaustaa vasten, mikä vastaa tyypillistä tilannetta taistelukentällä.

Edellä mainittu ilmakehän vaimennuskertoimen σ koostuu absorptioon aiheuttamasta vaimennuksesta α ja sironnan aiheuttamasta vaimennuksesta β : $\sigma = \alpha + \beta$.

²⁸ Meteorologisen säätiedotuksen mukaan erittäin huono näkyvyys tarkoittaa alle 1 km näkyvyyttä, huono näkyvyys 1 – 4 km, kohtalainen 4 – 10 km ja hyvä näkyvyys yli 10 km visuaalista näkyvyyttä.

Optiset komponentit

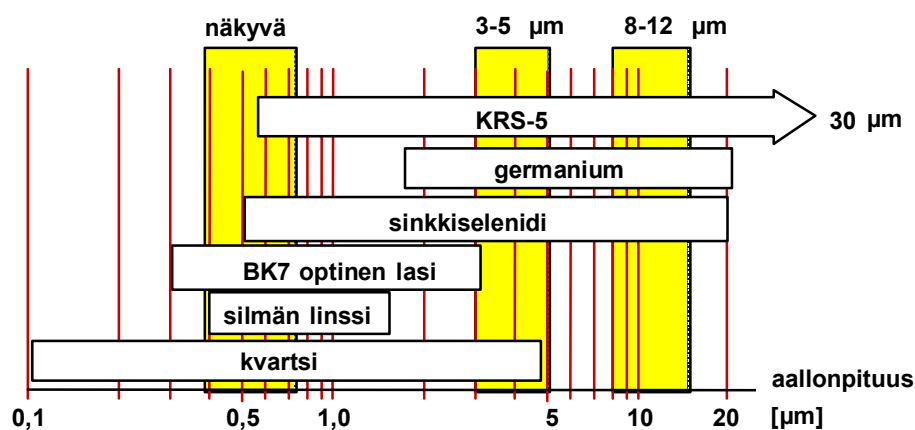
Optiikan tehtävänä on kerätä mahdollisimman suuri osa maalista tulevasta säteilyenergiasta ja kohdentaa se ilmaisimelle. Mitä suurempi optiikan läpimitta on, sitä enemmän sillä kyetään keräämään säteilyä. Toisaalta aseiden ja tähtäinten suuri koko ei ole toivottavaa käytettävyyden kannalta. Optiikan keskeiset optiset parametrit ovat:

- f polttoväli
- D objektiivin tehollinen läpimitta
- F-luku objektiivin valovoima ($F = f / D$)
- t_0 optiikan läpäisy

Polttoväli on kuvan etäisyys silloin, kun kohde on äärettömän kaukana. F-luku kuvaa polttovälin suhdetta läpimittaan. Pieni F-luku merkitsee suurta läpimittaa ja kalliimpia linsejä. Optiikan läpäisy kuvaa sitä prosenttimäärää optiikkaan tulevasta valosta, joka ei heijastu eri rajapinnoista tai absorboitu linssimateriaaleihin, vaan kulkee optiikan läpi detektoreille ja vahvistinputkille.

Tavallinen lasi on läpinäkyvää vain näkyvän valon ja lähi-infrapun aallonpituudella. Lasissa olevan veden vuoksi lasi muuttuu läpinäkymättömäksi yli $2,7 \mu\text{m}$ aallonpituuksilla. 3 - $5 \mu\text{m}$ ikkunassa voidaan käyttää piitä tai sinkkiselenidiä, mutta 8 - $12 \mu\text{m}$ ikkunassa on käytettävä germaniumia, joka on edellisiä noin kaksi kertaa kalliimpaa. Germaniumin taitekerroin on 4, minkä vuoksi noin 36 % tulevasta säteilystä heijastuu takaisin tulosuuntaansa. Heijastusten minimoimiseksi germaniumilinsit on yleensä päällystetty heijastuksia estävällä materiaalilla. Päällystetyn germaniumilinsin läpäisykerroin on tyypillisesti luokkaa $t_0 = 94 - 96 \%$.

Infrapunateknologiassa käytettävien puolijohteiden suuren taitekertoimen vuoksi linssien käyttö on ongelmallista, muun muassa sen vuoksi, että säteily taipuu kulmassa, joka riippuu säteilyn aallonpituudesta. Sen vuoksi lämpökameroissa ja lämpöhakupaissä käytetään useimmin peilioptiikkaa (esim. Cassegrain-syöttö). Tällöin säteily joutuu kulkemaan materiaalin läpi vain radomin tai suojaikkunan läpi kulkiessaan. Peileillä on se etu, että heijastuskulma ei riipu tulevan säteilyn aallonpituudesta.



Kuva 222: Optisten materiaalien toiminta-aallonpituuksia.

Johnsonin kriteeri

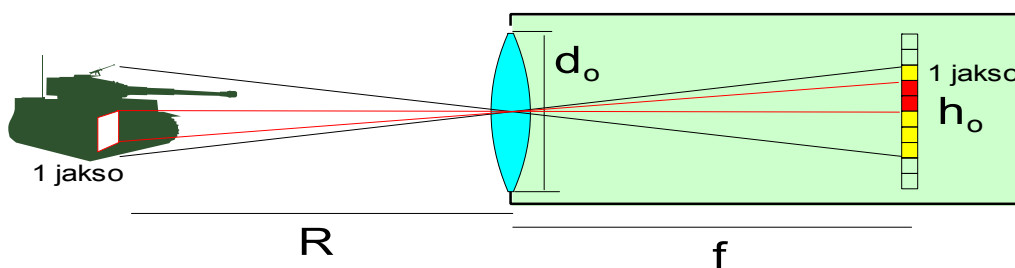
Sensorin toimintaetäisyys riippuu muun muassa siitä, kuinka ison kuvan kohde muodostaa ilmaisimatriisille tai pyyhkäisevän sensorin muistimatriisiin. H_T kokoisesta kohteesta projisoituvan kuvan koko h_o saadaan kohteen etäisyyden R ja sensorin optiikan polttovälin f perusteella kaavasta:

$$\frac{R}{H_T} = \frac{f}{h_o} \quad \text{joten} \quad h_o = \frac{f \cdot H_T}{R}$$

Kohteesta tarvittavien kuvaelementtien määrä riippuu siitä mihin saatua kuvaa aiotaan käyttää. Jos tarkoituksena on vain havaita kohde (detection), tarvitaan vähintään yksi *kahden elementin jakso* (cycle), jotta kohde erottuisi taustastaan²⁹. Kohteen tunnistamiseen (recognition) ja yksilöintiin (identification) tarvitaan useampia jaksuja. Yleisesti käytetään niin sanottua Johnsonin kriteeriä, jonka mukaan kohteen:

1. havaitsemiseen tarvitaan 1 jakso (2 elementtiä)
2. tunnistamiseen tarvitaan 4 jaksoa (8 elementtiä)
3. yksilöintiin tarvitaan 7 jaksoa (14 elementtiä)

Johnsonin kriteeri perustuu kokeellisiin selvityksiin, joissa yllämainituilla rajoilla 50 % ihmistä tunnisti tai kykeni yksilöimään kohteen oikein. Käytännössä tarvittavien jaksujen määrä riippuu kohteen muodosta ja ihmissilmän osalta myös elementtien kontrastista taustaansa vasten.



Kuva 223: Kohteen minimikoko sensorin ilmaisimatriisilla (h_o) riippuu kohteen pienimmästä mitasta H_T , etäisyydestä ja sensorin optiikan polttovälistä f .

Yksi jakso vastaa kahta elementtiä, joten jakso voidaan havaita korkeintaan etäisyydeltä:

$$R \leq \frac{H_T \cdot f}{2 \cdot x}$$

jossa x on ilmaisinelementtien koko millimetreinä ja f optiikan polttoväli millimetreinä. Vastaavasti N jaksoa voidaan havaita korkeintaan etäisyydeltä:

²⁹ Kahden ”kirkkaan” pisteen erottamiseksi toisistaan tarvitaan niiden väliin yksi ”tumma” piste. Tätä kirkkaan ja tumman pisteen muodostamaa paria kutsutaan jaksoksi.

$$R \leq \frac{H_T \cdot f}{2 \cdot x \cdot N} \text{ tai } R \leq \frac{H_T \cdot f \cdot P}{2 \cdot N}, \text{ missä } P \text{ on ilmaisinelementtien määrä millimetrillä.}$$

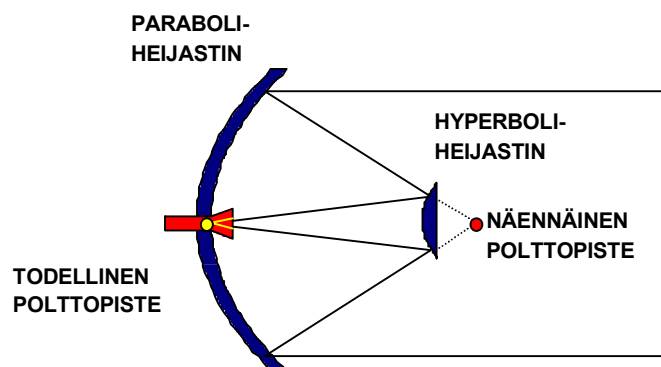
Johnsonin kriteerin mukaisesti tarvittava jaksojen määrä N on havaitsemiseen 2, tunnistamiseen 4 ja yksilöintiin 7, joten:

$$\text{havaitsemisetäisyys: } R_{\text{det}} = \frac{H_T \cdot f \cdot P}{2}$$

$$\text{tunnistusetäisyys: } R_{\text{rec}} = \frac{H_T \cdot f \cdot P}{8}$$

$$\text{yksilöintietäisyys: } R_{\text{id}} = \frac{H_T \cdot f \cdot P}{14}$$

Etäisyyksiä voidaan kasvattaa lisäämällä detektorielementtien tiheyttä ilmaisimatriisissa tai kasvattamalla optiikan polttoväliä. Ilmaisinelementtien tiheyden teoreettisen ylärajan asettaa se, että elementin pitäisi olla vähintään noin $2 \cdot \lambda$ -kokoinen. Valmistustekniikka ei mahdollista teoreettisen rajan saavuttamista. Nykytekniikalla elementtien minimikoko on noin 40 - 50 μm . Polttovälin kasvattaminen johtaa kapeampaan sensorin näkökenttään, mikä on kompensoitava joko pyyhkäisemällä vähän kerrallaan koko valvottavan sektorin yli tai lisäämällä sensorielementtien määrää. Optiikan läpimitta asettaa rajansa polttovälin suuruudelle ja optiikan virheet ilmaisimen koolle; kuvan laidoilta tulevat nk. marginaalisäteet aiheuttavat kuvausvirheitä, joten kuva-ala polttotasossa joudutaan rajoittamaan kuvausvirheiden pienentämiseksi. Sähkömagneettisen säteilyn diffraktioehto asettaa lopullisen rajan optiikan erotuskyvylle. Diffraktion vaikutuksesta kirkas piste kuvautuu sameareunaiseksi täpläksi kuvatasolle. Täplässä on kirkas keskikohta, jota ympäröivät himmeät renkaat. Täplän halkaisija riippuu säteilyn aallonpituudesta sekä optiikan polttovälin ja läpimitan suhteesta. Diffraktiotäplä kasvaa säteilyn aallonpituuden ja f -luvun kasvaessa. Mikäli optiikka ei kykene projisoimaan kahta eri kuvapistettä selvästi erillisiksi jaksoiksi kuvatasolle, ei ilmaisinelementin parempi resoluutio auta.



Kuva 224: Cassegrain-rakenteessa polttoväli saadaan lyhyemmäksi sillä, että tuleva säde heijastetaan parabolisella peilillä edessä olevaan hyperboliseen heijastimeen, josta se heijastuu ilmaiseimeen. Periaate toimii sekä RF-alueella että optisilla aallonpituuksilla.

Valmistustekniikka rajoittaa detektorielementtien lukumäärää ilmaisimatriisissa. Valmistustekniikasta ja ilmaisimateriaalista riippuen matriisi voi olla nykyisin 512 x 512 – 2040 x 2048 -elementin kokoinen. Linssin polttovälin ja läpimitan suhde f/d_0 puolestaan on maksi-

missaan 1,5 – 5. Tutkajärjestelmissä ja optisissa järjestelmissä käytettävän Cassegrain-rakenteen avulla saadaan aikaan hyvinkin pitkiä polttovälejä pieniläpimittaisiin järjestelmiin. Cassegrain-menetelmän toimintaperiaate käy ilmi kuvasta 224. Menetelmän merkittävimmäksi ongelmaksi muodostuu se, että edessä oleva peili peittää osan ilmaisimen näkökentästä ja sen vuoksi osa kohteesta tulevasta signaalista ei pääse ilmaisimeen.

Esimerkki:

Oletetaan sensorin optiikan läpimitaksi $d_o = 150$ mm ja polttoväliksi $f = 200$ mm. Ilmaisimella on $P = 100$ elementtiä millimetrillä. Jos sensorilla tarkasteltavien maalien minimidimensio on $H_T = 2$ metriä, saadaan havainto, tunnistus- ja yksilöintietäisyyksiksi:

$$\text{Suurin havaitsemisetäisyys} \quad R_{\text{det}} = \frac{H_T \cdot f \cdot P}{2} = \frac{2 \cdot 200 \cdot 100}{2} = 20 \text{ km}$$

$$\text{Suurin tunnistusetäisyys} \quad R_{\text{rec}} = \frac{H_T \cdot f \cdot P}{8} = \frac{2 \cdot 200 \cdot 100}{8} = 5 \text{ km}$$

$$\text{Suurin yksilöintietäisyys} \quad R_{\text{id}} = \frac{H_T \cdot f \cdot P}{14} = \frac{2 \cdot 200 \cdot 100}{14} = 2,9 \text{ km}$$

On huomattava, että Johnsonin kriteerin avulla voidaan määrittää havaitsemis-, tunnistus- ja yksilöintietäisyydet vain maalin ilmaisimelle projisoiman kuvan mukaisesti. Kriteeri ei ota huomioon kohteesta saatavan signaalin tason vaikutusta tai ilmaisinelementtien laatua.

Kohinan vaikutus

Johnsonin kriteerin täyttymisen lisäksi kohteesta on saatava riittävän suuri signaali, jotta se kyetään erottamaan sensorin ilmaisimen kohinasta. Sensorin ilmaisim (detektori) on laite, joka muuttaa optiikan kautta tulevan fotonivirran sähköiseksi signaaliksi. Fotonin energia on suoraan verrannollinen taajuuteen ($E=h \cdot f$), minkä vuoksi matalilla taajuuksilla (eli pitkällä aallonpituuksilla) fotoneilla on pienempi energia kuin korkeilla. Pitkän aallonpituuden ilmaisimissa tulevan fotonivirran ja ilmaisimen sisäisen lämpökohinan ero on siten pienempi kuin suuritajuisten säteilyn ilmaisimissa. Tämän vuoksi termisen infrapunalueella ilmaisimien joudutaan useimmiten jäähdyttämään sisäisen kohinatason laskemiseksi. Lyhyemmällä aallonpituuksilla, kuten näkyvällä valolla ja lähi-infrapunalla jäähdytystä ei yleensä tarvita.

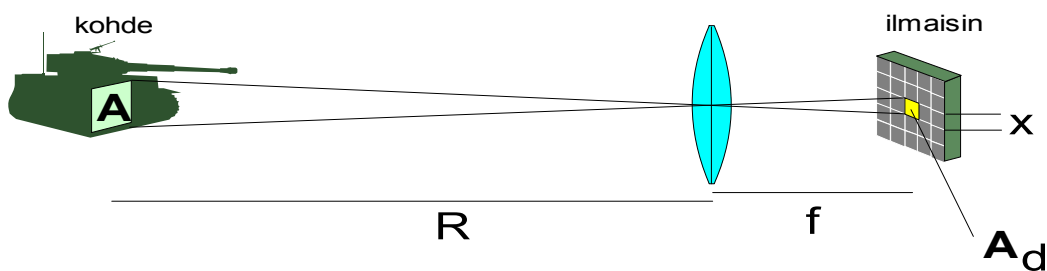
Tärkeimmät ilmaisimen toimintaan liittyvät parametrit ovat ilmaisimen tehokkuutta kuvaava *vaste* R (responsivity), joka kuvaa sensorin antaman signaalin suhdetta sensorin absorboimaan tehoon, ilmaisimen sisäisen kohinatason käänteisarvoksi määritelty *ilmaisevuus* $D = 1/\text{NEP}$ (detectivity) sekä *normitettu ilmaisevuus* D^* , jossa on otettu huomioon kohinatason lisäksi ilmaisimen pinta-ala A_d [cm^2] ja kaistanleveys Δf [Hz]:

$$D^* = \frac{\sqrt{A_d \cdot \Delta f}}{\text{NEP}} \quad [\text{cm Hz}^{1/2} \text{ W}^{-1}]$$

Mitä suurempi ilmaisevuus on, sitä paremmin ilmaisimella kykenee havaitsemaan säteilyä. Seuraavassa tarkastellaan ilmaisimen ominaisuuksien ja kohteesta saatavan signaalin vaikutusta sensorin toimintaetäisyyteen.

Sensorin elementin näkökenttä (field-of-view, FOV) saadaan kaavasta $\theta_{\text{FOV}} = \frac{x}{f}$, missä x on ilmaisinelementin koko millimetreinä ja f optiikan polttoväli millimetreinä. Tällöin ilmaisinelementin projektiopinta-ala kohteessa saadaan kaavasta

$$A = \left(\theta_{\text{FOV}} \cdot R \right)^2 = \left(\frac{x}{f} \cdot R \right)^2$$



Kuva 225: Ilmaisimen elementin kohteeseen projisoima pinta-ala A riippuu kohteen etäisyydestä R , sensorin optiikan polttovälistä f ja ilmaisinelementin koosta x .

Edellä kuvatun esimerkin tapauksessa 20 km havaintoetäisyydellä yhden ilmaisinelementin 'näkemäksi' pinta-alaksi saadaan

$$A = \left(\frac{x}{f} \cdot R \right)^2 = \left(\frac{0.01}{200} \cdot 20000 \right)^2 = 1 \text{ m}^2$$

Ilmaisimen elementin on saatava kohteesta riittävä signaali, jotta kohde erottuisi ilmaisimen omasta kohinasta. Jos kohde säteilee tehon J [W/sterad], niin kohteesta saadaan teho

$$S = J \cdot \Omega \cdot t_o \cdot t_a$$

jossa Ω on sensorin peittämä avaruuskulma, t_o ($\sim 0,8-0,9$) sensorin optiikan läpäisykerroin ja t_a ilmankin läpäisykerroin. Sensorin optiikan kattama avaruuskulma saadaan kaavasta:

$$\Omega = \frac{\pi \cdot d_o^2}{4 \cdot R^2}$$

olettaen, että kohde on pistemäinen. Tämä oletus pitää paikkansa, mikäli kohde on pieni etäisyyteensä verrattuna. Vastaanotettava signaaliteho saadaan muotoon:

$$S = \frac{\pi \cdot J \cdot x^2 \cdot d_o^2}{4 \cdot f^2} \cdot t_o \cdot t_a$$

jossa d_o on sensorin optiikan halkaisija ja t_a ilmakehän läpäisy, joka voidaan laskea vaimennuskertoimen σ avulla:

$$t_a = e^{-\sigma R}$$

Pienin sallittu signaaliteho S_{\min} riippuu sensorin kohinatehosta NEP ja pienimmästä sallitusta signaalikohinasuhteesta SNR_{\min} :

$$S_{\min} = NEP \cdot SNR_{\min}$$

NEP tarkoittaa tehoa, jolla kohteesta tuleva signaali on yhtä suuri kuin järjestelmän ilmaisten sisäinen lämpökohina ($SNR=1$). Jos sensorilla ei olisi lainkaan omaa kohinaa, sen suorituskky riippuisi pelkästään tulevasta fotonivirrasta. Tällaista puhtaasti teoreettista suorituskkyrajaa kutsutaan lyhenteellä BLIP (Background Limited Performance). Käytännössä kaikkien ilmaisinten ja niitä seuraavien vahvistinten kohina nostaa sensorin kohinatasoa teoreettisesta. Kohina on sitä suurempaa, mitä korkeammassa lämpötilassa sensori toimii.

Pienimmän signaalitehon avulla voidaan laskea suurin toimintaetäisyys:

$$J \cdot \frac{\pi \cdot d_o^2}{4 R_{\max}^2} \cdot t_o \cdot t_a = NEP \cdot SNR_{\min} \Leftrightarrow R_{\max} = \sqrt{\frac{J \cdot \pi \cdot d_o^2 \cdot t_o \cdot t_a}{4 \cdot NEP \cdot SNR_{\min}}}$$

Normeeratun ilmaisevuuden D^* avulla kaava saadaan muotoon:

$$R_{\max} = \sqrt{\frac{J \cdot \pi \cdot d_o^2 \cdot D^* \cdot t_o \cdot t_a}{4 \cdot \sqrt{A_d \cdot \Delta f \cdot SNR_{\min}}}}$$

LÄMPÖSENSORIT

Lämpölähteet

Kuten jo luvussa *sähkömagneettinen spektri* todettiin, kaikki luonnossa olevat kohteet säteilevät lämpöä. Kappaleen säteilemä lämpömäärä riippuu vain kappaleen lämpötilasta. Todelliset luonnossa esiintyvät kappaleet eivät kuitenkaan käyttäydy aivan samoin kuin musta kappale, vaan säteilyn määrään vaikuttaa kappaleen *emissiivisyys* ϵ :

$$W = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

Emissiivisyys määritellään todellisen kappaleen säteilemän lämpötehon suhteeksi vastaavan mustan kappaleen säteilemään lämpötehoon. Mustan kappaleen emissiivisyys on siten $\varepsilon=1$. Harmaaksi kappaleeksi nimetyn teoreettisen kappaleen emissiivisyys on alle yhden, mutta kuitenkin vakio. Kaikkien todellisten kappaleiden emissiivisyys riippuu aallonpituudesta. Taulukossa 13 on esitetty tietoja joidenkin materiaalien emissiivisyydestä.

<u>materiaali</u>	<u>emissiivisyys ε</u>	<u>materiaali</u>	<u>emissiivisyys ε</u>
ihmisen iho	0,98	maali keskimäärin	0,94
lasi	0,94	ruostunut metalli	0,2 – 0,8
kuiva maa	0,92	metsä	0,90
märkä maa	0,95	hiekkä	0,90
		kiillotettu alumiini	0,05

Taulukko 13: Esimerkkejä eri materiaalien emissiivisyydestä ε .

Reflektiivisyys ja emissiivisyys liittyvät toisiinsa, sillä reflektiivisyys $\rho = 1 - \varepsilon$. Hyvin heijastava materiaali säteilee siis itse huonosti ja huonosti heijastava materiaali säteilee paljon. Kohde, jonka emissiivisyys on suuri, säteilee voimakkaasti ympäristöönsä ja kohde, jonka emissiivisyys on pieni, heijastaa voimakkaasti ympäristöstään tulevaa lämpösäteilyä. Toisinaan juuri nämä heijastukset paljastavat kohteen; esimerkiksi peittämättömät pystysuorat tai vinossa olevat ikkunat heijastavat taivaan kylmyyttä ja näkyvät selkeästi lämpö-sensoreissa, vaikka kohde itse ei emittoisi juurikaan. Toisinaan taas esimerkiksi kuuman moottorin lämmittämät ajoneuvon rungonosat säteilevät itse niin voimakkaasti, että ajoneuvo paljastuu. Seuraavassa taulukossa on esitetty eri kohteiden tyypillisiä lämpöjälkiä.

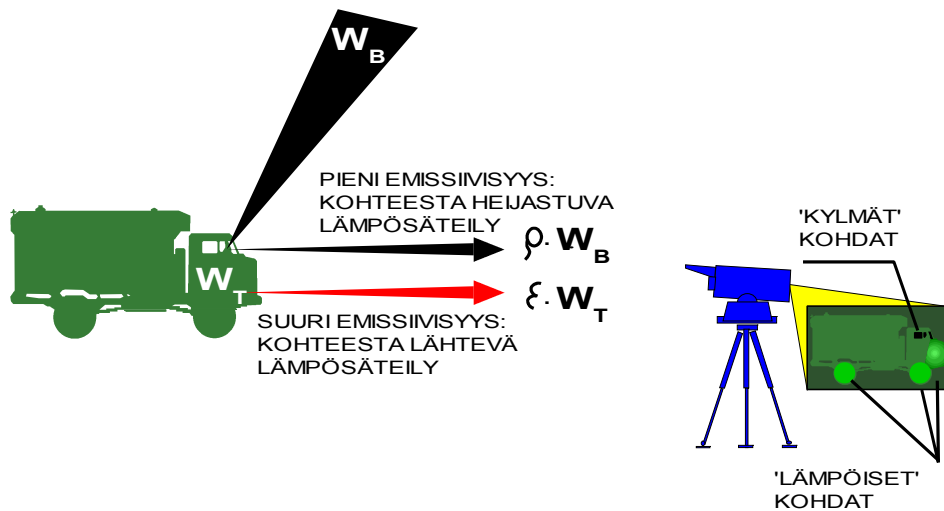
<u>maalin tyyppi</u>	<u>SÄTEILYTEHO W / STERAD</u>	
	<u>3 – 5 μm alueella</u>	<u>8 – 12 μm alueella</u>
helikopteri	10 – 100	100 – 300
potkurikone	20 – 200	200 – 500
suihkuhävittäjä	50 – 1 000	100 – 10 000
suuri kuljetuskone	100 – 1 000	100 – 5 000

Taulukko 14: Eri kohteiden lämpöjälkiä (säteilyteho avaruuskulmassa).

Lämpökontrasti, eli kontrasti termisen infrapunan alueella

Lämpösensori havaitsee maalin vain, mikäli maalin kontrasti taustaansa on riittävä. Lämpökontrasti määritellään kaavalla:

$$C = \frac{W_T - W_B}{W_T + W_B}, \text{ missä } W_T \text{ on maalin ja } W_B \text{ taustan säteilemä lämpöteho.}$$



Kuva 226: Osa sensoriin kohteesta tulevasta säteilystä on peräisin kohteesta itsestään ja osa on heijastunut, esimerkiksi kylmältä taivaalta.

Jos kohde on lähellä taustan lämpötilaa, kaava voidaan supistaa muotoon:

$$C = \frac{2 \cdot \Delta T}{T}, \text{ missä } \Delta T \text{ on maalin ja taustan lämpötilaero ja } T \text{ on taustalämpötila.}$$

Lämpökontrasti on tyypillisesti huomattavasti pienempi kuin optinen kontrasti; esimerkiksi 2 K lämpötilaero 20 °C lämpötila-alueella johtaa 1,4 % kontrastiin, kun optisella alueella kontrasti saattaa olla useita kymmeniä prosentteja.

Ilmakehän absorptiosta ja sironnasta johtuva vaimennus pienentää kontrastia. Erityisesti sironta pienentää kontrastia, koska siinä säteily leviää sirottavasta kappaleesta joka suuntaan ja vastaavasti sensorille tulee joka suunnasta sironnutta säteilyä. Lisäksi säteen kulkureitillä olevan pölyn, sumun tms. väliaineen oma emissio heikentää sensorin saamaa kontrastia maalista. Jos kohteen ja taustan lämpötilaero on ΔT_0 , niin etäisyydellä R kohteesta tuleva säteily eroaa taustasta vain:

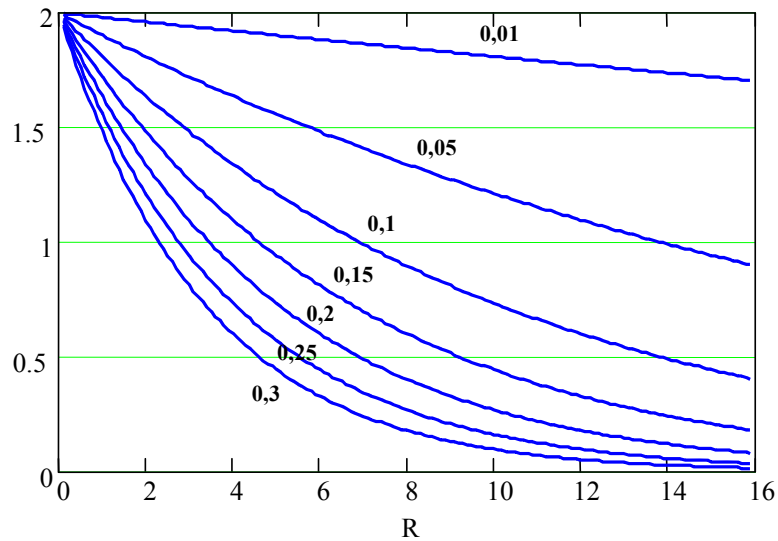
$$\Delta T(R) = \Delta T_0 \cdot e^{-\sigma R}$$

Kuvassa 227 on esitetty kahden asteen lämpötilaeron pienenemistä etäisyyden funktiona.

Lämpösensorijärjestelmän ominaisuuksista keskeisin on pienin havaittavissa oleva lämpötilaero (MRTD, Minimum Resolvable Temperature Difference), joka riippuu sensorin lämpöherkkyydestä sekä erottelukyvystä. MRTD huomioi sensorin kohinan, resoluution, optiikan virheet ja signaalinkäsittelyn vaikutuksen.

Arvioitaessa järjestelmän käytettävyyttä kenttäolosuhteissa on huomattava, että MRTD kuvaa pienintä havaittavaa lämpötilaeroa sensorilla, eikä maalissa. Jos pienintä havaittavaa lämpötilaeroa sensorilla merkitään MRTD:llä ja lämpötilaeroa kohteessa ΔT_0 , niin suurin toimintamatka saadaan edellisen perusteella kaavasta

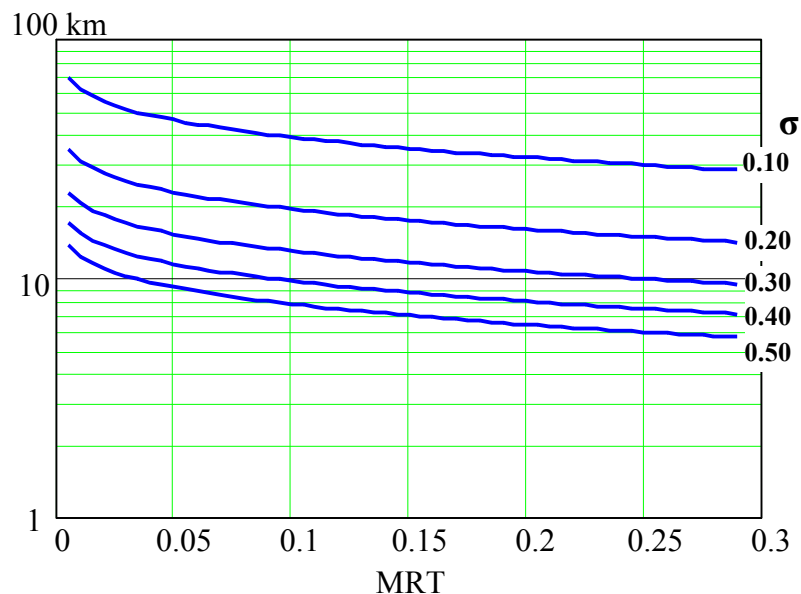
$$R_{\max} = \frac{\ln\left(\frac{\Delta T_0}{\text{MRTD}}\right)}{\sigma}$$



Kuva 227: Lämpökontrasti pienenee etäisyyden funktiona sitä nopeammin, mitä suurempi ilmakehän vaimennuskerroin σ on. Kuvassa σ vaihtelee välillä 0,01 ja 0,3.

Kuvassa 228 on esitetty sensorin toimintaetäisyys MRTD:n funktiona, kun lämpötilaero kohteessa (etäisyydellä 0) on 5 K. Sensorin MRTD vaihtelee kuvaajassa välillä 5-300 mK.

Maksimikantama
MRT:n funktiona



Kuva 228: Sensorin maksimi toimintamatka MRTD:n funktiona eri vaimennuskertoimen arvoilla, kun lämpötilaero kohteessa on 5 K. Vaimennuskerroin vaihtelee välillä $\sigma = 0,10 - 0,50$.

Toinen tapa ilmaista sensorin suorituskykyä on kertoa, mikä lämpötilaero vastaa ilmaisimen omaa kohinatasoa (NETD, Noise Equivalent Temperature Difference), eli millä kohteen lämpötilalla ilmaisimessa saavutetaan signaalikohinasuhde $SNR=1$. NETD riippuu optiikan läpimitasta: mitä suurempi optiikka, sitä enemmän se kerää säteilyä kohteesta ja sitä

pienempi sensorin NETD on. Järjestelmiä verrattaessa tämä tulee aina ottaa huomioon; eri järjestelmien NETD-arvoja ei välttämättä ole mitattu samanlaisella optiikalla³⁰. MRTD on tässä mielessä parempi, koska se huomioi sekä lämpö- että paikkaerotuskyvyn, mutta toisaalta sen määrittämiseen tarvitaan joukko havaitsijoita, kun taas NETD voidaan mitata suoraan järjestelmästä.

Transmissioikkunat

Hakupäissä käytetään ilmaisimen valmistusteknologiasta ja maalityypeistä riippuen useita eri ilmakehän transmissioikkunoita:

0.3 - 0.9 μm näkyvän valon alue

1.0, 1.3, 1.6 μm ja 2.2 μm heijastuvan eli lähi-infrapunan alueen kapeitaikkunoita

3 - 5 ja 8 - 14 μm terminen infrapuna-alue

Ilmatorjuntaohjusten yhteydessä käytetään myös nimityksiä I-alue (2.2 μm ikkuna) ja II-alue (3 - 5 μm ikkuna). Lentokoneiden kuumiin osiin hakeutuvien ohjusten hakupäissä käytetään 3-5 μm aallonpituuksilla toimivia ilmaisimia. Sumun ja sateen partikkelikoko on lähellä tällaisen sensorin aallonpituutta, joten ne aiheuttavat vaimennusta, mutta savukaasut eivät. 3 - 5 μm alueella toimivan ohjuksen ongelmana on se, ettei se kykene hakeutumaan kohti tulevaan lentokoneeseen, jonka lämpötila on lähellä taustansa. Taustansa lämpöisten kohteiden (5-25°C) säteilyintensiteettihiippu on noin 10 μm aallonpituudella, minkä vuoksi lämpötähtäimissä ja uusimmissa ilmatorjuntaohjusten hakupäissä käytetään hyväksi ilmakehän 8 - 12 μm transmittanssi-ikkunaa. Suhteellisen pitkä aallonpituus johtaa taistelukentän savujen (partikkelin läpimitta noin 0,5 μm) ja pölyn (1-10 μm) parempaan läpäisyyn. Myös sumun (5 μm) läpäisy on parempi kuin lyhyemmällä aallonpituuksilla. Tällä alueella vaimennusta dominoi ilmakehän molekyylit, erityisesti vesi, absorptio ja olosuhteista riippuen vaimenemiskerroin σ vaihtelee välillä 0,11 - 0,47. 8-12 μm alueella voidaan toimia vain suhteellisen kuivassa ilmastossa; esimerkiksi trooppisessa ilmastossa suuri ilmankosteus johtaa siihen, etteivät lämpökamerat näe merenpinnan lähellä juuri mitään.

Lähi-infrapuna-alueella voidaan käyttää halpoja detektorimateriaaleja, esimerkiksi piipohjaisia ilmaisimia. Tällä alueella kohteiden säteilyintensiteetti on kuitenkin pienempi kuin 3 - 5 μm ja 8 - 12 μm alueilla. Lisäksi ilmakehän aiheuttama vaimennus on huomattavasti suurempi ($\sigma = 0,22 - 1,0$).

Sensori voidaan rakentaa myös niin, että se kykenee toimimaan sekä 3-5 μm että 8-12 μm alueella. Tällöin sensorissa on kummallekin aallonpituusalueelle oma detektorinsa, jotka hyödyntävät yhteistä optiikkaa. Sensoreissa käytettäviä ilmaisimia käsitellään myöhemmin.

³⁰ Vertailuissa joskus esiintyvä merkintä F/1-optiikka tarkoittaa F-lukua 1, jolloin optiikan polttoväli on sama kuin sen läpimitta.

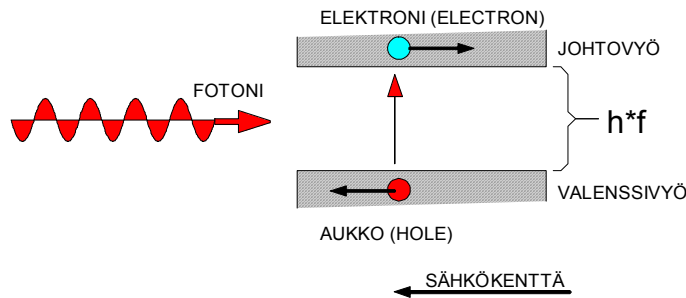


Kuva 229: Maatkotka-kaukotähystysjärjestelmään on asennettu televisio- ja lämpökameran sekä laseretäisyysmittarin sisältävä sensoripallo hydraulisesti nostettavan teleskooppimaston päälle. Telakuorma-autoalusta tarjoaa hyvän liikkuvuuden missä tahansa maastossa.

[Kotkavalkama]

Ilmaisimet

Ilmaisimet voidaan jakaa kahteen pääluokkaan; termisiin ja fotoniperiaatteella toimiviin kvantti-ilmaisimiin. Termisessä detektorissa toiminta perustuu siihen, että kohteesta tuleva lämpösäteily lämmittää elementtiä ja sensori mittaa elementin lämpötilan muutoksia. Kvantti-ilmaisimien puolestaan ilmaisee suoraan sieppaamansa fotonit. Se on noin 1000 kertaa termistä ilmaisinta herkempi. Koska fotonin energia ($E=h \cdot f$) termisellä infrapuna-alueella on hyvin pieni, on ilmaisimien jäähdytettävä, jotta ilmaisimen ja sitä ohjaavan elektroniikan oma sisäinen kohina ei peittäisi signaalia alleen. Teknisen kehityksen myötä on 3 – 5 μm alueelle kehitetty ns. keveitä lämpötähystyslaitteita ja tähtäimiä, joita ei tarvitse jäähdyttää. Tällöin laite voidaan rakentaa yksinkertaisemmaksi, keveämmäksi, pienemmäksi ja halvemmaksi. Varsinaiset lämpökamerat toimivat FIR-alueella 8 – 12 μm , millä fotonien energia on niin pieni, että nykyteknologialla toteutetut ilmaisimet on jäähdytettävä. Jäähdytettävän sensorin käytössä käynnistyksen ja toimintalämpötilan saavuttamisen välinen viive voi muodostua ongelmaksi joissakin käyttötarkoituksissa.



Kuva 230: Fotonivirityksen toimintaperiaate itseispuolijohteessa. Viritys voi tapahtua, mikäli tulevan fotonin energia vastaa .

Kvantti-ilmaisimet voidaan jakaa viiteen eri tyyppiin: fotojohtavuus- ja fotojänniteilmaisimiin, fotoemissiivisiin ilmaisimiin ja fotomagneettisiin ilmaisimiin sekä kvanttikaivoilmaisimiin. **Fotojohtavuusilmaisimessa** ilmaisimateriaaliin tuleva säteilykvantti luovuttaa koko energiansa valenssivyössä sijaitsevalle elektronille, jonka absorboima energia irrottaa sen kielletyn vyön yli johtovyöhön, jolloin vapautunut elektroni alkaa liikkua ilmaisimateriaalin ylitse vaikuttavan sähkökentän voimasta, eli syntyy sähkövirtaa. Säteilyn aallonpituuden on oltava raja-aallonpituutta (cut-off wavelength) pienempi (eli kvantin energian riittävän suuri), jotta fotoviritys toteutuu. Raja-aallonpituus riippuu viritykseen tarvittavasta energiasta, joka puolestaan riippuu viritysmekanismista, joka voi olla viritys itseispuolijohteen kielletyn vyön (bandgap) yli (esim. CMT), metallin ja puolijohteen kontaktipinnan yli (esim. PtSi) tai seostetun puolijohteen seosatomien energiatilojen välillä (esim. As:Si). Tarvittava viritysendergia on suurin itseispuolijohteessa ja pienin seostetuissa puolijohteissa, joten raja-aallonpituuskin on korkein itseispuolijohteissa, mutta toisaalta seostetuissa puolijohteissa energiatilojen väli on niin pieni, että ilmaisimen oma lämpöenergia irrottaa elektroneja helposti, joten nämä ilmaisimet on jäähdytettävä matalampaan lämpötilaan jotta fotonivirrasta syntyvä signaali erottuisi termisen kohinan yli.

Elohopea-Kadmium-Telluridia (HgCdTe), josta käytetään nimitystä CMT (Cadmium-Mercury-Telluride), voidaan käyttää sekä $3 - 5 \mu\text{m}$ että $8 - 12 \mu\text{m}$ ikkunassa säätämällä elohopean ja kadmiumin suhdetta. CMT on herkin ilmaisintyyppi, jonka raja-aallonpituus (suurin aallonpituus, jolla sensori toimii) on $12,3 \mu\text{m}$. Lyijysulfidi (PbS) ja lyijyselenidi (PbSe) ovat fotojohtavuusmateriaaleja, jotka toimivat lähi-infrapuna-alueella. Niitä käytetään kuumien kohteiden – esimerkiksi lentokoneen moottoreiden pakoaukkojen ilmaisemiseen ilmatorjuntaohjusten hakupäissä. Vaikka molemmat materiaalit toimivat ilman jäähdytystä, ne jäähdytetään usein herkkyuden parantamiseksi.

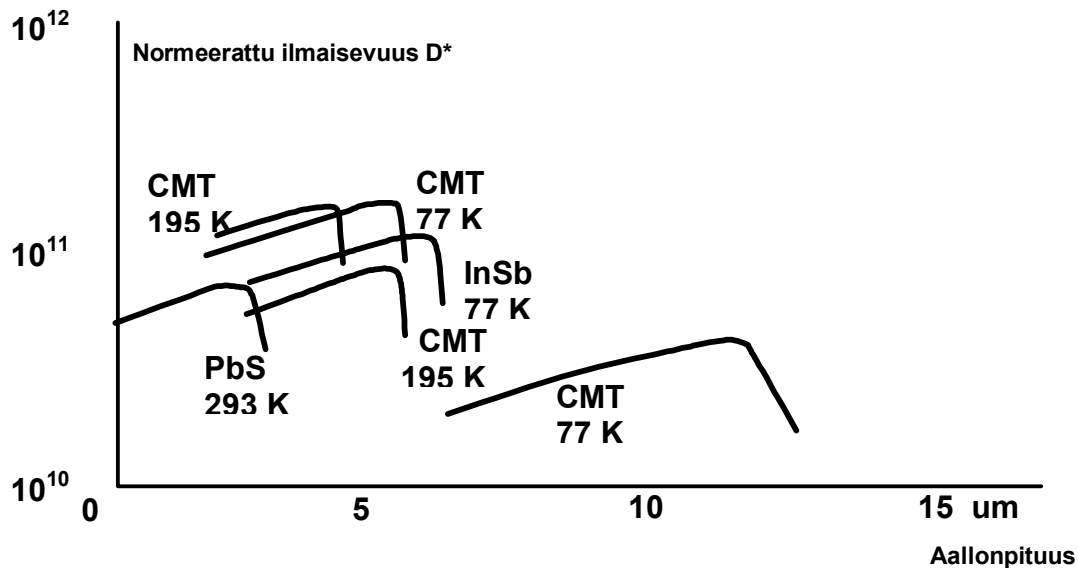
Fotojänniteilmaisimessa ilmaisinelementti on estosuuntaisesti biasoitu puolijohdediodi. Kun säteilykvantti absorboituu puolijohderajapintaan, se synnyttää elektroni-aukkoparin. Nämä kaksi varauksenkuljettajaa ajautuvat erilleen estosuuntaisen sähkökentän vuoksi, jolloin ilmaisimen läpi kulkee sähkövirta. Ilmiö on nopeampi kuin fotojohtavuusperiaate ja lisäksi siinä ilmaisimen läpi ei kulje levovirtaa, joka aiheuttaa kohinaa. Tämän vuoksi fotojänniteilmaisimen tehonkulutus ja kohina on pienempi kuin fotojohtavuusilmaisimen. Esimerkkinä fotojänniteilmaisimesta voidaan mainita indiumantimonidi (InSb), joka on eniten käytetty ilmaisimateriaali $3 - 5 \mu\text{m}$ ikkunassa. Sen vastealue on $1 - 6,2 \mu\text{m}$, joten se toimii myös heijastuvan infrapunon alueella. Tässä yhteydessä lienee paikallaan korostaa, ettei materiaali ja ilmaisimen toimintaperiaate riipu teknisesti toisistaan: fotojohtavuus ja fotojänniteilmaisimia voidaan valmistaa sekä piistä, että CMT:stä.

Materiaali	Aallonpituus [µm]	Jäähdytys	NETD	Esimerkkejä käyttökohteista
Si	0,2 – 1,15	Ei		näkyvän valon ilmaisimatriisit
InGaAs	0,5 – 1,7	Ei		NIR-lämpökamerat
PbS	1 – 3	Ei		infrapunahakuisten ohjusten hakupäät
PbSe	1 – 5	Ei		-- ” --
PtSi	3 – 5	Ei	50 mK	lämpökameroiden ilmaisimatriisit
InSb	2 – 6	77 – 200 K	25 mK	lämpötähtäimet, kuvaavat hakupäät
HgCdTe (CMT)	3 – 5 / 8 – 14	195 / 77 K	25 mK	-- ” --
Mikrobolometri	8 – 12	Ei	100 mK	monoliittiset ilmaisimatriisit
Pyrosähköinen	8 – 12	Ei	100 mK	
GaAs	0,5 – 0,9	Ei		kolmannen sukupolven valonvahvistin

Taulukko 15: Ilmaisimateriaalien ominaisuuksia

Fotoemissiivinen ilmaisimateriaali perustuu puolijohteen sisäiseen fotoemissioon; p-tyypin piipuolijohteen ja metalli-pii-yhdisteen rajapintaa valaistaan piipuolijohteen läpi, jolloin fotovirityksessä syntyvät aukot kulkeutuvat rajapinnan yli metallista puolijohteeseen. Metallina on tavallisesti platina tai iridium. PtSi-ilmaisimen raja-aallonpituus on 5,6 µm ja IrSi-ilmaisimen 9,5 µm, joten PtSi-ilmaisinta voidaan käyttää 3 - 5 µm alueella ja IrSi-ilmaisinta sekä 3 - 5 µm että 8 - 14 µm ikkunassa. Fotoemissiivisessä ilmaisimessa vaste riippuu pelkästään valitusta metallista, ja koska metallia - toisin kuin puolijohdetta - on helppo valmistaa erittäin puhtaana, matriisi-ilmaisimen eri elementit saadaan tällä menetelmällä keskenään samanlaisiksi. Toisaalta fotoemissiivisen ilmaisimen hyötysuhde on huomattavasti heikompi kuin aiemmin mainituissa ilmaisintyypeissä, millä tosin ei välttämättä ole kriittistä merkitystä matriisi-ilmaisimissa, joissa valotusaika saattaa olla riittävä tehottomillekin ilmaisimille. Termisiä ilmaisimia ovat esimerkiksi pyrosähköiset ilmaisimet ja bolometri-ilmaisimet. **Pyrosähköisessä ilmaisimessa** lämpötilan muutos muuttaa materiaalin polarisaatioastetta, mikä muuttaa ilmaisimateriaalin pinnan sähkövarausta. Tämä muutos indusoi sähkövirran ilmaisimen virtapiiriin. Pyrosähköinen ilmaisimateriaali kykenee havaitsemaan vain lämpötilan muutoksen, joten säteilytehon muutos synnytetään keinotekoisesti sähkömekaanisen katkojan avulla. Toisin kuin useimmat muut termiset ilmaisimet, pyrosähköiset ilmaisimet ovat erittäin nopeita. **Bolometri-ilmaisimessa** ilmaisimateriaali perustuu sähkönjohtokyvyn muutokseen. Bolometri-ilmaisimia voidaan valmistaa CMOS-teknologialla suoraan samalle mikropiirille kuin sitä ohjaava elektroniikkakin. Monoliittisen rakenteen vuoksi ilmaisimet ovat mekaanisesti erittäin kestäviä.

Termisen elementin toiminta ei riipu tulevan säteilyn aallonpituudesta, koska kaikki tuleva säteily lämmittää elementtiä. Absorptiotehokkuus riippuu ilmaisimen pinnan absorptiokertoimesta. Sopivalla pinnoitteella saavutetaan lähes tasainen vaste laajalla aallonpituusalueella, joka voi ulottua UV-alueelta termiselle infrapuna-alueelle saakka. Termisen ilmaisimen ongelmana on suhteellinen hitaus, koska elementin oma ominaislämpö hidastaa lämpötilan muutoksia, ja kvantti-ilmaisimia huonompi herkkyys, joka johtuu ilmaisimen oman lämpötilan aiheuttamasta kohinasta. Termisiä ilmaisimia käytetään yleensä 8 - 12 µm ikkunassa, jossa taustan lämpöisten kohteiden säteilyvuo on lähes 50 -kertainen 3 - 5 µm ikkunaa verrattuna. Ympäristön lämpötilassa toimivien termisten ilmaisinten lämpöresoluutio on 100 - 200 mK luokkaa, vaikka joidenkin lähteiden mukaan jopa 40 mK olisi saavutettu. Pyrosähköisten ilmaisinten resoluutio on 100 mK luokkaa.



Kuva 231: Erilaisten ilmaisinelementtimateriaalien tyypillisiä vasteita.

Keskeisenä etuna termisillä ilmaisimilla on niiden kyky toimia ilman jäädytystä, minkä vuoksi ne tulevat laskemaan taistelukentän lämpökameroiden, -tähtäinten ja -hakupäiden hintoja olennaisesti nykyisestä. Hintavaikutuksen lisäksi poistuva jäädytystarve johtaa pienempään kokoon ja painoon sekä vähäisempään tehonkulutukseen. Nämä yhdessä mahdollistavat lämpötähtäinten ja -hakupäiden käyttämisen hyvin monissa sovelluksissa. Vielä toistaiseksi jäädyttämättömien ilmaisimien yleistymistä hidastaa niiden huonosta herkkyydestä johtuva suuriläpimittaisen optiikan tarve.

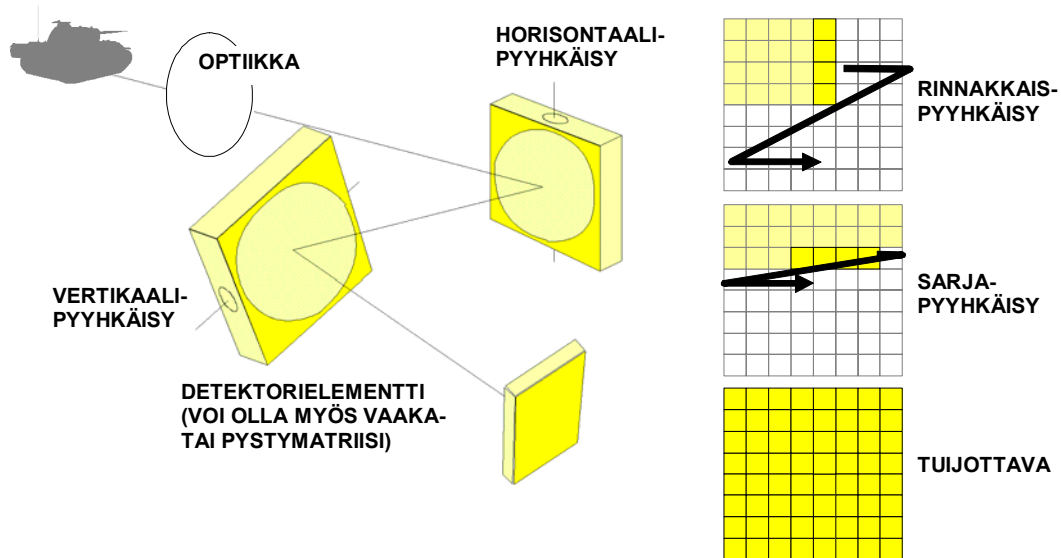
Kaksiväri-ilmaisim on ilmaisim, joka kykenee toimimaan kahdella eri aallonpituusalueella, tyypillisesti kahdessa eri ikkunassa; esimerkiksi 3 - 5 μm ikkunassa ja 8 - 12 μm ikkunassa. Koska ilmaisimen pinta-ala on jaettu kahteen osaan, sen herkkyys on pienempi kuin yhden ison. Tämä kuitenkin kompensoituu paremmilla EP-ominaisuuksilla, kuten myöhemmin hakupäiden yhteydessä tullaan havaitsemaan.



Kuva 232: Kaksi ranskalaisen Sagemin MATIS-lämpökameraa. Valmistaja lupaa järjestelmän havaitsevan taistelilijan 7,5 km ja ajoneuvon 9 km etäisyydeltä sekä tunnistavan ne 2 ja 3,5 km etäisyyksiltä. [Sagem]

Pyyhkäisy: Mikäli sensori perustuu yksielementtiseen ilmaisimeen, on sensorissa oltava pyyhkäisymekanismi, joka projisoi elementille kuvan yhdestä pisteestä kerrallaan. Tällöin sensori joutuu selaamaan koko kuva-alueen läpi ja elementille tulee fotoneita yhdestä kuvan pisteestä vain hyvin lyhyen aikaa. Mikäli elementtejä on useampia, voidaan kutakin kuvapistettä tarkastella pidempään ja saada kerättyä enemmän fotoneita. Mikäli sensorissa on yhtä kuvapistettä kohti yksi elementti, puhutaan tuijottavasta matriisista (staring array).

Nykytekniikalla kyetään valmistamaan ilmaisimatriiseja, joiden koko on 512x512 tai jopa 1024x1024 elementtiä. Näiden sensoreiden etuna on paremman herkkyyden lisäksi myös se, ettei pyyhkäisymekaniikkaa tarvita, jolloin sensorin hinta on huomattavasti pienempi kuin hienomekaniikkaan tukeutuvassa ratkaisussa. Toisaalta suurikokoinen matriisi on kallis ja tuo mukanaan ongelmia optiikan suunnitteluun. Lisäksi matriisi-ilmaisimen eri elementtien väliset herkkyserot on tasattava ohjelmallisesti, mikä lisää järjestelmän kompleksisuutta.



Kuva 233: Pyyhkäisevässä sensorissa pyörivät peilit projisoivat elementille yhden kohdan kuvasta kerrallaan, tuijottavassa kuvan osa näkyy koko ajan ilmaisimatriisille, joten se saa paremman signaalin maalista. Sarja- ja rinnanpyyhkäisy edustavat näiden välimuotoja. Pyyhkäisyyn voidaan myös hyödyntää esim. ammuksen omaa liikettä maan suhteen tai pyörimisliikettä pituusakselinsa ympäri.

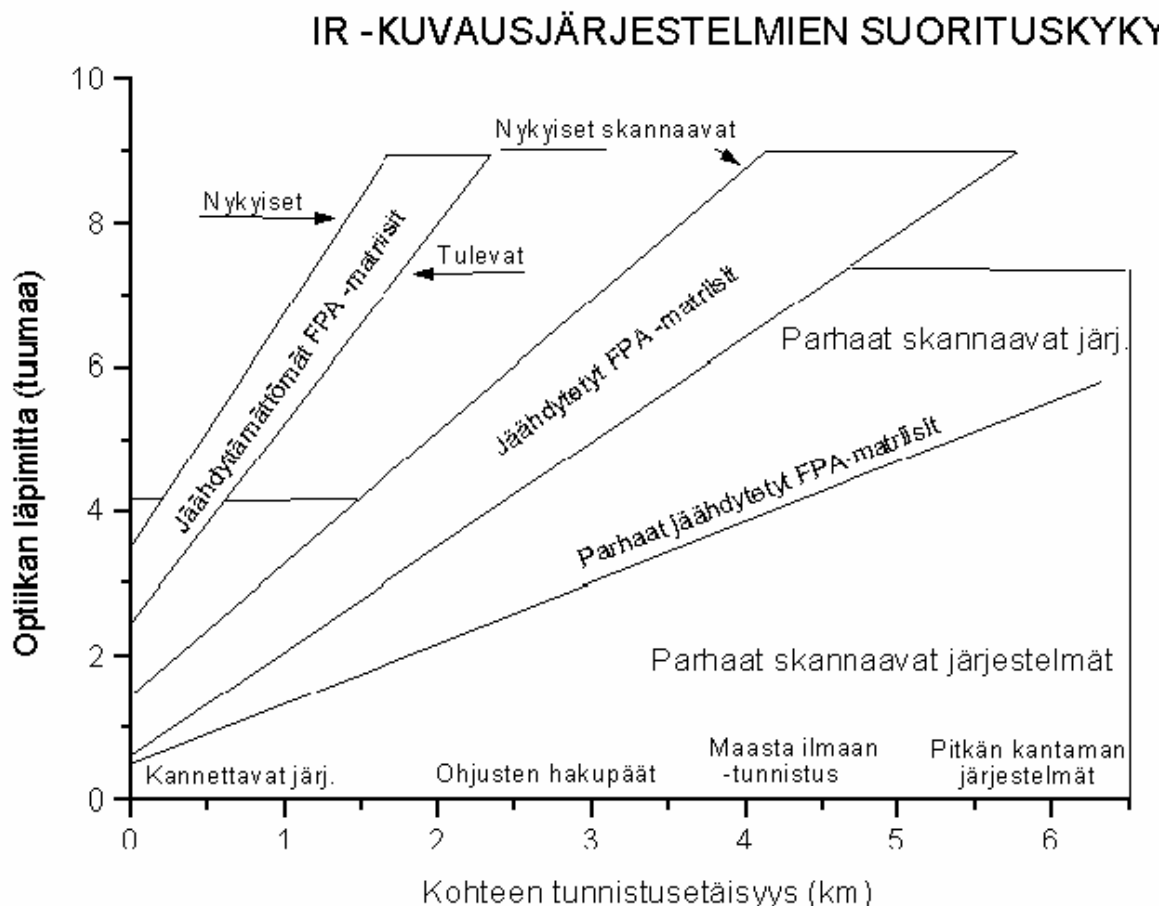
Jäähdytys

Lämpöensoreissa käytettävä jäähdytysmenetelmä riippuu siitä, onko kyseessä lyhyt- ja kertakäyttöinen laite, kuten ohjuksen lämpösensori, vaiko pitkä- ja monikäyttöinen, kuten panssarivaunun lämpötähtäin. Kertakäyttöinen jäähdytys toteutetaan useimmiten ns. Joule-Thomsonin-jäähdyttimellä. Siinä korkeapaineista kaasua puretaan paineastiasta kapean suuttimen kautta matalapaineiseen tilaan. Kaasun paineen vähetessä sen lämpötila laskee ja johdettaessa kaasua ilmaisimen taakse se jäähtyy. Jäähtynyt kaasu johdetaan ulos sensorista siten, että se kulkiessaan jäähdyttää suuttimelle tulevaa kaasua, jolloin suuttimeen tuleva kaasu on jo koko ajan entistä kylmempää. Lopulta kaasu nesteytyy ja ilmaisimella jäähtyy nesteytyneen kaasun lämpötilaan. Kaasun on oltava erikoispuhdasta (99,9999 %), jotta siinä olevat epäpuhtaudet eivät jäätyessään tukkisi suutinta. Sensoreissa käytetään joko ilmaa, typpeä tai argonia, jolla on näistä paras lämmönsiirtokyky. Joule-Thomsonin jäähdyttimellä saavutetaan nopeasti – noin 2 - 5 sekunnissa 80 - 90 Kelvinin toimintalämpötila. Siten

jäähdytin soveltuu hyvin ohjusten hakupäiden jäähdyttämiseen, koska odotusaika ohjuksen käynnistämisestä laukaisuvalmiuden saavuttamiseen on lyhyt. Nopea jäähdytys saa aikaan suuria lämpörasituksia, joten se ei sovellu toistuvaan toimintaan.

Mikäli jäähdytettävä kohde ei ole kertakäyttöinen, käytetään yleensä ns. Stirling-pumppua. Sen toimintaperiaate on samanlainen kuin Joule-Thomsonin-jäähdyttimen, mutta siinä purkautuva kaasu imetään takaisin kierto pumpun kautta. Toiminta perustuu siten suljettuun kaasun kierto – kuten kotipakastimenkin! Stirling-jäähdytyksellä voidaan saavuttaa 80 – 90 K toimintalämpötila noin 2-5 minuutissa. Mikäli pumpun mäntää ohjataan esimerkiksi magneettisesti, voidaan kierto toteuttaa hermeettisesti suljettuna.

Vaihtoehtona Striling-jäähdyttimelle on Peltier-jäähdytin, joka ei sisällä huoltoa vaativia kaasuja tai mekaanisia liikkuvia osia. Jäähdytys perustuu ns. Peltier-ilmiöön, jossa kahdesta metalliseoksesta valmistetussa materiaalissa toinen liitospinta jäähtyy ja toinen lämpenee sähkövirran vaikutuksesta. Yhdellä elementillä voidaan saavuttaa noin 230 K lämpötila ja usealla sarjaan kytketyllä elementillä jopa noin 170 K. Peltier-jäähdyttimen ongelmana on sen hitaus, minkä vuoksi sotilassovelluksissa käytetään yleensä joko Joule-Thomson- tai Stirling-jäähdytystä.



Kuva 234: Infrapunakuvausjärjestelmien suorituskyky riippuu toteutusteknologiasta ja optiikan läpimitasta. [Lähde: Puolustusvoimien sotatekninen arvio ja ennuste 2001]

Lämpöhakupäät

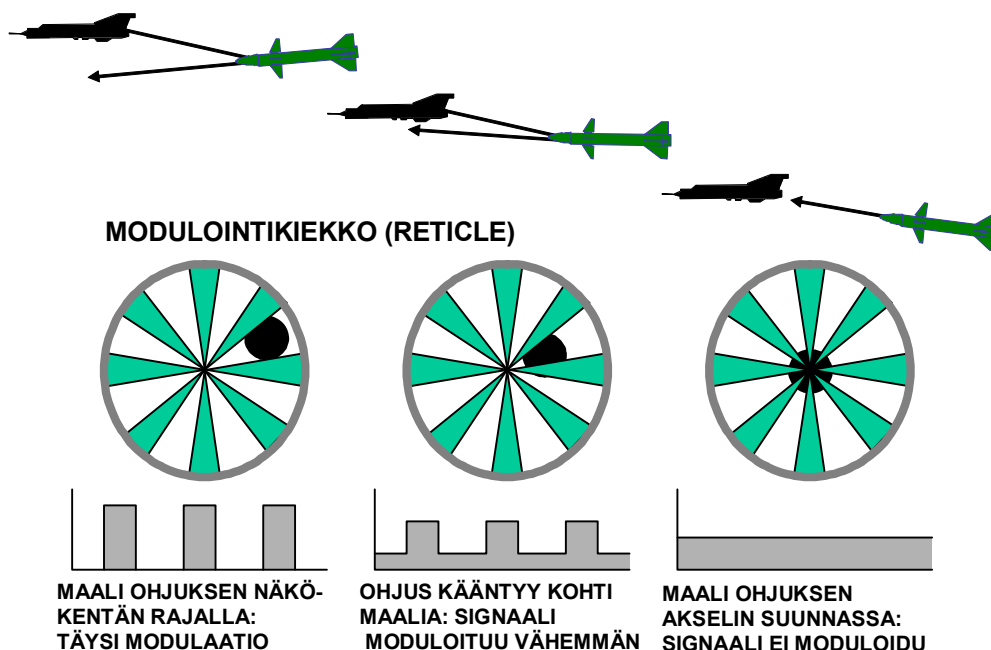
Lämpöhakupään tehtävänä on etsiä maali, lukittua siihen ja antaa asean ohjauselektronikalle tarvittava suuntatieto asean pitkittäisakseliin nähden asean ohjaamiseksi maaliin. Hakupään antama signaalikohinasuhde SNR, joka osaltaan määrittlee hakupään lukkiutumisetäisyyden, saadaan kaavasta:

$$\text{SNR} := \frac{(I_{\text{tgt}} \cdot t_a - I_{\text{bgd}}) \cdot t_o}{\text{NEI} \cdot R^2}$$

jossa I_{tgt} on maalin säteilyvoimakkuus (irradianssi) hakupään kaistalla, t_a on ilma-kehän transmittanssi sensorin aallonpituusalueella, I_{bgd} on taustan säteilyvoimakkuus sensorin kaistalla, t_o on sensorin optiikan transmittanssi, NEI on sensorin sisäistä kohinatasoa vastaava säteilyvoimakkuus ja R on maalin etäisyys sensorista. NEI voidaan laskea normeeratun ilmaisevuuden D^* tai ekvivalenttisen kohinatehon NEP perusteella.

Mitä pidempään sensorin ilmaisin kykenee keräämään energiaa maalista, sitä pienempi signaalikohinasuhde tarvitaan, sillä sensori kykenee tällöin integroimaan saatavaa signaalia pidempään, mikä pienentää satunnaisesti jakautuneen kohinan suhteellista osuutta. Tämän vuoksi tuijottavan (staring) sensorin suorituskyky on olennaisesti parempi kuin pyyhkäisevän (scanning). N-elementtisen ilmaisimen suorituskyky on $\oplus N$ -kertainen 1-elementtiseen verrattuna pidemmästä tuijotusajasta johtuvan paremman signaalikohinasuhteen vuoksi.

Lämpösäteilyyn hakeutuvan asean hakupään on jotenkin kyettävä päättämään missä maali sijaitsee. Kuvaavassa matriisi-ilmaisimella tai pyyhkäisymekaniikalla varustetussa yksi-ilmaisinelementtihakupäissä maalin sijainti voidaan luonnollisesti päätellä suoraan kuvasta, mutta ensin mainittujen ongelmana on ollut niiden vaatimien monielementtimatriisien korkea hinta, ja jälkimmäisten ongelmana on pyyhkäisymekaniikka, joka on kallis, työläs huoltaa ja joka ei kestä aseiden suuria kiihtyvyyksiä. Tämän vuoksi hakupäissä käytetään yhä yksielementtisiä ilmaisimia ilman pyyhkäisyä, jolloin hakupää aistii vain pistemäisiä herätteitä. Maalin sijainti voidaan kuitenkin päätellä moduloimalla maalista saatavaa signaalia eri tavoin maalin sijainnin mukaan. Modulointi tehdään asettamalla hakupään eteen pyörivä kiekko (reticle). Tällöin maalista saatava signaali moduloituu eri lailla sen mukaan mikä on maalin ja ohjuksen pituusakselin välinen kulma. Kun maalin ja ohjuksen välinen kulma on suuri, signaali moduloituu voimakkaasti, minkä perusteella ohjuksen ohjauselektronikka kääntää ohjusta kohti maalia. Kun maali lopulta on täysin ohjuksen pituusakselin suunnassa, signaali ei moduloitu. Modulaation katoaminen kun maali on tähtäyslinjalla johtaa siihen, että ohjus pyrkii vaappumaan. Tämän vuoksi pyörivään modulointikiekkoon perustuvan hakupään (spin scan) sijasta uudemmissa ohjuksissa käytetään pyörivää optiikkaa ja paikallaan pysyvää levyä (con scan), jolloin hakupää saa moduloidun signaalin myös silloin kun maali on suoraan edessä.

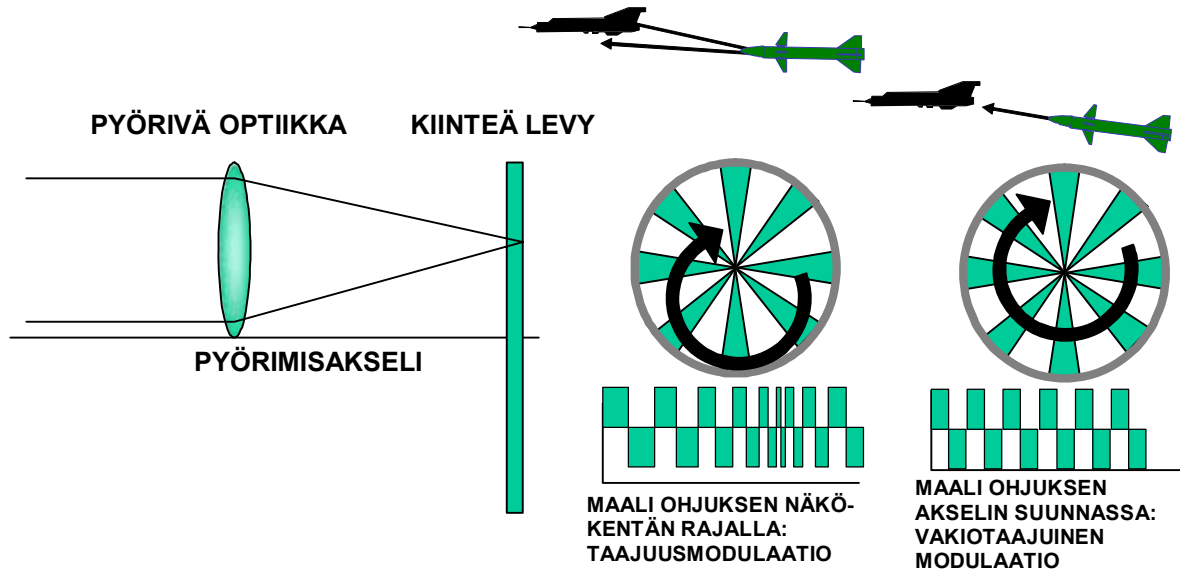


Kuva 235: Spin scan -ohjuksen toiminta perustuu yhteen ilmaiselementtiin, jonka edessä oleva pyörivä osin läpinäkyvä modulointikiekkomoduloi maalista saatavaa signaalia sen mukaan, kuinka kaukana maali on ohjuksen pituusakselista.

Häirintäjärjestelmä pyrkii harhauttamaan ohjusta lähettämällä oikean kaltaista moduloitua signaalia hakupään ilmaisimelle. Kun ilmaisin vastaanottaa moduloitua lähetettä, sen ohjaus-elektronikka luulee maalin olevan sivussa ohjuksen kulkusuunnasta, jolloin se kääntää ohjusta. Tämä johtaa spin scan -ohjuksissa lopulta ohjuksen kääntymiseen niin paljon sivuun, että maali katoaa ohjuksen näkökentästä ja ohjus menettää lukituksen maaliin (break lock). Lukituksen menettäminen edellyttää oikeataajuista ja -vaiheista moduloivaa signaalia, mikä puolestaan edellyttää joko ennakkotietoa kohteena olevasta hakupäästä tai sitten häirintälähtetimen on etsittävä oikeat häirintäsignaalien parametrit muuttamalla moduloivan signaalien taajuutta ja modulointiastetta. Häirintätehon saaminen perille ohjuksen hakupäähän ei ole ongelma, sillä ilmaisimen NEP on tyypillisesti mikro- tai nanowattiluokkaa, joten harhauttavan häirintäsignaalien lähteenä voidaan käyttää myös varsin vaatimattomia lämpösäteilylähteitä, kuten Xenon-lamppuja. Oikean modulointiasteen löytäminen on kuitenkin kriittistä. Oikea modulointiaste voidaan löytää tarkkailemalla häirinnän vaikutusta ohjukseen, tai valaisemalla ohjusta laserilla ja mittaamalla retikkelin aiheuttama modulaatioaste taajuus takaisin heijastuvasta säteilystä.

Harhauttavan häirintäjärjestelmän on hyvin vaikea rikkoa con scan -ohjuksen lukitusta. Kuvassa 236 vasemmalla maali on con scan -ohjuksen akselin suunnassa, jolloin maalista tuleva normaali heräte ei ole taajuusmoduloitua. Maalissa oleva häirintälähtetin lähettää kuitenkin nopean pulssijonon, jolloin häirintälähtetimen signaali summautuu hakupään ilmaisimelle maalin normaaliin herätteeseen. Häirintälähtetin lähettää vain puolen pyörähdysajan, jolloin hakupään signaali taajuusmoduloituu. Hakupää kuvittelee maalin olevan sillä puolella, jossa taajuus on pienempi ja komentaa ohjusta kääntymään saattaakseen maalin tähtäyslinjalle, eli kompensoidakseen taajuusmodulaation. Tällöin maali ja häirintälähtetin siirtyvät levyn ulkokehälle, jolloin niiden antama näennäinen taajuus laskee, mikä lopulta kompensoi häirintälähtetimen antaman signaalin. Tämän vuoksi con scan -ohjusten harhauttamista lukituksen menettämiseen saakka ei pidetä mahdollisena, vaan harhauttavalla häirinnäl-

lä pyritään saattamaan ohjus pyörivään tynnyriliikkeeseen, jolla pyritään maksimoimaan lopullinen räjähdysetaisyys maalissa. Häirintälähetin ei voi olettaa tietävänsä scan -ohjuksen levyn tai con scan -ohjuksen optiikan pyörimisnopeutta eikä levyn rakennetta, joten sen on kokeiltava automaattisesti erilaisia pulssi- ja pulssintoistotaajuuksia toivoen, että jokin niistä osuisi ohjuksen ominaistajuuksiin.

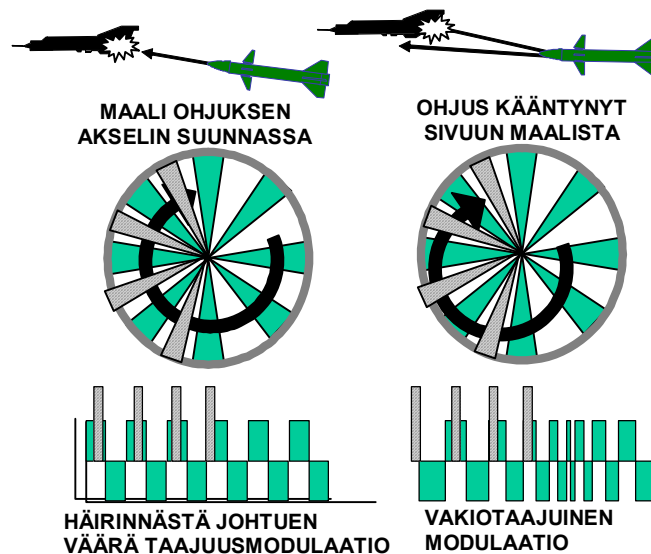


Kuva 236: Con scan-hakupään toiminta perustuu pyörivään optiikkaan, joka projisoi ilmaisimelle kohteesta taajuusmoduloidun signaalin, jonka FM-modulaatioaste riippuu kohteen ja ohjuksen pituusakselin välisestä kulmasta.

Con scan -ohjusten vaikean harhautettavuuden ja matriisi-ilmaisimiin perustuvien tuijottavien ohjusten yleistymisen vuoksi häirintäjärjestelmissä ollaan siirtymässä harhauttamisesta hakupäiden sokaisuun tai lamauttamiseen. Kumpikin niistä edellyttää harhauttamista suurempia tehotasoja, mikä puolestaan vaatii käytännössä laserlähettimen käyttöä häirintään. Sokaisulla tarkoitetaan hakupään vastaanottimen kyllästämistä niin suurella läheteellä, että sen antama signaali on maksimissaan riippumatta siitä mihin suuntaan hakupää osoittaa ja minkälaisen signaalin se maalista saa. Hakupäätä voidaan yrittää harhauttaa myös häiritsemällä sen automaattista vahvistuksensäätöpiiriä (AGC, Automatic Gain Control) vastaan. Tällöin häirintälähetin lähettää voimakkaan häirintäpulssein, joka saa AGC-piirin pienentämään vahvistusta, jottei hakupää yliohjaudu. Kun häirintäsignaali lakkaa, on hakupään vahvistus niin pieni, ettei se kykene havaitsemaan maalia. Tällöin AGC-piiri lisää vahvistusta saadakseen ilmaisimelle riittävän signaalin maalista. Kun vahvistus on taas riittävä, lähettää häirintälähetin uuden pulssin, joka taas tukkii ilmaisimen ja siten sokaisee hakupään.

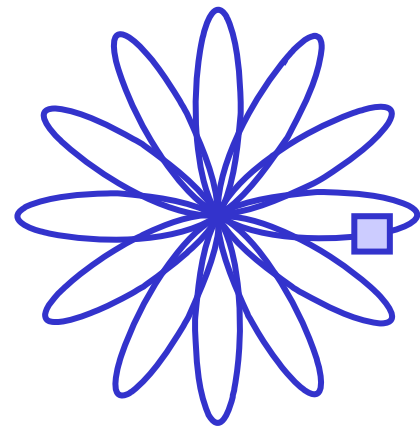
AGC-häirintä edellyttää huomattavasti maalin luontaista herätettä suurempien tehotasojen käyttämistä., muttei kuitenkaan niin suurta tehotasoa kuin jatkuvatoiminen sokaisu tai ilmaisimen vaurioittaminen. Olennaista on kuitenkin se, että häirinnän pulssinpituus ja pulssiväli vastaavat hakupään AGC-piirin säätösilmukan ominaistajuuksia. Tämä on kyettävä tiedustelemaan etukäteen, mitattava ja pääteltävä ohjuksen käyttäytymisestä häirinnän alaisena tai sitten häirintälähettimen on vaihdeltava näitä systemaattisesti toivoen ainakin jossakin vaiheessa osuvansa AGC-piirin säätösilmukan kaistalle ja siten vaikuttavansa ohjukseen. Mikäli häirintälähetin pyrkii käyttämään ennalta tiedusteltua kyseiseen hakupäähän optimoi-

tua lähetettä, on hyökkäävä ohjus myös tunnistettava. Tähän voidaan käyttää esimerkiksi tietoa hyökkäävästä lavetista tai ohjuksen parametrien mittausta laserilla.



Kuva 237: Con-scan -ohjuksen harhauttaminen pulssitetulla läheteellä.

Rosette-pyyhkäisymenettelyssä ilmaisimen näkökenttä pyyhkii kuvan 238 osoittaman kuvion mukaisesti maalin ympäristöä. Maali pyritään pitämään pyyhkäisykuvion keskellä. Menettelyn etuna on kyky havaita ja – mikäli hakupään ohjauselektronikka siihen kykenee – myös seurata samaan aikaan useita maaleja, olettaen että ne pysyvät maaliin lukittuneen hakupään näkökentässä. Kyky seurata useita maaleja samanaikaisesti mahdollistaa soihdun ja lentokoneen erottelun niiden liikeratojen perusteella.

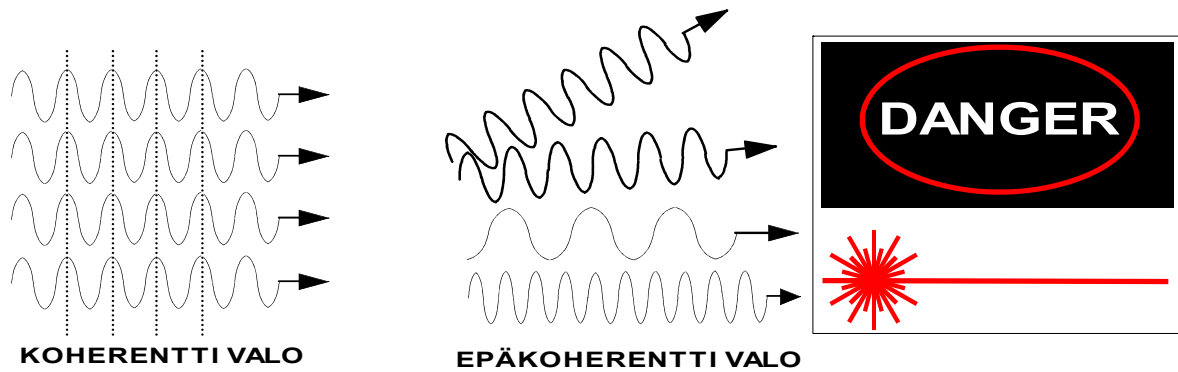


Kuva 238: Rosette-scan pyyhkäisykuvio. Neliö kuvaa ilmaisimen kerrallaan näkemää aluetta.

LASER

Laserteknologiaa hyödynnetään taistelukentällä tietoliikenne-, sensori-, ase-, omatunnistus- ja omasuojajärjestelmissä, eli lähestulkoon kaikissa digitaalisen taistelukentän komponenteissa. Laserteknologia käydään kuitenkin keskitetysti läpi tässä sensorijärjestelmäluvussa, ja muissa luvuissa keskitytään esittelemään lasereiden käyttömahdollisuuksia puuttumatta enää laserin tekniseen toimintaperiaatteeseen ja rakenteeseen.

Laser on laite, joka tuottaa monokromaattisen valonsäteen, jossa fotonit ovat samassa vaiheessa, eli valo on koherenttia. Sana laser tulee englanninkielisestä ilmaisusta Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Laserin käyttö suuritehoisen valopulssin lähteenä perustuu siihen, että laserista lähtevä valo on kollimoitua, eli samansuuntaista, minkä vuoksi pulssi pysyy koossa edetessään kohteeseensa eikä vaimene leviämisen vuoksi.

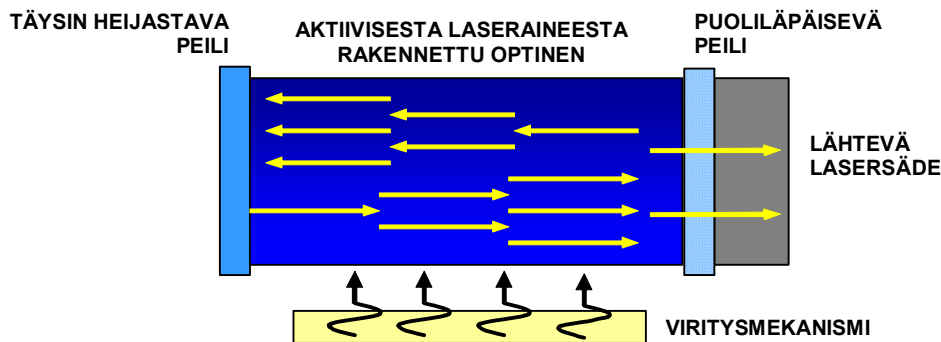


Kuva 239: Koherentissa valossa valo etenee samaan suuntaan samanvaiheisena ja kaikilla komponenteilla on sama taajuus.

Laserlähettimen rakenne

Laserlähetin koostuu neljästä peruskomponentista:

1. Aktiivinen lasermateriaali, jossa laserilmiö tapahtuu.
2. Viritysmekanismi, joka pumppaa aktiiviseen lasermateriaaliin lisää energiaa ja virittää sen atomeita ylempiin energiatiloihin. Energian pumppaus voi perustua optiseen, sähköiseen tai kemialliseen menetelmään.
3. Lasermateriaalin toisessa päässä on täysin heijastava peili, joka heijastaa kaikki materiaalista tulevat fotonit takaisin.
4. Laseraineen toisessa päässä on puoliläpäisevä peili, joka heijastaa suurimman osan energiasta takaisin lasermateriaaliin, mutta päästää pienen osan ulos.



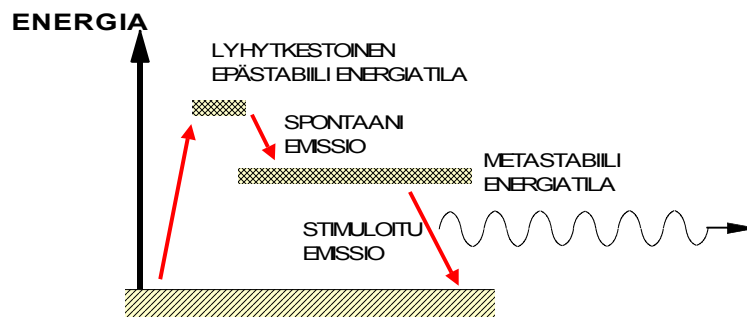
Kuva 240: Laserlähettimen yksinkertaistettu rakenneperiaate.

Laserperiaate

Viritysmekanismiin avulla pumpataan laseraineen atomeja korkeampaan energiatilaan. Ylempään energiatilaan viritetty atomi palaa satunnaisen ajan kuluttua takaisin perustilaansa ja lähettää samalla näiden energiatilojen välistä energiaerotusta vastaavan fotonin, jonka taajuus on:

$$\Delta E = h \cdot f, \text{ joten } f = \frac{E_2 - E_1}{h}$$

Satunnaisten energiatilojen purkautumisten synnyttämä valo on epäkohrenttia, sillä prosessin satunnaisuuden vuoksi fotoneilla on satunnainen vaihe. Laserlähettimessä käytettävissä materiaaleissa atomit nostetaan aluksi epästabiiliin energiatilaan, josta ne purkautuvat varsin nopeasti itsestään alempaan metastabiiliin (suhteellisen pitkäkestoiseen) energiatilaan. Tämän tilan pitkäkestoisuus mahdollistaa riittävän usean atomin virittämisen ennen kuin jokin niistä palaa takaisin perustilaansa. Kun jokin atomeista palaa perustilaansa, se lähettää fotonin. Tämä fotonin puolestaan kulkee lasermateriaalissa ja stimuloi myös läheltä kulkiessaan naapuriatomeita palaamaan perustilaansa. Näin fotonien määrä kasvaa itsestään. Ja koska atomit lähettävät fotonin silloin kun stimuloiva fotonin kulkee ohitse, on niiden vaihe sama. Prosessin hyötysuhde on varsin pieni, minkä vuoksi optisen resonattorin päissä on peili, joka heijastaa fotonit takaisin. Näin taataan riittävä stimuloiva fotonivirta lasermateriaalissa. Osa fotoneista pääsee puoliläpäisevän peilin kautta ulos lasersäteen muodossa. Mikäli puoliläpäisevä peili korvataan täysin heijastavalla peilillä ja kääntömekanismilla, saadaan pulssilaserlähde. Täysin heijastava peili lisää lasermateriaalissa kulkevien fotonien määrää ja kun peili käännetään sivuun, lähtee resonattorista voimakkaampi pulssiteho.



Kuva 241: Laserperiaate.

Mekaanisen peilin huonona puolena on sen hitaus, mikä pidentää pulssia ja laskee huipputehoa. Tämän vuoksi peilin tehtävään käytetään niin sanottua Q-kytkintä, jonka kytkentäperiaate perustuu siihen, että kytkin päästää pulssin läpi, kun sen energiatiheys on riittävä. Kun osa resonattorissa olevista fotoneista pääsee ulos, energiatiheys laskee ja Q-kytkin sulkeutuu. Q-kytkimellä voidaan saada aikaan hyvin lyhyitä 10 ns luokkaa olevia laserpulsseja, joita olisi mahdotonta toteuttaa mekaanisella periaatteella.

Lasertyytit

Kiinteäainelasert käyttävät kiinteätä tankoa, joka voi olla kristallia tai lasia, johon on lisätty absorboivia atomeja. Pumpausenergia saa aikaan energiatasojen populaatioinversion ja stimuloi laserilmion. Lasereiden ominaisuudet riippuvat sekä aktiivimateriaalista, että substraattimateriaalista. Aktiivimateriaaleina voidaan käyttää monia erilaisia aineita, kuten kromia, neodyymiä, kobolttia, titaania jne.. Substraattimateriaalina voidaan käyttää joko lasia tai keinokristallia, kuten (YAG, Yttrium-Aluminium Garnet). Neodyymi (Nd) on yleisin materiaali: kaksi yleisintä lasertyyppiä ovat Nd:YAG ja Nd:lasi. Neodyymilaserin aallonpituutta (1,06 μm) voidaan muuttaa merkittävästi epälinearisella optisilla parametrioskillaattoreilla (OPO, Optical Parametric Oscillator). Samoin Q-kytkintä voidaan käyttää pulssin keston muokkaamiseen. Jotkut kiinteäainelasert ovat viritettävissä laajalle aallonpituusalueelle. Esimerkiksi aleksandriittilaseria, jossa käytetään $\text{Cr}^{3+}:\text{BeAl}_2\text{O}_4$, on viritettävissä aallonpituuksille 0,7 – 0,82 μm ja titaani-safiirilaserilla – jonka kaista on laajin – alue on 0,66 – 1,18 μm .

Kiinteäainelasereiden rakenne mahdollistaa hyvän suorituskyvyn ja huollettavuuden. Kiinteiden aineiden ja pumppauslasereiden massatuotettavuus puolestaan laskee valmistuskustannuksia. Esimerkiksi neodyymilaserin tavoiteltu suorituskyky on 300 W keskimääräinen teho, noin 10 prosentin hyötysuhde ja yli 10^9 pulssin elinikä. Eri aallonpituuskonversiotekniikat mahdollistavat myös neodyymilaserille useita valittavia aallonpituuksia näkyvän valon alueelta keski-infrapuna-alueelle saakka yli 100 W teholla. Tämä keskimääräinen teho ylittää useimmissa taktisissa ja avaruussovelluksissa tarvittavan tehotason.

Puolijohdelaserit (diodilaserit) ovat pieniä tehokkaita laserlaitteita, joiden koko on tyypillisesti alle millimetrin. Puolijohdelasereita voidaan käyttää sekä jatkuvatoimisina että pulssitetuina. Ne toimivat laseraineesta riippuen tyypillisesti 0,1 – 1,55 μm aallonpituuksilla. Diodilaser rakentuu useista erilaisista seostetuista ja seostamattomista puolijohdemateriaalikerroksista. Eristekerrokset on yleensä tehty oksidoimalla ja johteet metalloimalla. Rakenteen keskellä on yksi aktiivinen kerros, joka vastaa laservahvistuksesta. Useimmiten käytetyt materiaalit ovat gallium-arseeni / alumiini-gallium-arseeni (GaAs/AlGaAs) tai indium-gallium-arseni-fosfidi / indium fosfidi (InGaAsP/InP). Nämä ovat III – V –ryhmän puolijohdeseoksia.

Kaasulaserit käyttävät joko puhtaita tai seostettuja kaasuja, joiden atomeja viritetään lasersäteen aikaansaamiseksi. Niissä kaasun läpi kulkevan sähkövirran aiheuttama elektronien törmäys pumppaa energiaa kaasun atomeihin ja virittää ne ylempiin energiatiloihin. Joissakin kaasulasereissa käytetään optista pumppausta joko salamalampulla tai toisella laserilla, joissakin taas pumppaukseen käytetään kemiallisia reaktioita. Lasertoimintaan voidaan käyttää useita eri kaasuja ja kaasuseoksia, joiden energiatasot mahdollistava populaatioinversion synnyttämisen.

Lasertyyppi ja -materiaali		aallonpituus	Lasertyyppi ja -materiaali	
		aallonpituus		
Excimer-kaasulaserit				
Kaasulaserit				
	Argon-fluoridi	193 nm	UV	UV
	Krypton-kloridi	222 nm	UV	UV
kadmium		325 nm	UV	UV
	Krypton-fluoridi		248 nm	UV
	Xenon-kloridi	308 nm	UV	441 nm
			488 nm	violetti
	Xenon-fluoridi	351 nm	UV	sininen
			514 nm	vihreä
			476 nm	sininen
Metallihöyrylaserit				
		528 nm	vihreä	
Kupari		510 nm	vihreä	
		568 nm	keltainen	
			570 nm	keltainen
		647 nm	punainen	
Kulta		627 nm	punainen	Xenon
useita	valkoinen			
	neon	543 nm	vihreä	Helium-

Taulukko 16: Eri lasereiden aallonpituuksia.

Kemialliset laserit ovat samanlaisia kuin hiilidioksidilaser siinä mielessä, että nekin käyttävät palamisprosessia. Pumpausenergia synnytetään kemiallisella reaktiolla. Kaksi tunnetuinta kemiallista laseria ovat vetyfluoridi (HF) ja deuteriumfluoridi (DF). HF-laser emittoi aallonpituusalueella 2,6 – 3,3 μm , jolla ilmakehän vaimennus on merkittävä. DF-laser emittoi aallonpituuksilla 3,5 – 4,2 μm , joilla ilmakehän vaimennus on pieni. Muut mielenkiintoiset kemialliset laserit ovat hiilimonoksidilaser (CO) ja iodiini:happi-laser ($\text{I}_2:\text{O}_2$).

Väriainelaserit käyttävät nestemäistä lasermediaa, joka koostuu liuottimeen liotetuista voimakkaasti absorboivista ja emittoivista orgaanisista väriaineista. Väriaineita on olemassa yli 200 erilaista, ja mikäli ne organisoidaan sarjaan, saadaan aikaan viritettävä laser, jonka toiminta-aallonpituutta voidaan säätää välillä 0,32 – 1,2 μm . On olemassa kolmen tyyppisiä väriainelasereita: pulssitettuja, jatkuvatoimisia (CW, Continuous-wave) sekä muotolukittuja. Muotolukittua (mode-locked) laseria pumpataan toisella laserilla. Siinä käytetään useita peilijärjestelmiä erittäin lyhyen pulssin synnyttämiseksi. Väriainelasereiden merkittävin etu on se, että niillä kyetään kattamaan koko näkyvä spektri.

Teknologisen kehityksen tavoitteet ovat lasereiden miniatyrisointi, stabiilimmat kompaktit rakenteet, suorituskyvyn nostaminen, säteen parempi laatu, uusien aallonpituuksien toteuttaminen sekä parempi käsiteltävyys.

Lasersäteen ominaisuudet

Jatkuvatehoisen (CW; Continuous Wave) laserin ominaisuuksia kuvataan kokonaisteholla P ja irradianssilla E , joka määritellään lasersäteen tehoksi pinta-alayksikköä kohti:

$$E = P / A \text{ [W/cm}^2\text{]}$$

Pulssilasereissa määritellään pulssin energia ($E=P \cdot T$) sekä pulssin energia pinta-alayksikköä kohti (radiant exposure):

$$H = E / A \text{ [J/cm}^2\text{]}.$$

Laserlähettimen aallonpituusalue ulottuu nykyisin kolmesta nanometristä 3 millimetriin, vaikka ääripäiden osalta kyse on vielä laboratorioasteella olevista koejärjestelmistä. Nykyisessä sodankäynnissä yleisimmin käytetyt laserit ovat lähi-infrapuna-alueella toimiva Neodyymi-YAG-laser (Nd-YAG), jonka aallonpituus on 1,064 μm ja paremman läpäisyn omaavalla kauko-infrapuna-alueella toimiva hiilidioksidilaser (CO_2). Sokaisukäyttöön käytetään taajuuskerrottua Nd-YAG-laseria. Taajuuskerroin puolittaa aallonpituuden 532 nm:iin noin 10 % hyötysuhteella, joten 90 % säteilytehosta menetetään. Toisaalta silmä on paljon herkempi sokaisulle tällä aallonpituusalueella.

Hiilidioksidilaserista lähtevän säteilyn aallonpituus on 9-11 μm ja säteilyn intensiteettihiippu on 10,6 μm :ssa. Nämä aallonpituudet ovat lämpökameroissa käytettävän 8-12 μm alueen sisäpuolella, minkä vuoksi CO_2 -laser ja lämpökamera voivat hyödyntää yhteistä optiikkaa. Tämän vuoksi CO_2 -laseria käytetään esimerkiksi komento-ohjatuissa ohjuksissa, joissa ohjusta seurataan lämpötähtäimen läpi. Suuren aallonpituutensa vuoksi CO_2 -laser on periaatteessa turvallinen ihmissilmälle. Suuritehoisen CO_2 -laserin pulssi voi kuitenkin aiheuttaa vaurioita silmän sarveiskalvolle.

Laserlähettimet jaetaan turvallisuutensa perusteella viiteen eri luokkaan:

- luokka 1: Ei aiheuta vaaraa missään olosuhteissa.
- luokka 2: Vahingollisia, jos säteeseen katsotaan tietoisesti pitkän aikaa.
Luokan 2 laserit toimivat näkyvän valon aallonpituudella.
- luokka 3A: Vahingollisia vain jos sädetä katsotaan vahvistavalla optisella välineellä, kuten kiikarilla.
- luokka 3B: Vaarallisia katsottaessa pelkällä silmällä laserlähdettä tai heijastusta peilistä
- luokka 4: Vahingollinen silmälle jopa hajaheijastuksista ja saattaa vaurioittaa ihoa säteen osuessa siihen suoraan tai heijastuksen kautta.

Etäisyysmittareiden ja maalinvalaisulasereiden lähettimet kuuluvat yleensä luokkiin 3B-4. Tietoliikennekäyttöön valokuitujen lähettimiksi tarkoitetut laserit ovat yleensä luokkaa 1.

Lasersäteen eteneminen

Hyvästä kollimaatiosta huolimatta myös lasersäde leviää jonkin verran. Mikäli laserlähteen halkaisija on d , leviää säde kaukokentässä kulmassa:

$$\theta = \frac{\lambda}{\pi d}, \text{ missä } \theta \text{ on radiaaneissa ja } \lambda \text{ on laserin aallonpituus metreinä}$$

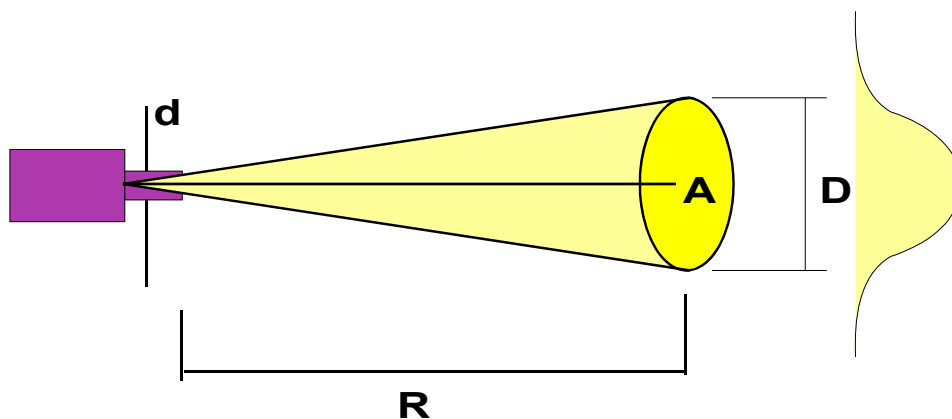
Mikäli laserlähettimen jälkeen säde kollimoidaan erillisellä linssirakennelmalla, tulee yhtälössä käyttää kollimointilinsin läpimittaa. Yleensä kuitenkin laserjärjestelmistä ilmoitetaan suoraan säteen divergenssi θ milliradiaaneina kaukokentässä. Lasersäteen läpimitta etäisyydellä R voidaan tällöin approksimoida kaavalla:

$$D = \theta \cdot R$$

Tämä kaava ei kuitenkaan ota huomioon diffraktiosta, ilman turbulenssista tai muista syistä johtuvaa säteen taipumista ja säteen pinta-alan kasvua. Jos säteen ala etäisyydellä R on $A(R)$, niin säteilytehoksi saadaan:

$$I(R) = \frac{P}{\pi \cdot A(R)^2} \cdot e^{-\sigma R}$$

jossa P on laserista lähtevä teho ja σ on ilmakehän vaimennus- ja sirontakerroin, jonka arvo riippuu aallonpituudesta ja joka vaihtelee ilmassa olevien partikkeleiden koon ja konsentraation, eli säätilan mukaan välillä 0,11 - 0,92.



Kuva 242: Lasersäteen leviäminen luonnollisen divergenssin vaikutuksesta ja säteen valaiseman alueen koko etäisyydellä R.

Laseretäisyysmittarit

Laseretäisyysmittari lähettää lyhyen noin 10 ns pituisen laserpulssein, josta osa heijastuu kohteestaan takaisin etäisyysmittarin laservastaanottimeen. Etäisyys maaliin saadaan joko taajuusmodulaatiolla CW-tutkan tapaan, tai pulssin kulkuajan perusteella. Jos pulssin modulointitaajuus on f_m ja moduloinnissa käytettävien maksimi- ja minimitaajuuksien ero on Δf , niin kulku-aika saadaan vastaanotetun taajuuden f_r perusteella kaavasta:

$$R = c \cdot \frac{f_r}{4\Delta f f_m}$$

Mikäli laserpulssein pituus on riittävän lyhyt kohteen etäisyyteen verrattuna, voidaan etäisyys laskea pulssin kulkuajan perusteella kaavasta:

$$R = \frac{c \cdot \Delta T}{2}$$

jossa ΔT on pulssin lähtöksestä heijastuksen vastaanottoon kulunut aika. Mikäli aikaero ΔT ilmaistaan mikrosekunneissa, saadaan etäisyys metreinä kaavasta:

$$R_m = 150 \cdot \Delta T \text{ } \mu\text{s}$$

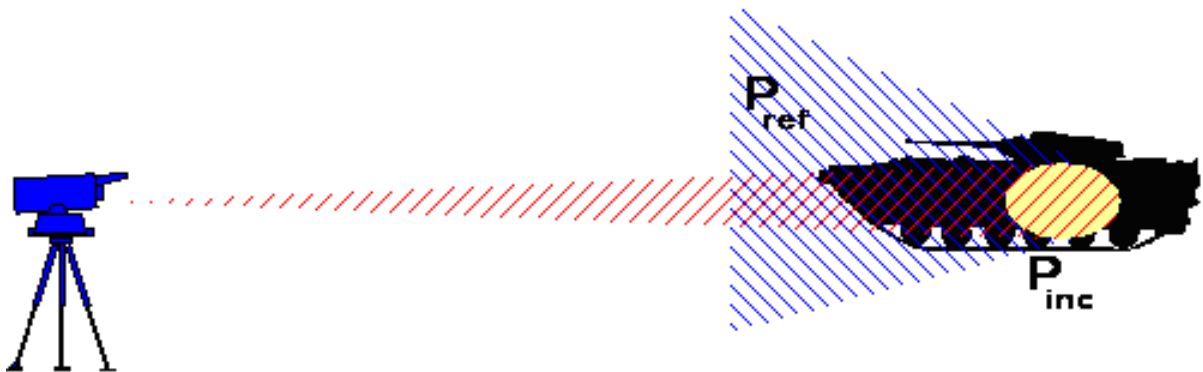
Jos lasersäteen valaiseman alueen koko ei ole maalia suurempi, voidaan maaliin osuvan säteilyn teho laskea kaavalla:

$$P_{inc}(R) := P_t \cdot t_o \cdot e^{-\sigma R}$$

jossa t_o on laserjärjestelmän optiikan läpäisy (transmittanssi). Esimerkiksi infrapuna-alueella optiikassa käytettävän germaniumin $t_o \sim 0,85$.

Maalista heijastuvan säteilyn suhdetta tulevaan säteilyyn kuvataan heijastuskertoimella ρ . Mikäli säteily oletetaan heijastuvan maalista tasaisesti puolipallon muotoiseen avaruuteen, on heijastuva teho avaruuskulmaa kohti:

$$P_{\text{ref}}(R) = \rho \cdot P_{\text{inc}}(R), \text{ eli } P_{\text{ref}}(R) = \rho \cdot P_t \cdot t_o \cdot e^{-\sigma R}$$



Kuva 243: Vastaanotettu teho on suurimmillaan, kun maali peittää kokonaan siihen osuvan lasersäteen.

Etäisyysmittarissa olevan laserilmaisimen sieppaama heijastunut teho riippuu ilmaisimen optiikan läpimitasta. Jos tätä läpimittaa merkitään D :llä, on ilmaisimen pinta-ala $A = \pi \cdot D^2$, jolloin ilmaisin näkyy heijastuspisteeseen avaruuskulmassa Ω :

$$\Omega(R) = \frac{A}{R^2}, \text{ eli } \Omega(R) = \pi \cdot \left(\frac{D}{R}\right)^2$$

Tällöin etäisyysmittarin vastaanottama teho saadaan kaavasta:

$$P_r(R) = P_{\text{ref}}(R) \cdot t_o \cdot e^{-\sigma R} \cdot \Omega(R), \text{ joka saadaan muotoon:}$$

$$P_r(R) = P_t \cdot \rho \cdot t_o^2 \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{R^2} \cdot e^{-2 \cdot \sigma R}$$

Pienin sallittu vastaanotettu teho saadaan kaavasta:

$$P_{\text{min}} = \text{SNR}_{\text{req}} \cdot \text{NEP}$$

jossa SNR_{req} on järjestelmän luotettavan toiminnan edellyttämä minimisignaali-kohinasuhde ja NEP on järjestelmän ekvivalentti kohinateho (Noise Equivalent Power), joka on yleensä luokkaa 10^{-10} .

Vastaanotetun tehon ja pienimmän sallitun teho avulla voidaan laskea laseretäisyysmittarin suurin toimintamatka:

$$\text{SNR}_{\text{req}} \cdot \text{NEP} = P_t \cdot \rho \cdot t_o^2 \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{R^2} \cdot e^{-2 \cdot \sigma R}$$

$$\text{tai: } R^2 \cdot e^{-2 \cdot \sigma \cdot R} = \frac{P_t \cdot \rho \cdot t_o^2 \cdot \pi \cdot D^2}{\text{SNR}_{\text{req}} \cdot \text{NEP}}$$

Toimintamatka voidaan myös ilmaista ilman ilmakehän vaimennusta:

$$R_o = \sqrt{\frac{P_t \cdot \rho \cdot \pi}{\text{SNR}_{\text{req}} \cdot \text{NEP}} \cdot t_o \cdot D}$$

ja ilmakehän vaimennus ottaa huomioon kaavalla:

$$R = R_o \cdot e^{-2 \cdot \sigma \cdot R}$$

Laseretäisyysmittarin pulssitehot vaihtelevat maasovellusten yhdestä megawatista ilmatorjuntajärjestelmien noin 5 MW tehoihin pulssintoistotaajuuden ollessa 10-30 Hz. Säteen divergenssi on parhaimmillaan noin 0.5 mrad ja etäisyysresoluutio ± 5 metriä.



Kuva 244: Puolustusvoimien käyttämä norjalainen SIMRAD-laseretäisyysmittari.
[SA-kuva]

Lasertutka

Laserlähetintä ja vastaanotinta voidaan käyttää tutkana samaan tapaan kuin radiotaajuisessa tutkassakin. Lasertutkalla (LIDAR) on kuitenkin etuna pienemmästä aallonpituudesta johtuva huomattavan suuri pituus- ja poikittaisresoluutio. Suuresta taajuudesta puolestaan on se haitta, että optinen säteily vaimenee enemmän ilmakehän epäpuhtauksissa kuin radiotaajuuksilla. Lisäksi laserjärjestelmien pohjakohinataso (fotonikohinatehoitiheys $N_o = h \cdot f$) on

huomattavasti korkeampi kuin pienikohinaisissa mikroaaltajärjestelmissä. Tämän vuoksi laseria ei yleensä käytetä valvontasensorina.

Lasertutkan kiinteästä kohteesta saama signaali voidaan laskea yhtälöstä:

$$P_r = \frac{P_t}{\Omega_t \cdot R^2} \cdot \rho \cdot A_t \cdot \frac{A_r}{\Omega_r \cdot R^2} \cdot t_o^2 \cdot t_a^2$$

missä ensimmäinen termi kuvaa kohteeseen osuvaa tehotiheyttä, toinen termi kohteen heijastamaa osuutta tulevasta tehosta ja kolmas termi vastaanottimelle tulevasta tehotiheydestä siepattua tehoa. Optiikan läpäisykerroin on t_o ja ilmakehän läpäisy:

$$t_a = e^{-\sigma R}, \text{ missä } \sigma \text{ on vaimennuskerroin.}$$

Lasertutkan yhtälö saadaan seuraavasti: Laserlähettimestä lähtevä teho P_t hajoaa avaruuskulmaan Ω_t (lasersäteen divergenssi), jolloin tehotiheys etäisyydellä R olevassa kohteessa on:

$$P_{inc} = \frac{P_t}{\Omega_t \cdot R^2} \cdot t_o \cdot t_a$$

Tästä säteilystä heijastuu osuus $\rho \cdot A_t$, joten heijastuva teho on:

$$P_{ref} = P_{inc} \cdot \rho \cdot A_t, \text{ missä } \rho \text{ on kohteen heijastuskerroin ja } A_r \text{ poikkipinta-ala.}$$

Jos lasertutkan optiikan sieppauspinta-ala on A_r ja säteily heijastuu kohteesta avaruuskulmaan Ω_r , niin järjestelmä kykenee vastaanottamaan tehotiheydestä $\frac{P_{ref}}{\Omega_r \cdot R^2}$ tehon:

$$P_r = \frac{P_{ref}}{\Omega_r \cdot R^2} \cdot A_r$$

Lasertutkan sieppauspinta-ala saadaan optiikan läpimitasta D_o kaavalla:

$$A_r = \pi \cdot \left(\frac{D_o}{2} \right)^2$$

Nykyisillä laseretäisyysmittareilla säteen divergenssi on 0,5-1 mrad luokkaa. Lasersäteen divergenssin alarajan asettaa lasersäteilyn aallonpituuden suhde laserlähteen aukon läpimitaan; $\Omega_t = \frac{2\lambda}{\pi \cdot D_o}$. Yleensä voidaan olettaa kuitenkin, että $\Omega_t = 0.5 \cdot 10^{-3}$ rad.

Yhdistämällä edellä mainitut kaavat ja olettamalla, että

1. Kohteeseen osuva säteily heijastuu tai siroaa tasaisesti avaruuskulmaan 2π .
2. Kohteen heijastuskerroin on minimissään 0,1 (riippuu kohteen muodosta, asennosta ja pintamateriaalista).

3. Kohde on suurempi kuin siihen osuva säde, joten parhaimmillaan kohteeseen tuleva teho on sama kuin laserista lähtenyt teho, vähennettynä optiikan ja ilmakehän vaimennuksella. Tällöin kohteen koolla ei ole vaikutusta heijastuvaan tehoon.
4. Optiikan transmittanssi pieni likaantumisen huomioon ottaen on noin 0,9.
... saadaan lasertutkan vastaanottamaksi tehoksi:

$$P_r = \frac{P_{\text{ref}}}{\Omega_r \cdot R^2} \cdot A_r = \frac{P_{\text{inc}} \cdot \rho \cdot A_t}{\Omega_r \cdot R^2} \cdot A_r = \frac{P_t \cdot \rho \cdot A_t \cdot A_r \cdot t_o^2 \cdot t_a^2}{\Omega_t \cdot \Omega_r \cdot R^4} = \frac{P_t \cdot \rho \cdot \pi \cdot D_o^2 \cdot A_t \cdot t_o^2 \cdot t_a^2}{4 \cdot \Omega_t \cdot \Omega_r \cdot R^4}$$

$$\approx \frac{20 \cdot P_t \cdot D_o^2 \cdot e^{-2 \cdot \sigma \cdot R}}{R^4}$$

Esimerkki:

Laserpulssin teho on 5 MW, pulssin kesto 40 ns ja aallonpituus 1,06 μm . Lasertutkan optiikan halkaisija 50 mm ja läpäisykerroin 0,9. Maalin koko 4 m^2 , heijastuskerroin 0,1 ja etäisyys 1 km.

Jos säteen divergenssi on 0,5 mrad, on säteen halkaisija 1 km etäisyydellä 50 cm, joten ainakin tietyissä kohdissa lasersäde pyyhkäisee koko tehollaan maalin yli.

Jos ilmakehän vaimennus jätetään huomioimatta, vastaanottotehoksi saadaan:

$$P_r = \frac{20 \cdot P_t \cdot D_o^2 \cdot e^{-2 \cdot \sigma \cdot R}}{R^4} = \frac{20 \cdot 5 \cdot 10^6 \cdot 0,05^2}{10^{3 \cdot 4}} = 2,5 \cdot 10^{-7} \text{ W}$$

Ilmakehän vaimennus (oletetaan, että $\sigma = 0,2$) huomioiden vastaanotettu teho on:

$$P_r = 2,5 \cdot 10^{-7} \cdot e^{-2 \cdot 0,2 \cdot 1} = 1,7 \cdot 10^{-7}$$

Lasertutkan etuna on erittäin hyvä etäisyys- ja kulmaresoluutio, minkä vuoksi sitä voidaan käyttää maalin (näkyvän sektorin) kolmiulotteisesti kuvaavana sensorina. Kolmiulotteista kuvaa voidaan käyttää maalin havaitsemiseen, tunnistamiseen ja yksilöimiseen. Lisäksi kuvan kolmiulotteisella tarkastelulla mahdollistetaan kasvillisuuden ja naamioverkon suojaan ryhmitetyn kohteen havaitseminen ja tunnistaminen. Kolmiulotteisesta kuvasta voidaan esimerkiksi suodattaa kohteen edessä ja takana olevat kappaleen pois. Lasertutkan yhdistäminen passiiviseen lämpökameraan antaa saman kyvyn myös lämpösensorille.

Laseria voidaan käyttää valvonta- ja tiedustelusensorin sekä etäisyydenmittauksen lisäksi myös meteorologisten parametrien mittaukseen. Näin saatua tietoa ilmakehän eri kerrosten liikkeistä voidaan käyttää kolmiulotteisen tuulikartan tekemiseen ja ballistisen analyysin tarkentamiseen, jolloin epäsuoran tulen tarkkuus maalissa kasvaa. Laserilla voidaan myös päätellä ilmakehän koostumusta kaukaa mitattavasta kohteesta. Tämän ominaisuuden hyödyntämistä biologisten aseiden käytön todentamiseen tutkitaan.

NÄKYVÄN VALON SENSORIT

Valovahvistimet

Valonvahvistin vahvistaa nimensä mukaisesti siihen tulevan fotonivirran moninkertaiseksi, jolloin ihmissilmä kykenee muodostamaan kuvan kohteista, joista tuleva valoteho on hyvinkin heikkoa. Valonvahvistimet toimivat yleensä näkyvän valon ja lähi-infrapun alueella, joten niiden toiminta perustuu luonnon normaaliin taustavalaistukseen. Yöaikaan valaistus vaihtelee noin 10^{-5} luksista pilvisellä säällä 10^{-1} luksiin pilvettömän täyden kuun aikaan. 10^{-4} luksin valaistuksen vahvistaminen päivän valoa vastaavaksi edellyttää noin 50 dB vahvistusta. Tähtien intensiteetti on huipussaan lähi-infrapuna-alueella. Koska lisäksi kasvillisuus heijastaa valoa paremmin yli 800 nm aallonpituuksilla, tarjoavat lähi-infrapuna-alueella toimivat valon vahvistimet paremman kontrastin ja näkyvyyden kuin näkyvän valon alueella toimivat.

Valonvahvistimen ominaisuuksien kannalta sen keskeiset osat ovat objektiivi ja vahvistinputki. Objektiivin tehtävänä on koota kohteesta tuleva valoteho ja projisoida se vahvistinputkeen, joka puolestaan vahvistaa heikon valovirran ja muodostaa kuvan fotokatodille, jossa se muutetaan näkyväksi tai sähköiseksi.



Kuva 245: Suomalainen rynnäkkökivääriin kiinnitettävä valovahvistin. [K Larres]

Valonvahvistimissa käytettävät vahvistinputket jaetaan käytettävien materiaalien ja toimintaperiaatteen perusteella kolmeen sukupolveen:

1. sukupolvi: passiiviset 1- tai useampiasteiset valonvahvistinputket
2. sukupolvi: passiiviset mikrokanavalevyvahvistinputket
3. sukupolvi: passiiviset mikrokanavalevyvahvistimet

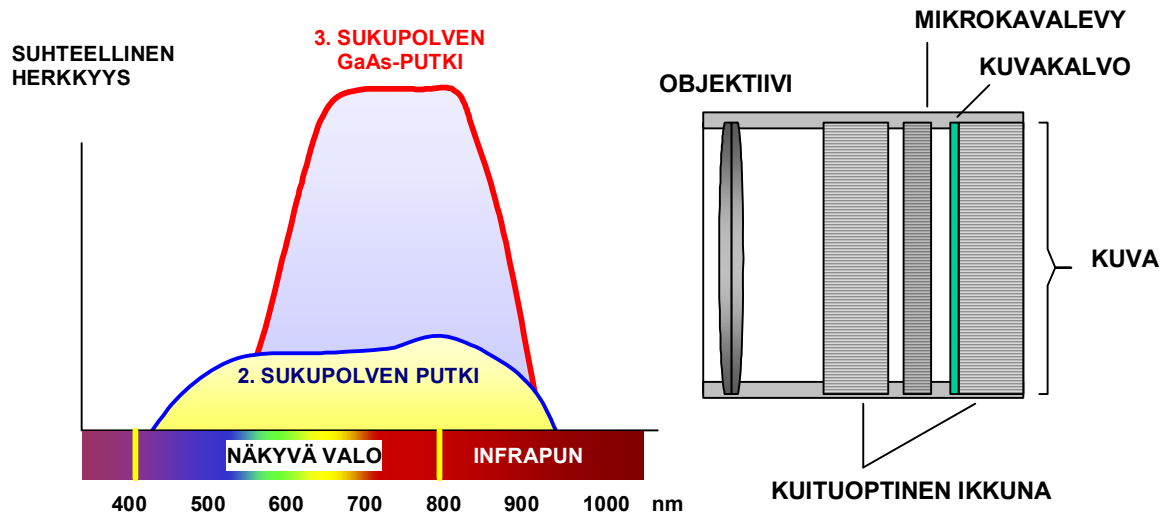
Nykyisin käytössä olevat järjestelmät perustuvat 2. ja 3. sukupolven teknologiaan. Niissä objektiivin muodostaa kuvan fotokatodille, josta irtoaa elektroneja valosähköisen ilmiön vuoksi. Fotokatodilta irronneet elektronit kiihdytetään voimakkaalla sähkökentällä anodin läheisyydessä olevaan mikrokanavalevyyn. Mikrokanavalevy koostuu miljoonista yhteen liimatuista 8-12 μm paksuisista lasilevyistä. Kun katodilta tuleva elektroni osuu putken seinämään, se irrottaa toisioelektroneja, jotka puolestaan ajautuvat sähkökentän voimasta kohti anodia ja törmätessään putken seinämään irrottavat lisää toisioelektroneja. Kolmannen sukupolven fotokatodi on noin kolme kertaa herkempi kuin toisen sukupolven katodi.

Valonvahvistin vahvistaa olemassa olevaa valoa, joten sen suhteellisen herkkyyden tulisi vastata mahdollisimman suurella määrällä luonnossa olevan valon spektriä. Kuvassa 247 on esitetty toisen ja kolmannen sukupolven valonvahvistinputkien suhteelliset herkkyydet. Kolmannen sukupolven valonvahvistimissa käytetään Indium-Gallium-Arseni (InGaAs) – ilmaisimia, jotka kykenevät näkemään lähi-infrapuna-alueelle, jossa yötaivaan valoteho on voimakkaimmillaan. Lisäksi lehtivihreän heijastuvuus on tällä alueella huomattavasti suurempi kuin alle 800 μm aallonpituuksilla. Siten kolmannen sukupolven laitteiden etuina ensimmäiseen ja toiseen sukupolveen verrattuna ovat paremman herkkyyden lisäksi suurempi käytettävissä oleva valoteho ja parempi kontrasti.

Valonvahvistimen optiikan tulisi olla sellainen, että katodille saataisiin mahdollisimman paljon valokvantteja, minkä vuoksi objektiivin läpimitan tulisi olla suuri polttoväliin nähden. Tästä olisi sekin hyöty, että optiikan näkökenttä olisi varsin laaja. Toisaalta pitkä polttoväli lisää kuvan suurennosta ja siten mahdollistaa paremman valonvahvistuksen. Optiikan suunnittelussa on siten löydettävä kompromissiratkaisu näkökentän, vahvistuksen ja optiikan läpimitan kesken. Tyypillisesti F-luku vaihtelee valonvahvistimissa välillä 1...1,5.

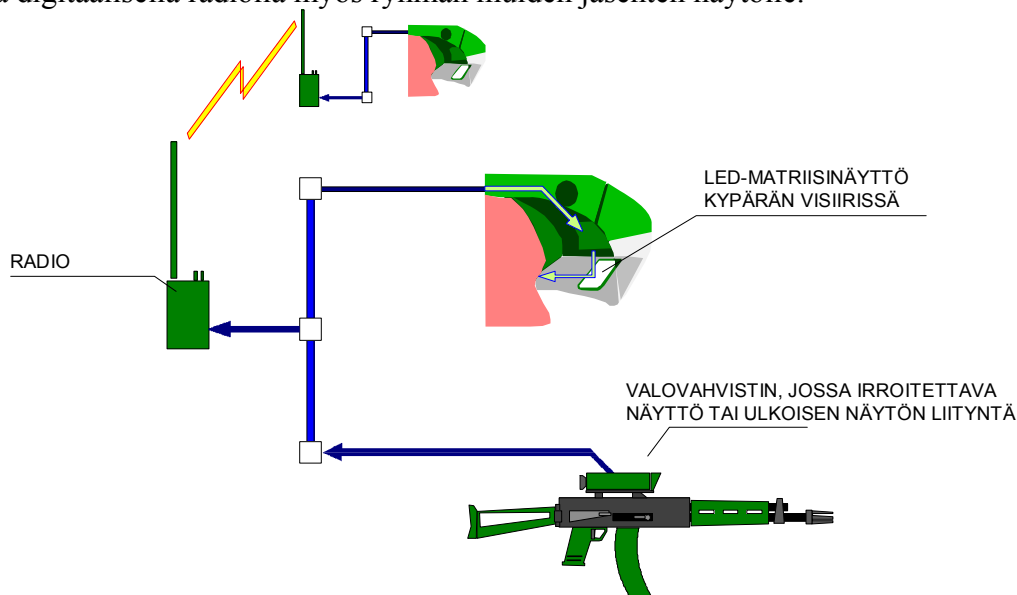


Kuva 246: Yksiputkinen kypärään kiinnitettävä valonvahvistin. [SA-kuva]



Kuva 247: Vasemmalla toisen ja kolmannen sukupolven valonvahvistinputkien suhteellinen herkkyys eri aallonpituuksilla sekä yötaivaan valaistustaso. Oikealla kolmannen sukupolven mikrokanavalevyyn perustuvan valonvahvistinputken periaatteellinen rakennekuva.

Valonvahvistinputkien hinnan laskun myötä myös yksittäiset taistelijat voidaan varustaa pimeätähtäimillä. Tähtäin voidaan kiinnittää kypärään tai aseeseen. Jälkimmäisessä tapauksessa kypärä voidaan varustaa halvalla LED-matriisinäytöllä, jolloin ase, tähtäimen ja näytön yhdistelmä mahdollistaa tulittamisen suojasta. Tähtäimen antama kuva voidaan välittää digitaalisella radiolla myös ryhmän muiden jäsenten näytölle.



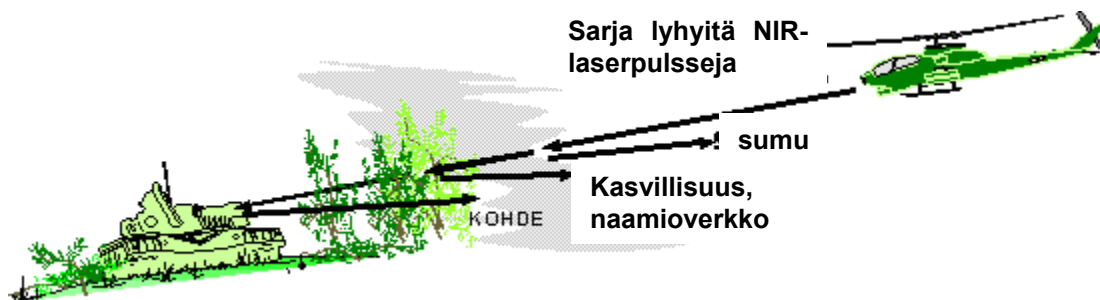
Kuva 248: Nykyiset pienikokoiset valonvahvistimet voidaan kiinnittää aseeseen päivätähtäimen päälle. Tarvittaessa kuva voidaan siirtää visiirissä olevalle LED-matriisinäytölle. Tekniikka mahdollistaa kuvan siirron myös radioteitse taistelijaparille.

Tarvittaessa kontrastia voidaan parantaa sekä optisella että lähi-infrapuna-alueella laservalaisella. Tällaisessa *gated viewing* -tyyppisessä järjestelmässä sensori lähettää lyhyen laserpulsin ja vastaanotin hylkää kaiken maalia ennen tai maalin jälkeen tulevan säteilyn, jolloin

maali erottuu taustastaan. Sensori voi myös muodostaa etäisyysresoluutionsa puitteissa kolmiulotteista kuvaa maalista ja siten tarkastella esimerkiksi naamioverkon tai kasvillisuuden takana olevia kohteita. Tällöin on käytettävä visuaalista tai NIR-alueella, joissa kohteen heijasteet dominoivat, joten menetelmä soveltuu hyvin valonvahvistinten tai matalavalotelevision kanssa käytettäväksi. Ongelmana tällaisessa aktiivisessa järjestelmässä on luonnollisesti sen paljastuvuus. Tätä voidaan vähentää hyödyntämällä lähi-infrapuna-alueella 1,4 ja 1,8 μm aallonpituuksilla olevia absorptiomaksimeja, joita käytettäessä signaali vaimenee niin voimakkaasti, ettei sitä ole mahdollista havaita pitkiltä etäisyyksiltä.

Toinen tapa parantaa kontrastia on käyttää polarisaatiodiskriminointia, jossa sensori vastaanottaa vain tiettyä polarisaatiota. Menetelmä perustuu luonnon aineiden ja ihmisen tekemien rakennelmien erilaisiin polarisaatio-ominaisuuksiin; vaikka tuleva säteily olisi polarisoitumatonta, on kohteesta heijastuva säteily lähes aina polarisoitunutta. Polarisoituminen riippuu kohteen ominaisuuksista, mutta yleensä luonnossa esiintyvien ja ihmisen aikaan saamien kohteiden polarisaatio-ominaisuudet eroavat toisistaan merkittävästi. Ilmiötä voidaan hyödyntää esimerkiksi maalin suojaus laukaistujen lämpösoihtujen erottamiseen maalista, tai lämpönaamiomaalatun ajoneuvon erottamiseen taustastaan. Tällöin kohteen ja taustan välillä ei tarvitsisi olla lämpökontrastia; vaikka kohteista tulevan säteilyn intensiteetti olisi sama, voidaan kohde erottaa polarisaation perusteella.

Teknisen kehityksen myötä halpenevat lämpökamerat eivät tule syrjäyttämään valonvahvistimia, sillä kummallekin on löydettävissä oma optimaalinen käyttötarkoituksensa. Vaikka lämpökameralla kyetäänkin havaitsemaan kohde täysin pimeässä ja näkemään vaikeissa etenemisolosuhteissa, on näkyvän valon ja lähi-infrapunan alueella toimivalla valonvahvistimella ainakin toistaiseksi merkittävästi halvemman hinnan lisäksi muitakin etuja: NIR-alueella kyetään havaitsemaan kohteen varjot (mistä on hyötyä esimerkiksi ajolinjojen määrittämisessä), sekä NIR-alueella toimivat maalinvalaisulaserit. Lisäksi tällaista sensoria voidaan tehostaa edellä kuvatulla gated viewing -periaatteella.



Kuva 249: Gated viewing -periaatteessa passiiviseen sensoriin liitetään aktiivisia pulsseja lähettävä laser, jonka avulla passiivinen sensori kykenee erottamaan etäisyyksiä ja siten muodostamaan kolmiulotteista kuvaa. Tällöin se kykenee diskriminoimaan esimerkiksi sumupilvestä tulevat heijasteet ja muut kohteen edessä olevat esineet, kuten puuston.

Niukan valon televisio

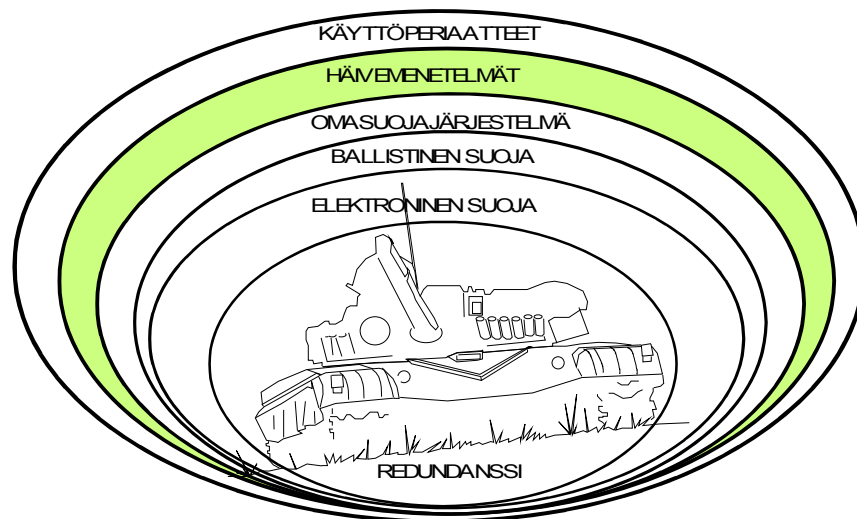
Niukan valon televisio (LLTV, Low Light TeleVision) on hämäräkäyttöön optimoitu televisiovastaanotin, joka on toteutettu joko tavallisen televisioputken eteen asennetulla valonvahvistimella tai sitten erityisellä hämärätoimintaan tarkoitettulla kuvaputkella. Tällaisen kuvaputken aallonpituusalue kattaa näkyvän valon ja lähi-infrapunasäteilyn. Näkyvän valon alueella voidaan hyödyntää piipohjaista CCD-kennoa. Piin energiavyörakenne on sellainen,

että näkyvän valon ja lähi-infrapuna-alueen (1.1 μm asti) fotonit pystyvät vapauttamaan siinä elektroneja. CCD-kennossa piitä käytetään sekä mikropiirin substraattina ja ilmaisinelementtinä että ilmaisimateriaalina. Lisäksi CCD-ilmaisimien rakenteeltaan hyvin yksinkertainen. Ilmaisimissa fotonien vapauttamat elektronit varastoidaan lyhyeksi ajaksi kunkin ilmaisinpinnan alle, ja varaus puretaan ilmaisimesta rivi kerrallaan siirtämällä elektronit sarjamuotoisesti elementistä toiseen ja lopulta matriisista ulos detektoripiirille, jonka jälkeen kuva muutetaan taas sarjamuotoisesta rinnakkaismuotoiseksi. Ilmaisimen toiminta perustuu kytkettyyn varausten siirtoon (CCD, Charge-Coupled Device).

Hämärään optimoidun LLTV:n päiväominaisuudet ovat tavallista televisioputkea huomattavasti. LLTV:tä käytetään tiedustelu- ja rynnäkkökoneissa sekä erilaisissa maahan sijoitetuissa valvontajärjestelmissä. CCD-kennoja käytetään LLTV:n lisäksi myös esimerkiksi ohjusten hakupaissa.

HÄIVEMENETELMÄT JA MAASTOUTTAMINEN

Häivemenetelmä on osa ase-, viesti-, johtamis-, tiedustelu- yms. järjestelmän kokonaissuojasta, johon kuuluu sen lisäksi omasuojalaitteisto ja ballistinen sekä elektroninen suojaus, osajärjestelmien redundanssi sekä oikeat taktiset ja taistelutekniset käyttöperiaatteet. Häivemenetelmät kattavat kaikki ne menetelmät, joilla kohde pyritään tekemään vaikeasti havaittavaksi, tunnistettavaksi, yksilöitäväksi ja paikannettavaksi. Puolustusvoimien määritelmän mukaisesti **Häivetekniikka** (Stealth) on kohteen herätteen hallintaa emission ja heijastusten hallinnan keinoin pyrkimyksenä sovittaa kohteesta heijastuva ja kohteen itsensä emittoima heräte kohteen taustan herätteeseen koko spektrin alueella. Häivetekniikka käsittää kaikki ne tekniset menetelmät, joilla kohteen herätettä pyritään hallitsemaan kohteen havaitsemisen, luokittelun, tunnistamisen ja paikantamisen viivästämiseksi tai estämiseksi. Häivetekniikka on osa kohteen suojakokonaisuutta.



Kuva 250: Häivemenetelmät muodostavat yhden osan järjestelmän suojasta. Ne ovat tehokkaita vain mikäli niitä käytetään yhdessä muiden menetelmien kanssa.

Havaitsemisen estämiseen ja paikantamisen vaikeuttamiseen tarkoitettujen häivemenetelmien tarkoituksena on pienentää kohteen kontrastia taustaansa vasten. Tutka-alueella tämä tarkoittaa kohteesta heijastuvan ja siroavan tutkasäteilyn määrän minimoimista, infrapuna-alueella

kohteen itsensä säteilemän lämpösäteilyn minimoimista ja lähi-infrapuna-alueella sekä näkyvän valon alueella kohteen heijastusominaisuuksien sovittamista kohteen taustaan. Kontrastin lisäksi kohteen saattaa paljastaa taustassa oleva säännöllinen tai epäsäännöllinen kuvio, jonka kohde rikkoo. Esimerkiksi säännöllinen kohde erottuu kasvullisuudesta, vaikka sen kontrasti taustan kanssa olisi lähes sama. Lisäksi sellaiset muodot, joita taustassa ei esiinny, paljastavat kohteen. Tällaisia ovat esimerkiksi pitkät vaakasuorat ääriviivat, terävät kulmat tai täydellisen pyöreät reunat, joita ei luonnossa juurikaan esiinny. Naamioverkon tavoitteena on rikkoa kohteen säännölliset muodot sekä sulauttaa kohteen pintakuvio taustansa. Vaikka kohde saataisiin maastoutettua taustansa vasten, se paljastuu yleensä viimeistään silloin kun se lähtee liikkeelle, ellei kohteen pinnan kuviointia muutetaan liikerataa vastaavasti.

Tunnistamisen ja yksilöimisen estämiseen tarkoitetuilla häivemenetelmillä pyritään saamaan kohde näyttämään joltakin toiselta tai samanlaiselta kuin kaikki muutkin taistelukentällä olevat kohteet. Siten vihollinen ei kykenisi erottelemaan tärkeitä maaleja (kuten viesti- ja johtamisajoneuvot) vähemmän tärkeistä (tavalliset jalkaväen vaunut) ja optimoimaan vastatoimenpiteitään. Lisäksi vihollisen on vaikeampi muodostaa käsitystä joukkojen painopisteestä sekä arvioida yhtymän tulevaa toimintaa, jos se ei kykene erottelemaan eri ajoneuvoja tms. kohteita toisistaan. Esimerkkinä tunnistamisen ja yksilöimisen vaikeuttamisesta on johtamisajoneuvojen antennien naamiointi tai kaikkien ajoneuvojen varustaminen samantyyppisillä valeantenneilla.

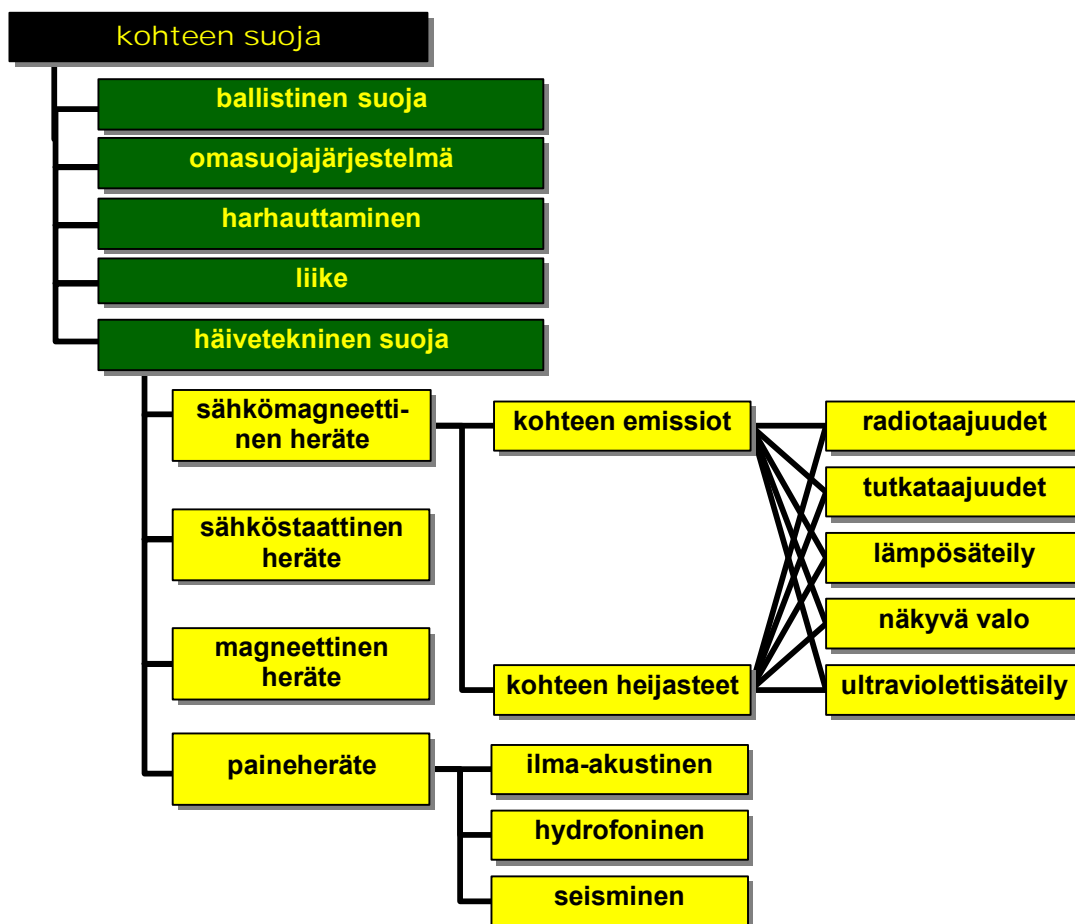


Kuva 251: Kohteen suojaaminen ja maastouttaminen on aina suunniteltava kokonaisuutena, jossa huomioidaan kohteen ominaisuuksien lisäksi myös taustan ominaisuudet sekä kohteen toiminta. [SA-kuva]

Kohteen suoja on kokonaisuus, jolla pyritään suojaamaan kohde vihollisen tiedustelulta, paikantamiselta ja asevaikutukselta. Kohteen suojaan kuuluu häiveominaisuudet (emissioiden hallinnan ja häiveteknologian sekä maastouttamisjärjestelmien käyttö, joilla estetään paljastuminen), liike (estetään vaikuttaminen paljastuneeseen kohteeseen), harhauttaminen (vaikeutetaan maalinvalintaa), omasuojajärjestelmä (estetään asevaikutus valittuun maaliin), ballistinen ja NBC-suoja (estetään läpäisy) sekä tuhovaikutuksen minimointi (esimerkiksi osastointi, palontorjunta ja puhdistusjärjestelmät).

Tutkataajuudet

Tutka-alueen häivetekniikan lentokonesovellukset ovat saaneet paljon huomiota, mutta tulevaisuudessa tutkaa tullaan käyttämään yhä enemmän myös taistelukentällä ilmasta ja maasta suoritettavaan valvontaan, taisteluhelikoptereiden joka sään sensorina ja ohjusten ja pommien hakupäissä sekä herätesytyttimissä. Siten tutka-alueen häivetekniikka muodostaa yhden olennaisen osa häivekokonaisuutta myös maavoimien järjestelmissä.



Kuva 252: Häivetekniikka muodostaa keskeisen osan kohteen suojaan, mutta toimiva suoja edellyttää myös ballistisen suojauksen huomioimista sekä harhamaalien ja harhauttavien toimenpiteiden käyttämistä yhdistettynä riittävän usein tapahtuvaan liikkeeseen. Arvokkaimmat kohteet tulee lisäksi varustaa omasuojajärjestelmin.

Tutkataajuuksilla voidaan käyttää häivemenetelminä tutkasäteilyn absorboimista ja heijastuksen ja sironnan suunnan hallintaa. Edellisessä sähkömagneettinen säteily pyritään vaimentamaan ennen sen heijastumista ja heijastumisen jälkeen kohteen pinnassa olevilla absorptio-

materiaaleilla. Jälkimmäisessä pyritään minimoimaan kohteen tutkapinta-ala merkittävimpiin uhkasuuntiin. Taistelukentän järjestelmissä etu- ja yläviistosektorit muodostavat useimmiten pahimmat uhkasuunnat.

Tällä hetkellä – siis 10-20 vuotta sitten suunniteltujen - häivelentokoneiden tutkapoikkipinta-ala on $-30..-40 \text{ dB/m}^2$ luokkaa, eli samaa suuruusluokkaa kuin pienikokoisen linnun tai suuri-kokoisen hyönteisen tutkapoikkipinta-ala. Joidenkin arvioiden mukaan nykyisin suunniteltavat ultrapienen herätteen omaavien ilma-alusten – ilmeisesti lähinnä miehittämättömien sellaista – tutkapoikkipinta-alaksi tavoitellaan tasoa $-60..-70 \text{ dB/m}^2$, joka olisi hytтын kokoluokkaa!

Tutkapoikkipinnan minimoimisella saavutetaan jokin tai parhaassa tapauksessa jopa kaikki seuraavista johdannaisvaikutuksista:

- Havainto-, tunnistus- ja yksilöintietäisyydet lyhentyvät.
- Vihollinen pakotetaan käyttämään suurempaa lähetystehoä, jolloin sen tutka paljastuu omille ESM-sensoreille ja tutkavaroitimille.
- Viholliselle syntyy väärä kuva maalin koosta ja tyypistä.
- Kohteen peittämiseen – esimerkiksi omasuojajärjestelmissä - tarvittava häirintäteho ja tarvittavan tutkasilpun määrä pienenee.
- Voidaan rakentaa pienempiä ja yksinkertaisempia vaimaaleja.

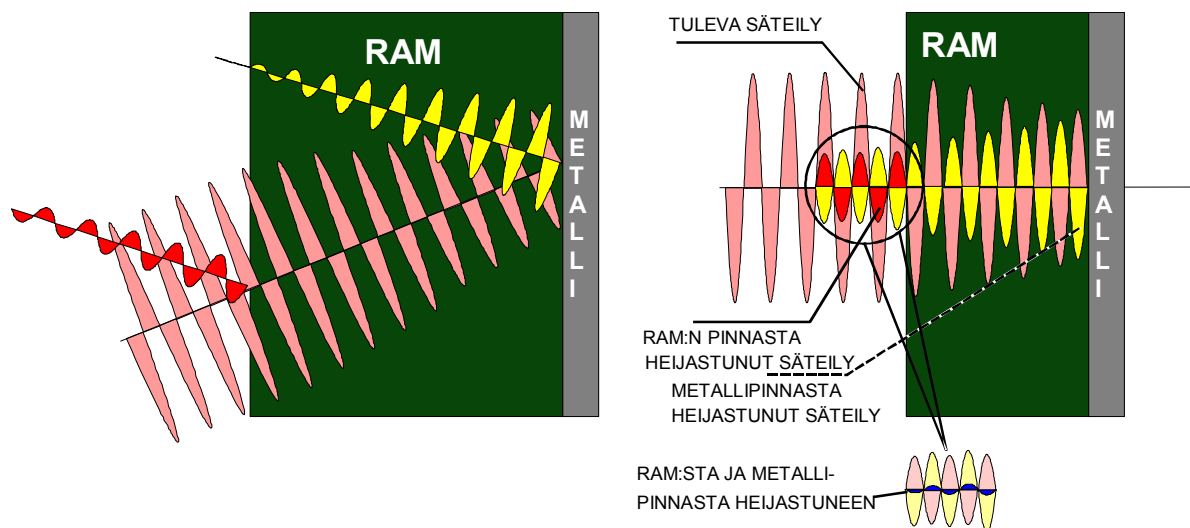


Kuva 253: Ilmaherruushävittäjä F-22 Raptorissa on hyödynnetty häiveteknologista muotoilua. [Lockheed Martin]

Tutkasäteilyä absorboivat materiaalit (RAM, Radar Absorbent Material) pyrkivät estämään tutkasäteilyn heijastumisen RAM-materiaalin pinnasta ja vaimentamaan sekä ulkoa tulevaa että kohteen varsinaisesta (metalli) pinnasta heijastuvaa säteilyä. Optimitilanteessa tutkasäteilyä absorboiva materiaali on osa kohteen rakennetta – esim. hiilikuiturunkoa. Metallirakenteet voidaan pinnoittaa erillisellä absorboivalla pinnoitteella tai tutkasäteilyä vaimentavalla maalilla. Siinä missä esimerkiksi F-117 on lähes kokonaan pinnoitettu RAM:lla. F-22:ssa sitä käytetään vain ilmanottoaukoissa, siipien ja siivekkeiden johto- ja jättöreunoissa yms. kohteissa, jotka saattavat aiheuttaa heijastuspiikin kohti tutkaa.

RAM:n vaimennusominaisuuksia rajoittaa se, että ulkopinnan impedanssin on oltava lähellä tulevan säteilyn impedanssia (120π , eli noin 377Ω), jotta aalto heijastuu mahdollisimman vähän RAM:n pinnasta. Tämän jälkeen vaimennusta voidaan vähitellen lisätä, jotta säteilyä saadaan heikennettyä riittävästi. Materiaali on usein optimoitu tietylle taajuudelle, jolla RAM:n pinnasta heijastuva ja kohteen metallipinnasta heijastuva säteily ovat vastakkaisvaiheisia, jolloin ne kumoavat toisensa. Tällaisesta materiaalista käytetään nimitystä resonoiva. Kuvassa 254 vasemmalla on esitetty pelkästään materiaalin absorptioon perustuva RAM-rakenne ja oikealla myös interferenssiä hyväksikäyttävä rakenne. Jos tutkasäteily kulkee RAM-materiaalissa neljänneosaallonpituuden verran RAM:n pinnasta kohteeseen ja saman verran takaisin päin, vastaa yhteensä kuljettu matka puoli aallonpituutta. Tällöin kohteesta heijastuneella säteilyllä on vastakkainen vaihe tulevaan säteilyyn nähden ja nämä säteilyt kumoavat toisensa.

Resonoivan RAM:n ongelma on se, että materiaali vaimentaa paljon vain niillä taajuuksilla, joilla pinnoitteen paksuus on aallonpituuden neljänneksen monikerta ($d=n\cdot\lambda/4$, $n=1,2,3,\dots$). Resonoivia pinnoitteita pyritään tekemään laajakaistaisemmiksi käyttämällä materiaaleita, joiden permittiivisyys ja permeabiliteetti riippuu taajuudesta. Tällöin materiaalin sähköinen paksuus (paksuus mitattuna aallonpituuksina) olisi lähellä arvoa $n\cdot\lambda/4$ riippumatta tulevan säteilyn taajuudesta.



Kuva 254: Vasemmalla RAM-rakenne, jossa vaimennus perustuu mahdollisimman pieneen heijastukseen RAM:n pinnasta sekä suureen vaimennukseen RAM:n sisällä. Oikeanpuoleisessa rakenteessa käytetään hyväksi lisäksi interferenssiä, jossa RAM:n pinnasta ja metallirakenteen pinnasta heijastuvalla säteilyllä on vastakkainen vaihe, jolloin ne kumoavat toisensa.

Tarvittava RAM-pinnoitteen paksuus riippuu uhan aallonpituudesta; yleensä miniminä pidetään noin $0,15 \cdot \lambda$ paksuutta. Esimerkiksi 3 GHz valvontatutkaa vastaan tarkoitetun pinnoitteen minimipaksuus olisi noin 15 mm ja 10 GHz seurantatutkaa vastaan tarkoitetun pinnoitteen noin 1,5 mm. Nykyisillä materiaaleilla voidaan 2-3 cm pinnoitteilla saavuttaa noin 95 % absorptio esimerkiksi 3-13 GHz alueella. Pahimpien uhkien mukaisesti valikoituilla resonanssitaajuuksilla voidaan päästä tätäkin suurempaan absorptioon. Koska RAM:n tehokkuus riippuu aallonpituudesta, tutkajärjestelmissä voidaan käyttää vastatoimenpiteenä matalampia taajuuksia, kuten VHF- ja HF-alueita. Tällöin tehokkaan RAM:n paksuus olisi useita kymmeniä senttimetrejä, mitä on käytännössä mahdotonta toteuttaa.

Kiinteillä tutkasäteilyä absorboivilla rakenteilla ja materiaaleilla voidaan saavuttaa yli 20 dB vaimennus tutkapoikkipinta-alaan, tutka-absorptioverkoilla noin 10 - 15 dB ja tavallisilla tutkanaamioverkoilla 6-12 dB lisävaimennus.



Kuva 255: Valkovenäläisen Minotor Servicen 2T *Stalker* tiedusteluajoneuvossa on kiinnitetty erityistä huomiota tutka-, infrapuna- ja visuaalisen herätteen minimoimiseen. Tutka- ja infrapunasuojaus on saavutettu muotoilulla, ilmanotto- ja poistoaukkojen sijoittamisella rungon takaosaan ja päällystämällä runko etu- ja yläsektoreista sekä torni noin 4 - 5 mm paksulla tutkasäteilyä vaimentavalla materiaalilla. Stalkerin häiveominaisuudet perustuvat lähinnä rungon muotoiluun ja ilmanotto- ja poistoaukkojen sijoitteluun.

[J. Kosola]

Tutkapoikkipinta-alan minimoiminen muotoilun keinoin edellyttää kohteen tarkkaa tietokonepohjaista suunnittelua ja tutkapoikkipinnan mallintamista. Suunnittelussa tulisi noudattaa seuraavia perussääntöjä:

- Fyysisen koon pienentäminen johtaa automaattisesti pienempään tutkapoikkipinta-alaan, mikäli muotoa ei muuteta. Pienestä koosta on siis hyötyä.
- Kohteessa ei saisi olla kulmaheijastinten tapaan toimivia rakenteita, joista säteily heijastuu aina tarkasti tulosuuntaansa. Tällaisia tahattomia heijastimia syntyy helposti ilmanottoaukkoihin, jäähdytysilman poistoaukkoihin, ohjaamotiloihin, helikoptereiden

roottoreiden ohjausrakenteisiin yms. Kaksi tai useampia toisiaan vastaan kohtisuorassa olevaa levyä saattavat toimia kulmaheijastimina. Tämän vuoksi häivetekniikalla toteutetuissa kohteissa ei yleensä ole suoria kulmia ja erilaiset ilmanottoaukot yms. on sijoitettu pois päin uhkasuunnasta. Ohjaamojen lasit ja sensoreiden germanium-linsit voidaan tarvittaessa päällystää ohuella läpinäkyvällä metallikalvolla, joka heijastaa tutkasäteilyn ja estää siten sen pääsyn kulmaheijastimena toimivaan onteloon.

- Suuret pinnat heijastavat hyvin pinnan normaalin suunnassa. Maa-ajoneuvoissa erityisesti pystysuorat pinnat ovat maasta tulevan uhan kannalta haitallisia ja vinot pinnat ilmauhan kannalta ongelmallisia.
- Kaarevia pintoja ja sylinterimäisiä rakenteita tulisi välttää.



Kuva 256: United Defensen konseptissa kannelle ei ole sijoitettu juuri minkäänlaisia tutkasäteilyä sattumanvaraisesti heijastavia rakenteita ja aluksen kyljet ja kansirakenteet on suunniteltu siten, että sivulta tuleva tutkasäteily heijastuu ylöspäin. [United Defense]

- Ulkopintojen tulee olla mahdollisimman tasaisia. Siten työkalujen, varustelaatikoiden, vinnssien yms. optimaalinen sijoituspaikka on suojattujen luukkujen sisällä.
- Kohtisuoraan uhkasuuntaa vastaan olevia heijastin antenneneja tulisi välttää. Ne voidaan peittää uhan säteilyä läpäisemättömällä radomilla tai korvata kokonaan esimerkiksi vinossa kulmassa olevilla sähköisesti keilaavilla antennilla.



Kuva 257: Leijan kaltaisessa Northrop Grumman'n lennokissa satelliittilinkin radomi peittää ilmanottoaukot alhaalta ja edestä katsottuna. Siiven johto- ja jättöreunat ovat ainoat kulmapinnat ja nekin on voimakkaasti viistetty siten, ettei säteilyä juurikaan heijastu takaisin tulo-suuntaansa. Erillisten korkeus- ja sivuvakaajien tarve on eliminoitu käyttämällä tähän siivekkeitä. [Northrop Grumman]

Terminen infrapuna-alue

Infrapuna-alueella kontrasti määräytyy kohteen lämpötilan ja emissiivisyyden mukaan, minkä vuoksi kohteen oma lämpöemissio on hallittava erityisen hyvin. Kohteen lämpöherätettä voidaan muokata pinnan emissiivisyyttä muuttamalla. Tällä menetelmällä voidaan alentaa lämpökameran näkemää näennäistä lämpötilaa kohteen todellista lämpötilaa alemmaksi ja myös rikkoa kohteen pintoja naamiokuvioinnin tapaan. Pintamateriaaleilla kohteen näennäistä lämpötilaa voidaan laskea 10...20 astetta. Emissiivisyyden liiallinen alentaminen tekee kohteesta liian kylmän, ja lisää heijastuskerrointa, jolloin se erottuu taustaansa vasten esimerkiksi taivaalta tulevien kylmien heijastusten vuoksi. Esimerkiksi pilvettömällä kylmällä ilmalla matalaemissiivistä kohdetta tarkasteltaessa sen ylöspäin suuntautuneista pinnoista saattaa heijastua kylmä taivas, joka näkyy suurena kontrastina taustaa vasten. Lämpönaamioimisen suurimmaksi ongelmaksi muodostuu kohteen emissioiden ja heijastusten hallinta siten, että kohde näkyisi mahdollisimman suurena määrin taustansa lämpöisenä sekä pilvisellä että aurinkoisella ja sekä tyynellä että tuulisella säällä. Kohteen pinnan tulisi lämmitä yhtä nopeasti kuin taustalla olevan kasvillisuuden tai maan ja vakiintua samaan lämpötilaan taustan kanssa. Auringon säteilyn lämmittävä sekä tuulen ja sateen jäähdyttävä vaikutus on otettava huomioon. Myös kohteiden likaantuminen on huomioitava, sillä likaantuneen kohteen emissiivisyys määräytyy kuran ja pölyn emissiivisyydestä, eikä alkuperäisen pintamateriaalin ominaisuuksista. Tämän vuoksi taistelukentän järjestelmät on pyrittävä pitämään mahdollisimman puhtaina.



Kuva 258: Sopivalla ja oikein asetetulla naamioverkolla voidaan suojata kohdetta myös lämpötähystykseltä [SA kuva]. Sisäkuvassa yksityiskohta Barracudan tutka- ja lämpönaamioverkosta [J. Kosola].

Ajoneuvojen ja aseiden kuumat osat on eristettävä ja tarvittaessa jäähdytettävä siten, etteivät ne näy todennäköisimpiin uhkasuuntiin. Tarvittaessa on käytettävä pakotettua nestejäähdytys-

tä, jolla saavutetaan moninkertainen teho ilmajäähdytykseen verrattuna. Kuumentunut jäähdytysilma sekä ajoneuvojen ja generaattoreiden pakokaasut tulee sekoittaa kylmään ulkoilmaan ennen niiden poistoa kohteen sisältä. Lämpökamera ei näe kuumaa ilmaa, jossa ei ole hiukkasia, joten se ei kykene havaitsemaan jäähdytysilmaa suoraan. Mikäli ympäristöä lämpimämpi jäähdytysilma johdetaan maahan tai se pääsee lämmittämään ajoneuvon ulkoseinämiä, mahdollisuudet kohteen paljastumiseen tätä kautta kasvavat. Vaikka lämpökameralla ei havaitakaan suoraan kuumaa ilmaa, näkyy pakokaasuissa oleva hiilidioksidi 3-5 µm ikkunasassa. Komposiittien ja muiden ei-metallisten rakennemateriaalien käytön yleistymisen johtaa lämmönhallinnan merkityksen korostumiseen, erityisesti auringon aikaansaaman lämpökuorman hallinnan osalta.

Lämpösäteily ei läpäise kasvillisuutta tai esimerkiksi naamioverkkoa, joten naamioverkkojen ja luonnon materiaalien yhteiskäytöllä ja kohteen oikealla sijoittamisella aluskasvillisuuden ja metsän suojaan saadaan varsin hyvä suoja myös IP-alueen tiedustelua vastaan.

Näkyvä valo ja lähi-infrapuna

Näkyvän valon alueen merkitys kohteen kokonaishavaittavuuden kannalta on nykyisten modernien tutka- ja lämpöensoreidenkin aikana keskeinen. Maalin visuaalinen havaitseminen on yhä yleisin tapa – ja suojattujen häivemaalien osalta mahdollisesti jopa ainut tapa – havaita kohde. Lisäksi lämpötähtäinten ja pimeän turvin toimivan vastustajan etu voidaan ainakin kiistää valaisemalla taistelukenttää näkyvän valon alueella ja toimimalla itse perinteisin menetelmin ja välinein.



Kuva 259. Luonnonmateriaalilla maastoutettu taisteluajoneuvo. [P Reiju]

Näkyvän valon alueella ja lähi-infrapunalla kontrasti määräytyy lähes yksinomaan kohteen väri- ja heijastusominaisuuksista, joiden tulisi olla samanlaisia taustan kanssa. Näkyvän valon alueella tämä käsitetään siten, että kohteen tulisi olla mahdollisimman taustansa värinen. Käytettävien maalien ja pinnoitteiden heijastusominaisuuksien tulisi noudattaa mahdollisimman hyvin taustaa koko spektrin alueella, ei vain näkyvän valon osalla. Perinteisesti kohteiden heijastuvuusvaatimusten samankaltaisuus taustansa kanssa on ulotettu 1000 nm aallonpituuteen asti, mutta sensoriteknikan kehittymisen myötä vaatimusta on kasvatettu 2500 nm:iin. Kasvillisuuden heijastusominaisuuksien jäljittelyssä ongelmaksi muodostuu kasvillisuudessa olevasta vedestä johtuvat 1450 nm ja 1950 nm alueella olevat heijastusminimit, joita on vaikea jäljitellä keinotekoisilla materiaaleilla.

Visuaaliseen paljastuvuuteen vaikuttavat heijastus- ja väriominaisuuksien lisäksi myös kohteiden kiiltoaste, koko, muodot ja kohteen aikaansaamat varjot. Peiliheijastusten välttämiseksi käytettävien maalien ja pinnoitteiden tulisi olla mattapintaisia. Naamiomaalauksessa kuvio-ko on sovittettava tarkasteluetaisyys vastavaksi: taistelijan asun kuviot ovat pieniä, koska tärkein uhkaetaisyys on lyhyt, mutta vastaavasti ajoneuvojen naamiokuviot ovat suhteellisen suurikokoisia.

Näkyvän valon ja lähi-infrapunan alueelle käytettäväksi tarkoitetut naamiointimateriaalit on tyypillisesti optimoitu metsäolosuhteisiin. Taisteltaessa taajama- ja haja-asutusalueilla tällaiset maastouttamisjärjestelmät eivät vastaa taustaansa. Näkyvän valon alueella ne erottuvat vihreinä ruskean ja harmaan eri värisävyjen dominoimasta taustasta. Lisäksi betonin heijastuskerroin eroaa huomattavasti lehtivihreän heijastuskertoimesta yli 800 nm aallonpituuksilla, minkä vuoksi metsäkäyttöön tarkoitettujen naamiomateriaalien kontrasti betonitaustaa vasten on suuri tarkasteltaessa niitä kolmannen sukupolven valonvahvistimilla. Esimerkiksi Saksan Bundeswehr käyttää kaupunkitaisteluihin optimoitua harmaan ja ruskean sävyistä naamioverkkoa, jonka suorakaiteen muotoiset kuviot poikkeavat maastossa käytetyistä pyöreistä muodoista, ja jonka heijastuskerroin on optimoitu keinotekoista taustaa vasten.



Kuva 260: Verkkomaisia naamiomateriaaleja käytetään esimerkiksi tiedustelijoiden ja tarkka-ampujien häivyttämiseen taustaansa. [Barracuda]

Kohteen saattavat paljastaa myös sille tulevat ja siitä lähtevät jäljet, kuten kulku-urat ja vanavesi, sekä kohteen aikaansaamat havaittavissa olevat ilmiöt, kuten varjot, pöly, savu ja vaikkapa lumen sulaminen kohteen lähistöltä, tai kohteen naamioimiseksi asetetusta kasvillisuudesta. Maastouttamisessa on siten kiinnitettävä huomiota kohteen itsensä lisäksi myös kohteen lähiympäristöön.

Ultravioletti

Ultravioletialueen heijastusominaisuudet tulevat merkittäviksi erityisesti lumisissa olosuhteissa. Kohteiden naamioimalauksen sekä naamiointiin käytettävien materiaalien tulisi omata lumen kanssa mahdollisimman samankaltaiset UV-heijastusominaisuudet. Lumen heijastuskerroin UV-alueella 0,35 - 0,38 μm välillä on 0,65 – 0,85, kun tavallisella valkoisella maalilla maalattujen kohteiden heijastuskerroin UV-alueella on alle 0,15 (yleisimmällä valkoisella pigmentillä titaanidioksidilla 10 %). Siten keinotekoiset materiaalit erottuvat ultravioletti-alueella selkeästi lumista taustaa vasten, vaikka ne näkyvän valon aallonpituuksilla sulautuisivat täysin taustaansa.

Ultraviolettisäteilyä syntyy myös erittäin kuumissa paloreaktioissa, kuten rakettimoottorin tai aseiden lähtöpanosten palaessa. Tätä hyödynnetään passiivisissa UV-alueen ohjusvaroittimissa, jotka pyrkivät havaitsemaan ohjuksen lähtökiihdytyksen. Laukaisutapahtuman suojaaminen UV-alueella on erittäin vaikeata, sillä palamisprosessiin on vaikeata puuttua.

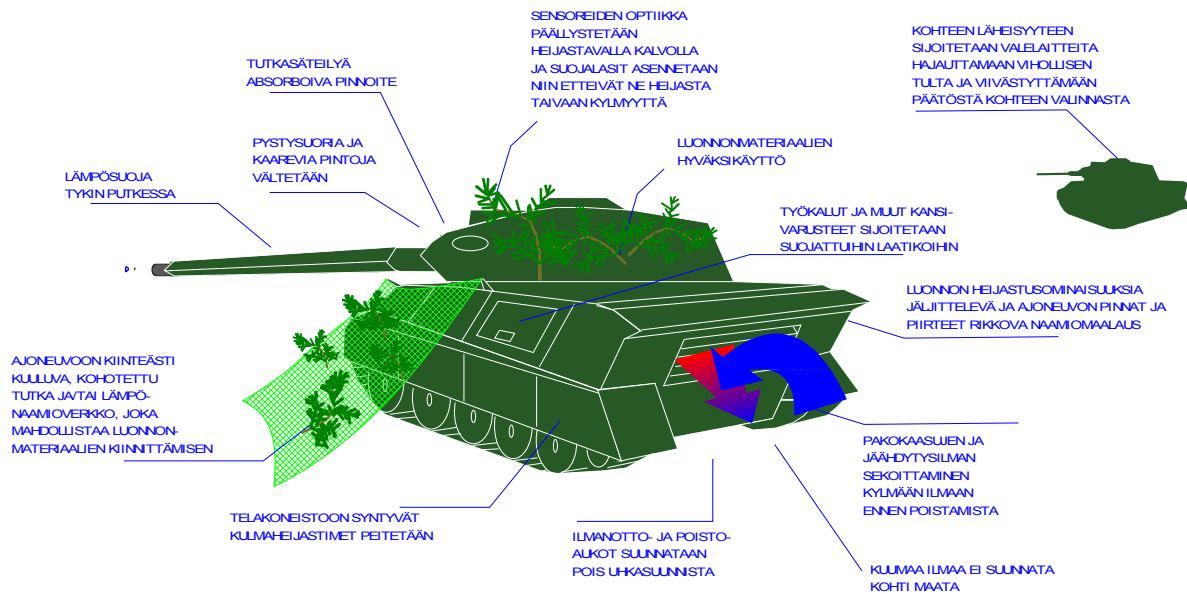
Kokonaisuuden huomioiminen

Äärimmilleen viety suojaus jollakin spektrin osalla tai jotakin tiettyä uhkaa vastaan voi johtaa kohteen paljastumiseen toisella spektri osalla tai toisentyypisellä sensorilla tarkasteltaessa. Onnistuneet häivemenetelmät ovatkin kompromisseja eri uhkien suhteen. Esimerkiksi huonosti säteilevä pinta on samalla hyvin heijastava, joten kohde saattaakin paljastua heijastusten vuoksi, kun tarkoituksena oli pienentää sen omaa emissiota. Toisena esimerkkinä voidaan mainita tutkasäteilyä absorboivat pinnoitteet, jotka lämmittävät kohdetta säteilyn valaistessa sitä, mikä helpottaa kohteen havaitsemista esimerkiksi passiivisella millimetri-aaltotutkalla.

Häivemenetelmiä on suunniteltava ja käytettävä kokonaisuutena; rakenteellisen suojan on katettava koko spektri ja niitä tukemaan on käytettävä kohteiden maastouttamista ja tarvittaessa linnoittamista. Runkoa, apertuureja ja elektronisia järjestelmiä ei saa suunnitella erillisinä. Maastouttamisen ja linnoittamisen lisäksi käyttäjän on hallittava kohteen sijoittaminen, ajo- ja kaivujälkien yms. toiminnan tuloksena syntyvien paljastavien seikkojen peittäminen, sekä kohdetta muistuttavien valelaitteiden rakentaminen. Vaikka taistelukentän ajoneuvot kyetään rakentamaan herätteiltään pieniksi sekä maastouttamaan taustaansa, paljastavat ajoneuvojen ja asemien lähellä liikkuvat suojaamattomat taistelijat helposti paitsi itsensä, myös suojatun kohteen. Voidaankin sanoa, että hyvällä koulutuksella voidaan korvata suuri osa rakenteen puutteellisuudesta, mutta parhaastakaan rakenteesta ei ole hyötyä, mikäli järjestelmän käyttöä ei hallita ja kohdistuvaa uhkaa tunneta.

Uhkan tuntemisessa keskeisenä on riittävä tilannetietoisuus: häivekohde paljastuu aina mikäli se on liian lähellä sensoria. Siten järjestelmän operatiivinen käyttöperiaate, tehtävä ja tilan-

teen mukainen oikea käyttö on keskeistä, jotta häivetekniikasta saadaan riittävä suoja. Tilannetietoisuuden lisäämiseksi esimerkiksi amerikkalaisessa JSF (Joint Strike Fighter) – projektissa harkitaan digitaalisen kartan ja ESM-vastaanotinten sekä tilannekuvan hyödyntämistä siten, että lentäjälle näytettäisiin paitsi häntä uhkaavien asejärjestelmien sijainti, myös niiden havainto- ja lukitusetäisyydet ympyränä, jonka säteen tietokone laskee automaattisesti tilanteen geometrian (koneen tutkapoikkipinta-ala kyseisessä tilanteessa kohti tutkaa) ja uhkakirjastojen perusteella.



Kuva 261: Kohteen suoja muodostuu rakenteellisten häivemenetelmien ja maastouttamisen sekä taktisen käytön kokonaisuudesta.

HARHAUTTAMINEN

Informaationsodankäyntiin kuuluva **operatiivinen harhauttaminen** (Operational Deception) on operatiivisella taholla tehtävää harhauttamista, jolla pyritään varmistamaan oman operaation toteutuminen. Operatiivisen harhauttamisen tavoitteena on luoda vastustajalle väärä mielikuva omien joukkojen ja järjestelmän sijainnista, tilasta ja tulevasta käytöstä. Operatiivinen harhauttaminen ei kuulu tämän kirjan aihepiirin rajaukseen, joten seuraavassa käsitellään vain siihen liittyviä tekniikoita. Todettakoon kuitenkin, että epäonnistunutkin harhautus tai harhautus, johon vastustaja uskoo vain jonkin aikaa saattaa olla tehokasta, sillä mikäli vastustaja havaitsee harhauttamisen, se joutuu joka kerta sensoreiden tuottamasta tiedustelu- ja valvontatiedosta arvioimaan onko kyseessä todellinen tieto vaiko harhauttaminen. Tämä ylimääräinen arviointi ja tietojen tarkastaminen hidastaa vihollisen tiedustelu- ja päätöksentekoprosessia ja sitoo sen resursseja.

Harhauttamisessa pyritään aina käyttämään todellisia joukkoja ja järjestelmiä, joita täydennetään tarvittaessa harhautusta varten kehitetyillä **harhautusvälineillä**. **Harhautusväline** on vastustajan operatiiviseen tai taktiseen päätöksentekoon vaikuttamaan pyrkivä väline, jolla luodaan vastustajan tiedustelu-, valvonta- ja maalinosoitusjärjestelmille väärä käsitys omien joukkojen ja järjestelmien sijainnista, toimintatilasta, toimintakyvystä ja aikoimuksista.

Tässä kirjassa käytetään nimitystä **valemaali** (decoy) välineestä, jolla pyritään harhauttamaan vihollisen maalinsoitus- tai maalinseurantajärjestelmää valemaalilla suojattavan lavetin todellisesta sijainnista ja/tai liikevektorista. Valemaali voi olla esimerkiksi laukaistava tai vapautettava heite tai hinattava. Valemaalit ovat järjestelmälavetin omasuojajärjestelmän osia, joten niitä käsitellään omasuojajärjestelmien yhteydessä. **Harhamaali** (false target) puolestaan tarkoittaa elektronisen sodankäynnin keinoin luotavaa virtuaalista maalia, joka synnytetään elektronisen sodankäynnin menetelmin vastustajan tiedustelu-, valvonta-, maalinsoitus- tai asejärjestelmäsensoreille. Erilaisia menetelmiä harhamaalien synnyttämiseen käsitellään tutkasensoreiden käsittelyn yhteydessä.



Kuva 262: Valekiitorata ja F-16 valemaaleja. [USAF]

Valelaitteen on annettava sitä tarkkailevalle sensorille uskottava heräte. Vaadittavan herätteen ominaisuudet riippuvat

- suojattavan kohteen ominaisuuksista
- sensorin kyvystä kerätä informaatiota kohteesta
- valelaitteen taustan herätteistä
- tilannedynamiikasta ja tilannegeometriasta

Suojattavan kohteen keskeinen ominaisuus on luonnollisesti sen heräte sillä spektrin alueella, jolla uhkasensori toimii. Mitä pienempi suojattavan kohteen heräte on, sitä yksinkertaisemmalla, pienemmällä ja halvemmalla valelaitteella voidaan luoda vastaavanlainen heräte. Usein sopiva yhdistelmä yksinkertaisia häiveteknisiä ratkaisuja yhdessä yksinkertaisten valelaitteiden kanssa on halvempi ratkaisu kuin korkeateknologisen ja kalliin häivetekniikan soveltaminen tai sofistikoituneiden kalliiden valelaitteiden rakentaminen.

Sensorin resoluutio on ratkaisevaa valelaitteelta vaadittavien ominaisuuksien kannalta: mikäli resoluutio suhteessa suojattavan kohteen mittoihin on riittävän heikko, riittää pelkän pistemäisen valemaalin käyttö. Esimerkiksi tutkaa vastaan voidaan käyttää yksinkertaisia soppiheijastimia ja infrapunatiedustelua vastaan vaikkapa lämpökynttilällä lämmitettyjä jäte-

säkkejä. Mikäli sensorin resoluutio riittää kuvan muodostamiseen, on valelaitteenkin oltava kaksi- tai kolmiulotteinen. 2,5-ulotteiseksi sanotaan valelaitetta, joka käsittää vain osan kohteesta, esimerkiksi suojaan ajettua panssarivaunua emuloivan tornin ja rungon yläosan tai vaunun etuosan.

Valelaitteen taustaherätteillä on suuri merkitys laitteen uskottavuuteen, sillä ne vaikuttavat siihen miten sensori kykenee erottamaan todelliset kohteet taustasta. Jos sensorin toimintakykyä heikennetään esimerkiksi elektronisella häirinnällä tai suojaamalla kohdealuetta silppu- tai savuverholla, yksinkertaisenkin valelaitteen erottaminen todellisista kohteista voi olla hankalaa. Toisaalta epärealistinen taustan heräteympäristö saattaa paljastaa valelaitteen todellisesta kohteesta – tällaisia tekijöitä ovat esimerkiksi valelaitteen ympäriltä puuttuvat henkilöt ja ajoneuvojen jäljet. Vastustajan on nähtävä suurin piirtein sellaisia kohteita, jälkiä ja liikettä, joita se odottaa toimintaan kuuluvan, muutoin harhautuksella ei ole uskottavuutta.

Tilannegeometria ja -dynamiikka vaikuttavat myös valelaitteelta vaadittaviin ominaisuuksiin. Valelaitteen on oltava uskottava vain tietyltä etäisyydeltä tarkasteltuna, ei sitä lähempää. Tämä kriittinen etäisyys riippuu luonnollisesti siitä kuinka lähelle uhkasensorin voidaan olettaa tulevan – esimerkiksi tiedustelukone tai -satelliitti – tai kuinka lähelle se halutaan pakottaa ennen kuin se kykenee toteamaan mikä kohteista on valelaite. Esimerkiksi rynnäkkökone tai -helikopteri halutaan pakottaa valitsemaan joko lähestymisen torjuntajärjestelmien kantaman sisäpuolelle tai valitsemaan sokkona tulitettavat maalit, joista osa on valelaitteita. Ensimmäinen vaihtoehto mahdollistaa uhkan torjumisen ja jälkimmäinen heikentää sen vaikuttavuutta suuntaamalla ainakin osan asevaikutuksesta valesuunnitelmiin. Valelaitteilla voidaan myös pyrkiä viivästäämään vihollisen päätöksentekoa kriittisellä hetkellä. Esimerkiksi maalialueen yli lentävällä rynnäköhelikopterin tai -lentokoneen pilotilla tai panssarivaunun johtajalla on hyvin lyhyt aika tehdä päätös siitä mitä maalia vastaan hyökkää. Mitä pidempään häneltä kestää päättää mitä havaituista kohteista tulittaa, sitä paremmat mahdollisuudet toisella osapuolella on selvittää tilanteesta voittajana.

Harhautusmenetelmiä voidaan myös käyttää vaurioiden imitoimiseen. Tällä pyritään yleensä suuntaamaan vihollisen tulivaikutusta muualle suojattavasta kohteesta tai saamaan vihollinen toimimaan varomattomammin sen uskoessa oman järjestelmämme tuhoutumiseen. Vaurion imitointi voi olla hyvä keino suojata isoja kiinteitä kohteita, kuten lentokenttiä, voimalaitoksia, ratapihoja ja keskusvarastoja vihollisen tulivaikutukselta. Keinoja vaurion esittämiseen on useita, esimerkiksi Persianlahden sodassa irakilaiset kasasivat liittouman pommituslennon jälkeen multaa kiitoradalle imitoimaan pommikuoppia. Kosteaa multa antoi realistisen oloisen kuvan sekä lämpö- että visuaalitiedustelulle. Palojen sytyttäminen ja kohteen savuttaminen ovat perinteisiä keinoja luoda kuvaa tuhotusta kohteesta.

Harhauttaminen operatiivisella, taktisella tai taisteluteknisellä tasolla on satoja, ellei tuhansia vuosia vanhaa osaamista. Moderni taistelukenttä usealla spektrin eri alueilla toimilla sensori- ja asejärjestelmillä vain on asettanut suurempia vaatimuksia onnistuneeseen harhauttamiseen vaadittavalle osaamiselle. Sensoria ja hakupäätä suunniteltaessa tai valittaessa sopivaa ehdokasta tarjottavien vaihtoehtojen joukosta on aina selvítettävä miten sen harhauttaminen on mahdollista. Samoin suojattavaksi haluttavien kohteiden suunnittelussa, hankkimisessa, käytössä ja sijoittamisessa on aina otettava huomioon miten todellisesta kohteesta voidaan mahdollisimman yksinkertaisesti ja halvalla valmistaa riittävän uskottava valelaite. Mitä aikaisemmassa vaiheessa tämä huomioidaan, sitä yksinkertaisempaa ja halvempaa se on.

TIEDUSTELUJÄRJESTELMÄ

Tässä luvussa kerrotaan lyhyesti, miten aiemmin esiteltyjä erilaisia sensoreita käytetään taistelukentän taktiseen tiedusteluun. Näkökohta on jälleen tekninen. Taktiseen tiedusteluun käytettävissä olevia teknisiä menetelmiä ovat muun muassa: akustinen tiedustelu, optinen tiedustelu (filmipohjaiset kamerajärjestelmät, elektro-optiset kamerat, kuten televisio ja lämpökamera), tutka (perinteinen tutka, synteettisen apertuurin tutka, maastonvalvontatutka ja vastatykistötutka) sekä elektroniset tiedustelu- ja valvontajärjestelmät.

Taistelukentän tiedustelujärjestelmät voidaan jakaa myös lavetin mukaan, esimerkiksi seuraavasti:

1. Maatiedustelu (ajoneuvot, kaukotähystysjärjestelmät)
2. Lentotiedustelu (tiedustelulentokoneet, helikopterit, lennokit)
3. Satelliittitiedustelu

Eri aallonpituusalueiden etuja ja heikkouksia on lueteltu taulukossa 17.

Tiedusteluajoneuvot

Taktisen tiedusteluajoneuvon tehtävänä on perinteisesti ollut selvittää vihollisen puolustusasemien sijainti ja puolustuksen heikkoudet toimien oman etulinjan edessä. Taistelutilan tyhjeneminen on johtanut siihen, ettei selkeästi omassa ja toisaalta puhtaasti vihollisen hallussa olevaa aluetta enää ole. Tämä puolestaan on näkynyt myös tiedusteluajoneuvojen kehityksessä. Perinteisten rynnäkköpanssarivaunujen tyypillisesti rakennettujen tiedusteluajoneuvojen tilalla – ja osin niitä täydentämään – käytetään jonkin verran kevyemmin panssaroituja ja aseistettuja ajoneuvoja, joiden sensorivarustus puolestaan on olennaisesti parempi.

Näkyvän valo:

- + Hyvä resoluutio.
- + Kuvat helposti tulkittavissa, koska vastaavat ihmissilmän normaalia näköä.
- Pilvipeitteen, utuverhon, sumun tai savun läpi ei nähdä.
- Pimeällä ei voida tiedustella.

Terminen infrapuna:

- Näkyvää valoa huonompi resoluutio.
- + Tutkaa parempi resoluutio.
- + Kuvista voidaan paljastaa kaivujäljet, ajoneuvojen jäljet, maastoutetut kohteet yms. informaatiota.
- Kuvien tulkinta edellyttää tietoa materiaalien käyttäytymisestä.
- Kuvan ominaisuudet muuttuvat sään vaihtuessa, jolloin joitakin kohteita tai yksityiskohtia saattaa jäädä pimentoon.
- + Sään vaihtelua voidaan käyttää hyväksi erottamaan maastoutukseen käytettyjä keinotekoisia ja luonnonmateriaaleja normaalista taustasta.

Tutka:

- Muihin menetelmiin verrattuna huono resoluutio.
- + Riittävä resoluutio rakennusten, teiden, siltojen, ajoneuvojen yms. kohteiden havaitsemiseen ja joskus myös tunnistamiseen.
- + Säästä ja valaistusominaisuuksista riippumaton toimintakyky (rankka vesi- tai räntäsade rajoittaa kuitenkin tutkan kantamaa).
- Kuvan tulkinta edellyttää korkeata koulutustasoa, sillä tutkakuva ei vastaa ihmissilmälle tuttua näkymää maastosta.

Taulukko 17: Eri aallonpituusalueiden käytettävyyteen vaikuttavia seikkoja.

Ajoneuvot varustetaan käyttötarpeen ja perusteella – tietysti resurssien sen salliessa – lämpökameralla ja maastonvalvonta-tutkalla. Jotta havaittuihin maaleihin voidaan käyttää tulta, varustukseen kuuluu yleensä myös laseretäisyysmittari ja paikantamislaitte. Paikantamislaitteena käytetään tyypillisesti satelliittipaikantimella varmistettua inertianavigointilaitetta. Laseretäisyysmittaria täydennetään varsinkin suurvalta-armeijoissa laservalaisulaitteistolla, joka mahdollistaa täsmäaseiden käytön havaittuja kohteita vastaan. Tällöin tiedusteluajoneuvon tehtäväkenttä laajenee komentajan päätöksenteon tuesta myös vihollisen kriittisimpien kohteiden, kuten komentopaikkojen ja -ajoneuvojen, viestikeskusten ja tiedustelu-järjestelmän lamauttamiseen.



Kuva 263: Thalesin tiedusteluajoneuvon sensoreina on maastonvalvontatutka, lämpökamera, CCD-päivänvalokamera ja laseretäisyysmittari. [J. Kosola]

Sensorikuormaa valittaessa on otettava huomioon ajoneuvon käyttötarkoitus ja käyttöalue. Esimerkiksi maastonvalvontatutka saattaa olla tarpeeton investointi peitteisessä tai vuoristoisessa maastossa. Toisaalta lämpökameraa voidaan täydentää hyvän resoluution omaavalla valovahvistinlaitteistolla tai matalavalotelevisiolla.

Tiedusteluajoneuvon lisäksi viestijärjestelmä muodostaa keskeisen osan ajoneuvon varustelusta. Viestijärjestelmän tehtävänä on toisaalta tarjota vihollisen elektroniselta tiedustelulta ja valvonnalta suojattu yhteys ja toisaalta mahdollistaa ajoneuvon tunkeutuminen syväälle vihollisen taistelutilaan.

Tiedustelukoneet

Tiedustelukoneella tarkoitetaan yleisesti lentokonetta, johon on asennettu eri spektrin osia käyttäviä sekä passiivisia että aktiivisia sensoreita tilannekuvan muodostamista varten. Tavallisesti tiedustelukoneen hyötykuorma koostuu esimerkiksi aktiivisesta SAR-tutkasta sekä passiivisista SIGINT-laitteistoista ja optisesta kuvausjärjestelmästä, joilla on kyky toimia kaikissa sääolosuhteissa ja kaikkina vuorokauden aikoina. Olosuhteista, suoritettavasta tehtävästä, tiedusteltavasta kohteesta, hyötykuorman käytettävissä olevasta tilasta, tehosta tai painosta riippuen SIGINT-järjestelmä voi koostua joko COMINT- tai ELINT-laitteistosta tai mahdollisesti niistä molemmista.

Luonnollisesti tiedustelukoneen käyttö edellyttää operointia joko vahvasti suojattuna tai ilmatilassa, jonka ilmaherruus voidaan taata, koska hitaasti ja yleensä suoraviivaisesti lentävä

kohde on erittäin helppo maali vihollisen hävittäjille. Tiedustelukoneella saavutetaan erittäin suuri havaintoetäisyys kaikilla sensoreilla korkealla tapahtuvan operoinnin takia, joka taas asettaa suuret vaatimukset sensorien suuntaamislaitteille sekä sensorien instrumentaalisille suuntimistarkkuuksille. Toisaalta tiedustelukoneen yhtenä tarkoituksena on mahdollistaa ennakkovaroitus, jonka pohjalta muut taistelukentällä käytettävät sensorit osataan kohdentaa ja sijoittaa oikealla tavalla, jolloin suuntaa antava havaintokin on parempi kuin ei mitään.

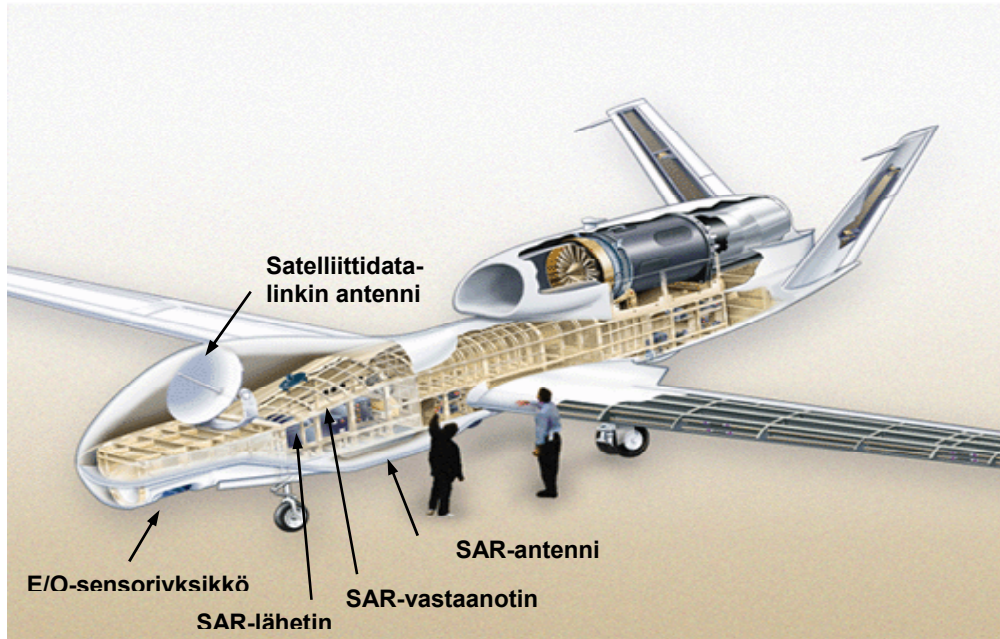


Kuva 264: Ranskan ilmavoimien C160 Gabriel –tiedustelukone. Hercules C-130 kuljetuskoneesta modifioidun tiedustelukoneen tiedusteluvarustus sisältää sekä COMINT-, että ELINT-järjestelmät sekä optisen kuvauslaitteiston. [J. Kosola]

Tiedustelukoneen erottelukyvyyksi päiväkameralla voidaan olettaa 0,2 mrad. Kone lentää 3-12 km korkeudessa ja kykenee luokittelemaan ajoneuvot 4-5 km etäisyydeltä. IP-keilaimella erottelukyky on 3 mrad luokkaa. Tällöin kone lentää noin 400-800 m korkeudessa ja kykenee luokittelemaan ajoneuvon 500 m etäisyydeltä.. VHF-SAR-tutkan erottelukyky on noin 4 m ja X-alueen SAR:n 2-4 m. (spot-moodissa 0,5 – 1 m luokkaa). SAR-tiedustelun kantama on yli 80 km. SAR:a täydennetään liikkuvien maalien etsintään ja paikantamiseen tarkoitetulla MTI-tutkalla. Koko sähkömagneettista spektriä HF-taajuuksilta aina EHF-alueelle saakka valvovien ELINT- ja COMINT-laitteistojen tiedustelu- ja havaintoetäisyys rajoittaa ilmakehän vapaantilan aiheuttaman minimaalisen etenemisvaimennuksen vuoksi lähinnä lentokorkeuden määrittämä radiohorisontti.

Tiedustelulennokit

Tiedustelulennokin koko vaihtelee pienestä miehen kannettavasta miniatyyrisestä lentolaitteesta liikelentokoneen kokosiin strategisiin miehittämättömiin lentokoneisiin. Strateginen miehittämätön tiedustelulentokone, kuten amerikkalainen RQ-4A Global Hawk, kykenee lentämään muutaman tuhannen kilometrin päässä olevalle toimintasektorilleen ja vielä sen jälkeen pysyttelemään vuorokauden verran alueella.



Kuva 265: Strategiseen tiedusteluun tarkoitettu pienen suihkukoneen kokoisen RQ-4A Global Hawkin toimintamatka on lähes 25.000 km, toiminta-aika 36 h ja hyötykuorma yli 900 kg. Lähes 20 km korkeudessa lentävä kone on varustettu lämpökameralla ja näkyvän valon CCD-kameralla sekä SAR-tutkalla. Tutkan resoluutio spot-moodissa on 30 cm ja laaja-alue-etsintätilassa 1 m. SAR:n MTI (Moving Target Indicator) kykenee ilmaisemaan maalit, jotka liikkuvat yli neljän solmun (2 m/s) nopeudella. Sensoreiden kuva välitetään maa-asemalle suoralla radioyhteydellä tai satelliittilinkin välityksellä. [Raytheon]



Kuva 266: Vasemmalla Global Hawkin SAR-kuvaa spot-moodissa 30 km tutkausetäisyydeltä ja oikealla elektro-optisen sensorin kuva voimalaitoksesta. [Australian Army]

Lennot	sensorit	nopeus	aika	kantama	korkeus	tehtävä
Shadow 200		50 km/h	>3 h	120 km	4,5 km	tulenjohto, ELSO, tiedustelu
Shadow 400		40	>5	120	4,5	tulenjohto, tied. & valvonta, maalinpaik.
Shadow 600		45	>10	120	5	ELSO, tied. & valvonta
Vulture	IR, TV, laser	60	>3	37	5	maalinpaikannus ja tulenjohto
Aerosonde	E/O	20-50	>35	>2500	7	valvonta
Dragon Drone	E/O, IR, EW	50	3	30	4,5	ELSO, tied. & valvonta, maalinpaik.
Hawk-i, H12	E/O	120	7	125	6	maalinpaik., tulenjohto, tied. & valvonta
Predator	FLIR/TV/SAR	60	>40	5600	7,5	tiedustelu ja valvonta
Prowler II	FLIR/TV	60	>18	250	6	tiedustelu
Heron	IR, TV, tutka	125	24	1000	14	tulenjohto, tied. & valvonta, maalinpaik.
Searcher Mk II	IR, TV	65	15	250	6	tulenjohto, tied. & valvonta, maalinpaik.
E-Hunter	IR, TV	65	25	200	6	tulenjohto, tied. & valvonta, maalinpaik.
Global Hawk	E/O, IR, SAR	>180	40	26000	20	tiedustelu, valvonta
RQ2B Pioneer	TV/FLIR	60	5,5	200	11	tiedustelu, maalinpaikannus
Sperwer	E/O, IR	<45	6	220	5	tied. & valvonta, maalinpaikannus
Ranger	IR, TV	70	5	150	4,5	tied. & valvonta, maalinpaikannus
RQ-5A Hunter	E/O IR	60	12	230	4,5	ELSO, tied. & valvonta, maalinpaik.

Lähde: JED March 2001

Taulukko 18: Esimerkkejä tiedustelu- ja valvontalennokeiden ominaisuuksista.

Tiedustelusatelliitit

Taktiseen käyttöön tarkoitettua tiedustelusatelliitin lentorataa on kyettävä muuttamaan tilanteen mukaisesti. Tämä kuitenkin kuluttaa polttoainetta, minkä vuoksi uusimpien amerikkalaisten tiedustelusatelliittien polttoainevaraston uskotaan olevan täydennettävissä avaruussukkuloilla. Taktisessa käytössä satelliittitiedustelulla saatavaa informaatiota voidaan hyödyntää vihollisen joukkojen, ryhmitysten, huoltokeskusten ja esikuntien tiedusteluun sekä tarkkojen ja ajan tasalla olevien maastokarttojen ja kolmiulotteisen maastoprofiilin laatimiseen. Kolmiulotteista maastoprofiilia voidaan käyttää esimerkiksi rynnäkkökoneiden lentäjien perehdyttämisessä hyökkäyskohteeseen virtuaalitodellisuuden avulla. Satelliittitiedustelulla voidaan myös arvioida suoritettujen ilma- ja tykistöiskujen tuho vaikutuksia sekä kohdentaa uusintaiskut tuhoutumattomiin maaleihin.

Tiedustelusatelliiteissa käytetään sensoreina näkyvän valon aallonpituuksilla erityistä tiedustelukameraa, lämpökameraa 8-12 μm alueella, synteettisen apertuurin tutkaa (SAR) ja HF – EHF – tiedusteluvastaanottimia. Näkyvän valon aallonpituuksilla saavutetaan paras resoluutio, mutta niiden käyttö rajoittuu päiväsaikaan. Lisäksi pilvipeite rajoittaa tiedustelua. Termisen infrapun (kaukoinfrapuna) alueella tiedustelua voidaan suorittaa myös pimeällä ja ohuen pilviverhon läpi. Toisaalta infrapuna-alueen pidemmän aallonpituuden vuoksi erottelukyky on vastaavasti heikompi. SAR:lla voidaan tiedustella pilvipeitteen ja sumun läpi, mutta sen erottelukyky on vielä heikompi kuin lämpökameran.

Tiedustelusatelliitin optinen erottelukyky metreinä saadaan kaavasta:

$$d_m = \frac{H_{\text{sat.m}}}{F_m \cdot R_m}$$

jossa $H_{\text{sat.m}}$ on satelliitin lentokorkeus maanpinnasta, F_m on optiikan polttoväli ja R_m sensorielementtien tiheys (kappalemäärä metriä kohti) sensorimatriisilla. Sensorielementtien

teoreettinen suurin tiheys määräytyy elementin pienimmän mitan mukaan. Pienin teoriassa saavutettavissa oleva elementin koko on noin 2 x aallonpituus, eli näkyvän valon alueella noin 2 μm ja infrapuna-alueella noin 25 μm . Tähän teoreettiseen arvoon ei päästä valmistustekniikan asettamien rajoitusten vuoksi. Lisäksi elementtien väliin on jätettävä jonkin verran tilaa. Käytännössä nykytekniikalla päästään infrapunailmaisimissa noin 50 μm elementin tiheyksiin. Jos tällaisista elementeistä valmistettua matriisia käytettäisiin 200 km korkeudessa lentävässä satelliitissa, jonka optiikan polttoväli on 2 metriä, saavutettaisiin resoluutio:

$$d_m = 2 \cdot \frac{200 \cdot 10^3}{50 \cdot 10^6} = 5 \text{ m}$$

Teoreettinen infrapuna-alueen erottelukyvyn maksimiarvo olisi 2,5 metriä ja optisella alueella 20 cm. Jos erottelukykyä halutaan lisätä, on joko pidennettävä polttoväliä tai laskettava satelliitin lentokorkeutta. Lentokorkeuden laskeminen pienentää satelliitin kiertoaikaa ja lisää ilmakehän kitkaa³¹. Kitka on syy siihen, miksi matalalla lentävien satelliittien elinikä on varsin lyhyt, jopa muutamia päiviä. Erottelukyvyn lisääminen puolestaan johtaa satelliitin näkökentän pienenemiseen. Kuvaussatelliittien suorituskykyä kuvastanee parhaiten se, että yleiseen käyttöön saatavilla oleva resoluutio on tällä hetkellä metrin luokkaa. Puolustusviranomaiset luovuttavat valikoitujen asiakkaiden käyttöön myös 0,5 metrin resoluutioisia kuvia pitäen tätä tarkemmat kuvat omana tietonaan. Tulevaisuudessa on kuitenkin nähtävissä myös 0,5 metrin resoluution tulevan laajaan kaupalliseen käyttöön – mahdollisesti tietyn rajoituksin. Mahdollisia rajoituksia ovat esimerkiksi resoluution heikentäminen tietyillä alueilla sekä pakollinen vuorokausiluokkaa oleva viive tietojen keräämisen ja yleiseen käyttöön jakamisen välillä.

Satelliitin näkökentän maan pinnalla peittämä alue voidaan approksimoida kaavalla:

$$D_m = \frac{H_{\text{sat.m}} \cdot n}{F_m \cdot R_m} \text{ tai } D_m = n \cdot d_m$$

jossa n on satelliitin ilmaisimissa olevien elementtien lukumäärä. Esimerkiksi 2048 x 2048 elementtisellä matriisilla esimerkin infrapunatiedustelusatelliitti näkisi kerrallaan maan pinnalta noin 10 km x 10 km alueen. Matalalla jopa noin 150 km korkeudessa lentävien tiedustelusatelliittien polttovälin väitetään olevan jopa 24 metriä, joten tällaisella satelliitilla erottelukyky olisi teoriassa 50 μm ilmaisintiheydellä:

$$d_m = \frac{150 \cdot 10^3}{24 \cdot \frac{1}{50 \cdot 10^6}} = 31 \text{ cm}$$

Optisella alueella resoluutio voisi teoriassa olla jopa 13 mm x 13 mm, käytännössä todennäköisesti noin 25 mm x 25 mm. Näin matalalla lentävän satelliitin kiertoaika maapallon ympäri on muutamia kymmeniä minuutteja, joten satelliitti joutuu käyttämään hyvin lyhyttä kuvausaikaa ja kykenee tiedustelemaan vain hyvin pienen alueen kerrallaan.

³¹ Amerikkalainen KH-11 tiedustelusatelliitti lentää 97 asteen inkliinaatiokulmassa läheltä napoja. Se lentää lähimmillään noin 250 km ja loitimmillaan noin 500 km korkeudessa 93 minuutin kiertojalla. Satelliitin laskennallinen elinikä on kolme vuotta.

Käytännössä ilman epäpuhtaudet ja pyörteet rajoittavat satelliitin erottelukykyä teoreettisesta. Epäpuhtauksista aiheutuvasta sironnasta johtuva utu rajoittaa myös matalalla lentävien tiedustelujärjestelmien toimintaa.

Kaukokartoitussatelliittien erottelukyky tulee lähitulevaisuudessa paranemaan nykyisestä noin 6 metrin resoluutiosta 80 cm luokkaan. Tämä mahdollistaa kaupallisen satelliittitiedon hyväksikäytön myös sotilaallisessa tiedustelussa ja valvonnassa.

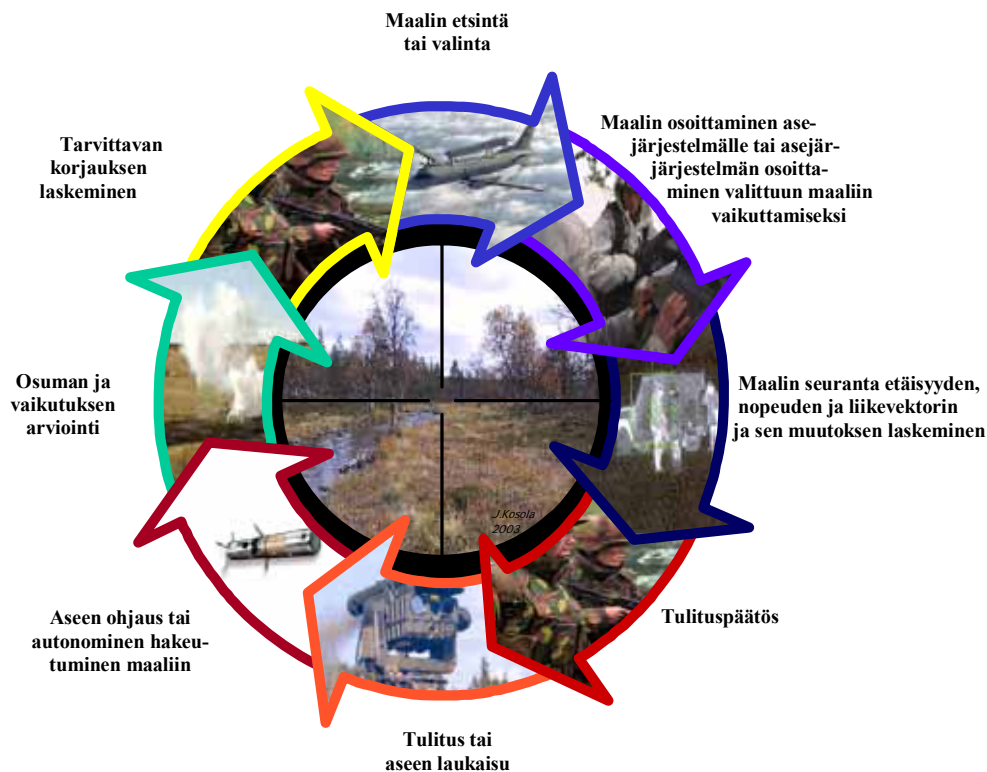
Elektronisen tiedustelun (ELINT ja SIGINT) satelliitit ovat yleensä geostationaarisia ja lentävät noin 35 500 – 35 900 km korkeudessa. Satelliiteilla on suora näköyhteysreitti maan päällä oleviin viestiverkkoihin, minkä vuoksi yhteysvälivaimennus on 'vain' noin 183 dB:a. Tämä vastaa kuitenkin noin 20 km yhteyden aiheuttamaa vaimennusta maan pinnalla, joten geostationaaristen satelliittien suuri etäisyys ei olekaan niin merkittävä haitta kuin ensi kädeltä voisi kuvitella. On kuitenkin huomattava, että maan päälliseen tietoliikenteen tarkoitettujen antennien – erilaisia satelliitti-, sironta- ja HF-radiojärjestelmiä lukuun ottamatta, on suunnattu maan pinnan mukaisesti, joten geostationaarinen satelliitti ei ole säteilykuvion maksimikohdassa. Satelliittiin saadaan varsin pieni signaali siroavasta ja heijastuvasta säteilystä. Lisäksi on otettava huomioon se, että satelliitin tiedusteluantennin keilassa on lukuisia lähettäjiä, joista satelliitin on vaikea – joskus täysin mahdoton – poimia juuri tiettyjä lähteitä.

Tähän päättyy varsin pitkä sensoriluku. Seuraavassa luvussa esitellään kolmatta keskeistä elementtiä, asejärjestelmiä.

ASEJÄRJESTELMÄT

Luvussa käsitellään sähkömagneettisen spektrin hyväksikäyttöön perustuvia asejärjestelmiä, joiksi on tässä katsottu kuuluvan autonomisesti maaliin hakeutuvat ja ohjattavat ammuksot, häirintäjärjestelmät sekä erityisesti suunnatun energian aseet. Aihealue on jaoteltu spektrin hyödyntämisen ja aseiden ohjautusperiaatteen mukaisesti, joten esimerkiksi panssarintorjunta-aseita, rynnäkö- tai ilmataisteluoohjuksia ei käsitellä omina kokonaisuuksinaan. Digitaalisella taistelukentällä käytetään luonnollisestikin myös perinteisiä aseita ja uusia ei-tappavia aseita. Koska näiden liityntä sähkömagneettiseen spektriin on löysä, niitä ei tilanpuutteen vuoksi käsitellä tässä kirjassa. Välillistä spektrin hyödyntämistä (esim. lämpökamera panssarivaunussa tai helikopterissa) on käsitelty jo sensorijärjestelmät – luvussa.

Kuvassa 266 on esitetty usein käytetty asejärjestelmän toimintaketju ”kill chain”, jonka kaikkien osien on oltava toimintakuntoisia, jotta järjestelmä toimii. Oman taistelun tukemiseksi toimintaketju pyritään suojaamaan ja sen eri osien suoritusajat minimoimaan. Vastaavasti vastustajan taistelun hidastamiseksi ja asejärjestelmän suorituskyvyn laskemiseksi pyritään sen asejärjestelmän toimintaketjuun vaikuttamaan sen kriittisimmistä ja heikoimmista kohdista.



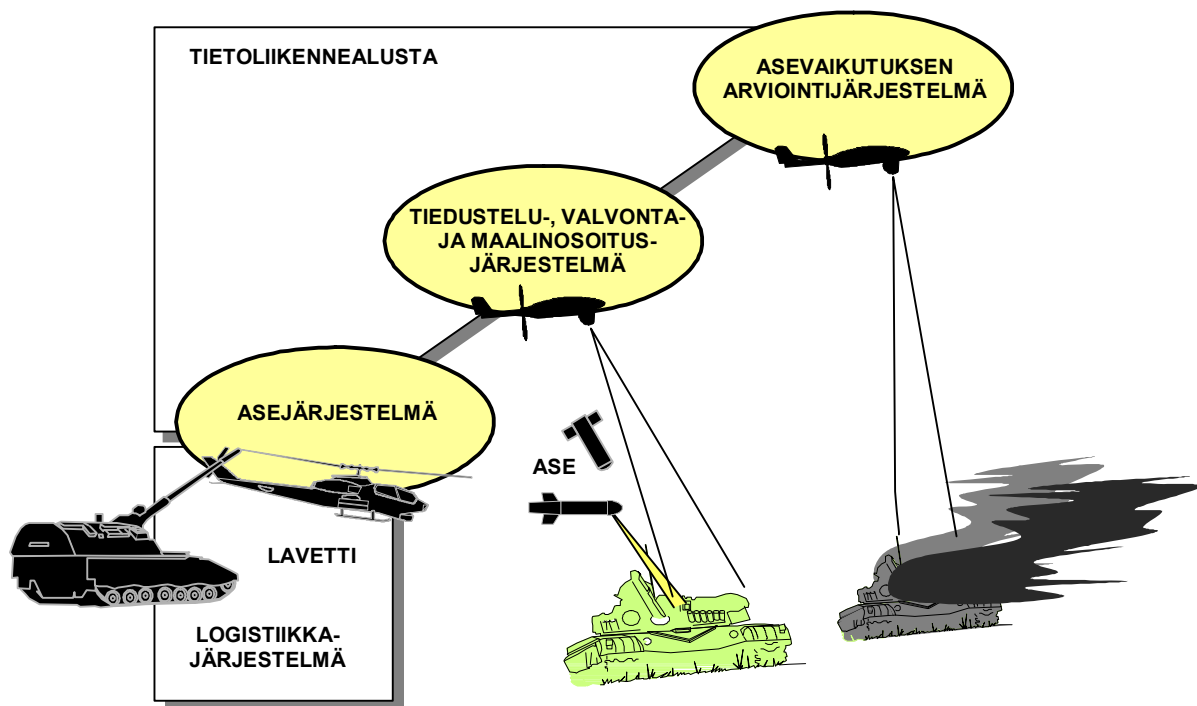
Kuva 266: Asejärjestelmän periaatteellinen toimintaketju ”kill chain” on kaikissa asejärjestelmissä sama, vaikka eri toiminnot eri järjestelmissä saattavat kuulua eri osajärjestelmien vastuulle.

Asejärjestelmän toimintaketju alkaa maalin havaitsemisesta, jonka jälkeen on ensin tehtävä päätös kannattaako maaliin vaikuttaa ja sen jälkeen on päätettävä, mille asejärjestelmälle

siihen vaikuttaminen annetaan tehtäväksi. Asejärjestelmän on saatava maalinosoitus tiedustelu- ja valvontajärjestelmältä, jonka jälkeen se pyrkii saamaan ja edelleen pitämään maalin seurannassa. Asejärjestelmä pyrkii selvittämään maalin sijainnin ja liikeradan sekä niiden muutokset kyetäkseen päättelemään mihin suuntaan ja milloin sen on ase laukaistava sekä mahdollisesti miten sen on hakeutuva ase ohjelmitava. Seurantavaiheessa saatetaan myös arvioida mahdollisen laukaisun jälkeistä osumatodennäköisyyttä. Lähes kaikissa asejärjestelmissä tulituspäätöksen tekee ihminen. Tulituspäätöstä voi seurata aseiden käynnistäminen ja vakauttaminen ennen sen laukaisua. Laukaisun jälkeen asetta on ohjattava – joko ulkoisesti tai aseiden sisäisen hakupään toimesta. Järjestelmän on kyettävä todentamaan osuma tai arvioimaan ohituspiste. Mikäli ase ei osunut tai lauennut riittävän lähellä maalia, järjestelmä laskee tarvittavat korjaukset ja – mikäli maali on ollut koko ajan seurannassa – tekee uuden tulituspäätöksen. Asejärjestelmän tyypistä riippuu mitkä vaiheet syklissä on mukana ja mitkä on toteutettu ihmisvoimin ja mitkä automaattisesti.

Asevaikutukseen digitaalisella taistelukentällä liittyy neljä keskeistä elementtiä:

1. Tiedustelu-, valvonta- ja maalinosoitusjärjestelmä (IRSTA, Intelligence, Reconnaissance, Surveillance and Target Acquisition), joka havaitsee, tunnistaa ja paikantaa maaleja, usein yli 100 km etäisyyksillä..
2. Asejärjestelmä, joka kykenee toimittamaan vaadittavan taistelukärjen hallitusti maali-alueella ja ohjaamaan sen maaliin. Asejärjestelmän keskeiset osat ovat ase itsessään sekä lavetti, jolla ase toimitetaan laukaisuetäisyydelle.
3. Järjestelmä, jolla arvioidaan käytettyjen aseiden tehoa nopeasti (BDA, Battle Damage Assessment). Järjestelmä voi olla osa kokonaisuuden IRSTA-kykyä tai oma, täysin tähän tarkoitukseen optimoitu järjestelmänsä.
4. Tietoliikennealusta, joka yhdistää em. osatekijät luotettavasti ja reaaliaikaisesti.



Kuva 267: Kokonaisuuden kannalta merkittävä asevaikutus saadaan aikaan usean eri järjestelmän saumattomalla yhteistoiminnalla.

Edellä kuvattujen elementtien lisäksi tarvitaan joustava johtamisjärjestelmä, joka kykenee prosessoimaan maalitiedot nopeasti, ja joka helpottaa johtajan päätöksentekoa, sekä omatunnistusjärjestelmä, jonka avulla vältetään vaikuttamasta omia kohteita vastaan ja maksimoidaan tulenavauksen nopeus. Viipeet tiedonkäsittelyssä ja tiedonsiirrossa ovat asevaikutuksen merkittävimmät ongelmat. Tilanteissa, joissa maalit liikkuvat, voi olla tarpeen hyödyntää automaattista tai puoliautomaattista sopivat hyökkäyssäännöt käsittävää informaatiovirtaa sensorilta aseelle.

Asejärjestelmät voidaan jakaa usealla eri tavalla, esimerkiksi lavetin tyyppin, järjestelmän käyttötarkoituksen, maalin tyyppin tai maalin paikantamis- ja seurantaperiaatteiden mukaan. Elektroniikan kannalta suoraviivaisin tapa on käyttää jakoperusteena ohjausmenetelmää, mihin tässä luvussa noudatettu jaottelu perustuu: Aluksi käydään läpi *ohjattavat aseet*, eli *komento-ohjatut järjestelmät*, joissa asetta ohjataan lavetilta tulevin komennoin ja sen jälkeen *itsenäisesti maaliin hakeutuvat järjestelmät*, joissa lavetin ei tarvitse ohjata asetta. Säteen-seuraajajärjestelmiä (*beam rider*) käsitellään komento-ohjattujen aseiden yhteydessä.

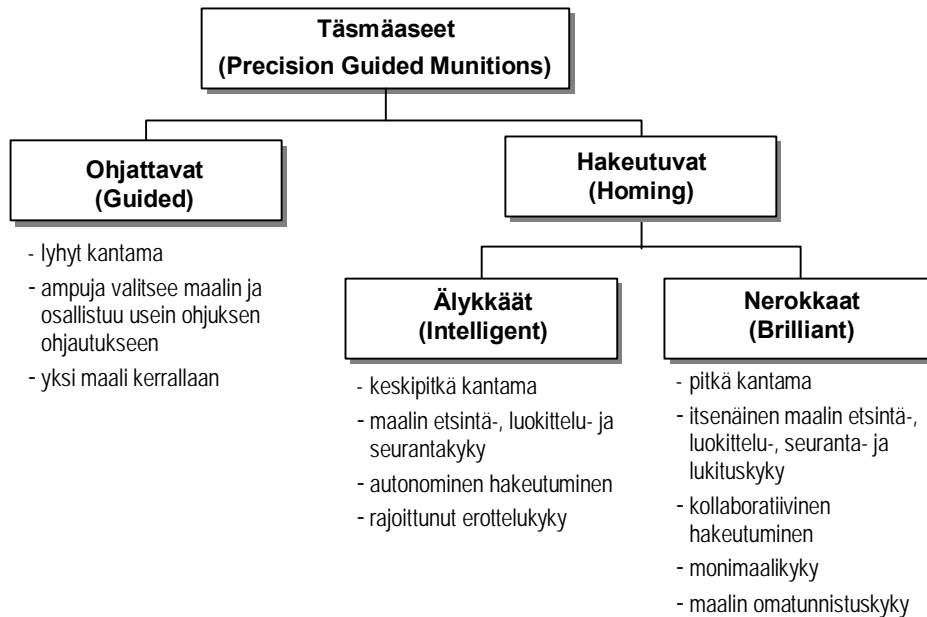
Lavetti	Käyttötarkoitus
- kannettava järjestelmä	- maasta maahan
- taistelujoneuvo	- ilmasta maahan (lentorynnäkö)
- helikopteri	- maasta ilmaan (ilmatorjunta)
- lentokone	- ilmasta ilmaan (ilmataistelu)
Maalin paikantaminen ja seuranta	Maali
- passiivinen (RF, IP, TV, UV)	- ajoneuvo
- aktiivinen (tutka tai laser)	- linnoite
	- lentokone tai helikopteri
Ohjausmenetelmä	- tutkajärjestelmä
1. komento-ohjaus	
- manuaalinen komento-ohjaus (MCLOS, Manual Command Line of Sight)	
- puoliautomaattinen komento-ohjaus (SACLOS, Semi-Automatic Command Line of Sight)	
- automaattinen komento-ohjaus (ACLOS, Automatic Command Line of Sight)	
2. sädeohjaus (beam rider)	
3. itsenäinen hakeutuminen	
- hakeutuminen ennalta annettuun pisteeseen navigoimalla	
- passiivinen: maalin synnyttämään säteilyyn (RF, mmW tutka, IP, TV, UV) hakeutuminen	
- puoliaktiivinen: Lavetin lähettämään ja maalista heijastuvaan säteilyyn (tutka, laser) hakeutuminen	
- aktiivinen: Aseen itsensä lähettämään ja maalista heijastuvaan säteilyyn (tutka) hakeutuminen	

Taulukko 19: Esimerkkejä ohjattavien ammusten ryhmittelystä lavetin, käyttötarkoituksen, seurantaperiaatteen ja ohjausmenetelmän mukaan.

Asejärjestelmien käsittely keskittyy järjestelmän spektrin hyödyntämiseen ja siten sen sensori- ja ohjauselektroniikkaan. Taistelulatauksia, moottoreita, ajonokkia tai aerodynamiikkaa ei käsitellä. Koska ohjuksissa käytettyjen sensori- ja tiedonsiirtojärjestelmien teoria, tekniikka ja toiminta on esitelty jo aiemmissa luvuissa, keskitytään tässä luvussa vaihtoehtoisten ratkaisujen esittelyyn sekä tutustutaan kustakin asetyypistä muutamiin valikoituihin esimerkkeihin. Kirjaan valitut esimerkit eivät luonnollisestikaan voi muodostaa kattavaa kokonaisuutta, vaan niiden tarkoituksena on pelkästään luoda kuva siitä, miten kulloinkin kuvattavaa tekniikkaa voidaan soveltaa todellisissa järjestelmissä.

Asejärjestelmien kehittymisen osalta on havaittavissa muun muassa seuraavanlaisia yleisiä kehityssuuntia:

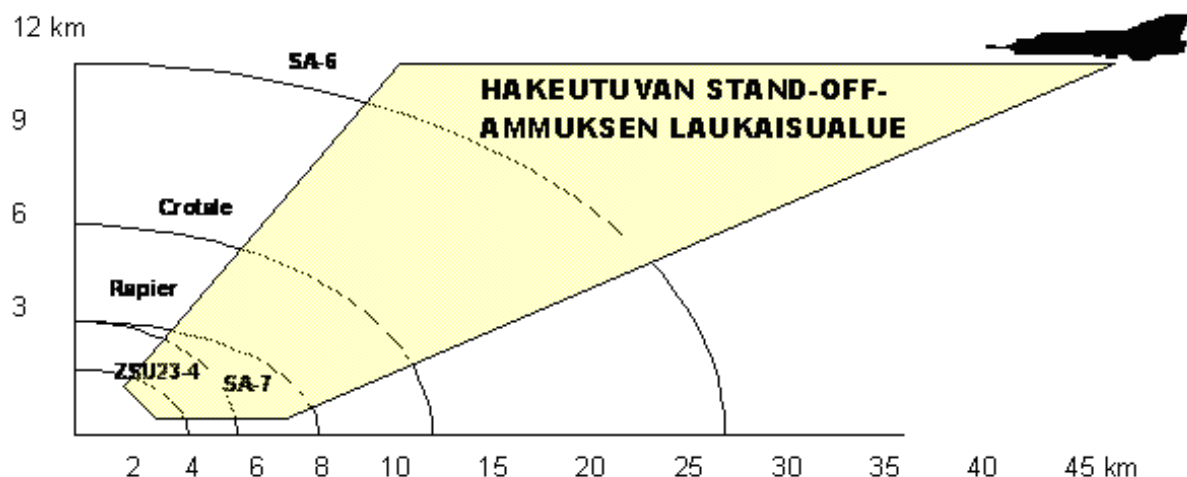
- Merkittävin muutos on siirtyminen ballistisista ”tyhmistä” ammuksista ja aseista täsmäaseisiin (PGM, Precision Guided Munitions) epäsuoran tulen järjestelmissä (tykistö, raketinheittimet, kranaatinheittimet) ja jossain määrin myös suora-ammunta-aseissa (esim. panssarivaunukanuunat). Täsmäaseet voidaan jakaa ulkopuolesta ohjattaviin (guided) ja itsenäisesti hakeutuviin (homing).
- Ilmasta ilmaan, ilmasta maahan ja maasta maahan ammuttavissa ohjuksissa³² pyritään ampumisen suorittamaan maalin torjuntaetäisyyden ulkopuolelta (stand-off range), jolloin ampuvaan lavettiin kohdistuva riski on pienempi. Maassa tämä tarkoittaa epäsuoran vaikuttamisen merkityksen kasvua.



Kuva 268: Täsmäaseet voidaan jakaa ohjattaviin ja autonomisesti hakeutuviin. Hakeutuvien aseiden ensimmäistä sukupolvea kutsutaan älykkääksi ja toista markkinointihenkisesti nerokkaaksi.

- Maalinseurantajärjestelmät sekä itsenäisesti hakeutuvien aseiden hakupäät pyritään varustamaan kaksoissensoreilla vaimaalien ja omasuojajärjestelmien heitteiden (tutkasilppu ja lämpösoihut) erottamiseksi maalista, häirinnän väistämiseksi sekä joka sään toimintakyvyn takaamiseksi. Samassa järjestelmässä voidaan käyttää esimerkiksi infrapuna- ja UV-sensoria tai infrapuna- ja tutkasensoria. Esimerkiksi amerikkalainen ilmatorjuntaohjus RIM-156A Standard Missile 2 Block IV sisältää sekä puoliaktiivisen tutkahakupään että passiivisen infrapunahakupään.

³² Tekstissä käytetään aseesta nimitystä ohjus, mikäli aseessa itsessään on työntömoottori ja ammus, mikäli aseeseen lento perustuu laukaisuvaiheessa saatuun kineettiseen energiaan, sekä pommi, jos energia on saatu lavetin liikkeestä.



Kuva 269: Stand-off-ase pyritään pudottamaan kohteen suojaetäisyyden ulkopuolelta. Liitävillä aseilla pidempi tulitusetäisyys edellyttää suurempaa lentokorkeutta.

- Järjestelmiin lisätään häirinnän ilmaisukyky ja sekä automaattinen häirintälähteeseen hakeutumistointo (home-on-jam). Tällaista käytetään esimerkiksi ranskalaisen Crotale-järjestelmän ohjuksissa sekä amerikkalaisissa AIM-120 AMRAAM-ohjuksessa. Itsenäinen häirintään hakeutuminen puolestaan on johtanut siihen, että lentokoneissa käytetään 100 - 150 m etäisyydellä perässä vedettäviä harhamaaleja (towed decoy), jolloin ohjuksen räjähtäminen harhamaalin läheisyydessä ei todennäköisesti vaurioita lentokonetta.
- Maalien tiedustelussa, paikantamisessa, valinnassa ja valaisussa käytetään kasvavassa määrin miehittämättömiä lavetteja. Tällainen ajoneuvo (UGV, Unmanned Ground Vehicle) tai lennokka (UAV, Unmanned Aerial Vehicle tai RPV, Remotely Piloted Vehicle) sisältää kauko-ohjauksessa ja tiedustelutoiminnasta tarvittavan matalavalotelevision (LLTV) ja kuvaavan lämpökameran (IIR) sekä etäisyydenmittaus- ja maalinosoituslaserin. Muita käytettävissä olevan kantavuuden puitteissa mahdollisesti



Kuva 270: Miehittämättömiä ajoneuvoja käytetään kasvavassa määrin myös maalinosoitukseen ja tulenjohtoon. Kuvassa Patrian Nemo-kranaatinheitinjärjestelmä ampuu minilennokin osoittamaan maaliin.
[Patria]

varustettavia järjestelmiä ovat tiedusteluvastaanotin ja interferometrisuuntimo, joiden tehtävänä on antaa karkea uhkasuunta pääsensoreina toimivien LLTV:n ja IIR:n suuntaamiseksi. Lennokkia käytetään sen rajallisen asekuorman vuoksi todennäköisesti lähinnä maalien etsimiseen ja tulenjohtoon, mutta miehittämättömät maa-ajoneuvot voidaan varustaa myös kauko-ohjatuin konekiväärein ja PST-ohjuksin.

- Aseiden maalinosoitus tulee muualta kuin ampuvalta lavetilta. Esimerkiksi ohjuksen ammunta paljastaa ampuvan lavetin, mikäli siitä on näköyhteys maaliin. Toisaalta maalin määrittely ja valaisu vaatii näköyhteysreitit. Mikäli yksi lavetti vastaa maalin määrittelystä ja toinen ampumisesta (ns. hunter – killer -ratkaisu), voidaan tulta johtavan lavetin paljastumista vaikeuttaa ja ampuva lavetti voi tulittaa kokonaan suojasta. Tämä edellyttää joko maalinsiirtotoimintoa (target handover) järjestelmien välillä tai ohjusten ampumista ilman lukittumista maaliin (lock-on after launch).

Tyyppi	Pääase	A-tarviketäyttö	Nopeus	Toimintamatka	Miehistö	Valmistusmaa
Lepoard 2KWS	120 mm	42	72 km/h	550 km	4	Saksa
Challenger 2	120 mm	52	56 km/h	400 km	4	Iso-Britannia
Leclerc	120 mm	40 x	71 km/h	550 km	3	Ranska
M1A2	120 mm	40	67 km/h	465 km **	4	USA
T-72B1	125 mm	45 *, x	60 km/h	700 km	3	Venäjä
T-80U	125 mm	36 *, x	70 km/h	300 km **	3	Venäjä
Merkava 3	120 mm	50	55 km/h	500 km	4	Israel

* Ampuu tarvittaessa laserohjattujen PST-ohjuksia.
x automaattilataus
** Moottorina kaasuturbiini, muissa V-12-diesel (Leclercissä V-8)

Taulukko 20: Nykyaikaisten panssarivaunujen suoritusarvoja.

- Helikopteri ja panssarivaunu tulevat olemaan ase- ja sensorijärjestelmien ensisijaiset lavettityypit – ja siten myös ensisijaiset maalityypit. Kummankin varustamisessa painopiste on tehokkaan ja integroidun sensori- ja asekokonaisuuden aikaansaamisessa. Tätä kokonaisuutta tuetaan integroidulla johtamis-, viesti-, omasuoja- ja omatunnistusjärjestelmillä. Helikopterin etuna panssarivaunuun verrattuna on sen hyvä operatiivinen ja taistelutekninen liikkuvuus, heikkouksina kallis hinta, lyhyt toiminta-aika ja pieni asekuorma ja säävaraus. Taulukossa 20 on esitetty yleisimpien panssarivaunujen teoreettisia suoritusarvoja ja taulukossa 21 taisteluhelikoptereiden suoritusarvoja.

Tyyppi	PST-ohjusjärjestelmä	Tähtäin	Lentoaika*	Risteilynopeus
AH-64D Longbow Apache	16 x Hellfire	tutka&lämpö	1 2 h	293 km/h
RAH-66 Comanche	10 x Hellfire	lämpö		290 km/h
AH-1W Supercobra	8 x TOW, 8 x Hellfire	lämpö	1 2 h	278 km/h
Mi-28 Havoc	16 x AT-6 Spiral	lämpö	1 2 h	270 km/h
Mi-24W Hind E	12 x AT-6 Spiral	lämpö	1 2 h	270 km/h
PAH-2 Tiger	8 x Trigat LR / HOT 2	lämpö	1 3 h	280 km/h

* ilman lisäpolttoainesäiliöitä, jotka pidentävät lentoaikaa, mutta pienentävät asekuormaa.

Taulukko 21: Esimerkkejä taisteluhelikoptereiden suorituskyvystä.

- Järjestelmien on kyettävä seuraamaan ja tulittamaan useita maaleja yhtäaikaaisesti. Havaittujen maalien seurannan ja taistelutilan valvonnan on oltava samanaikaista (TWS, Track While Scan).

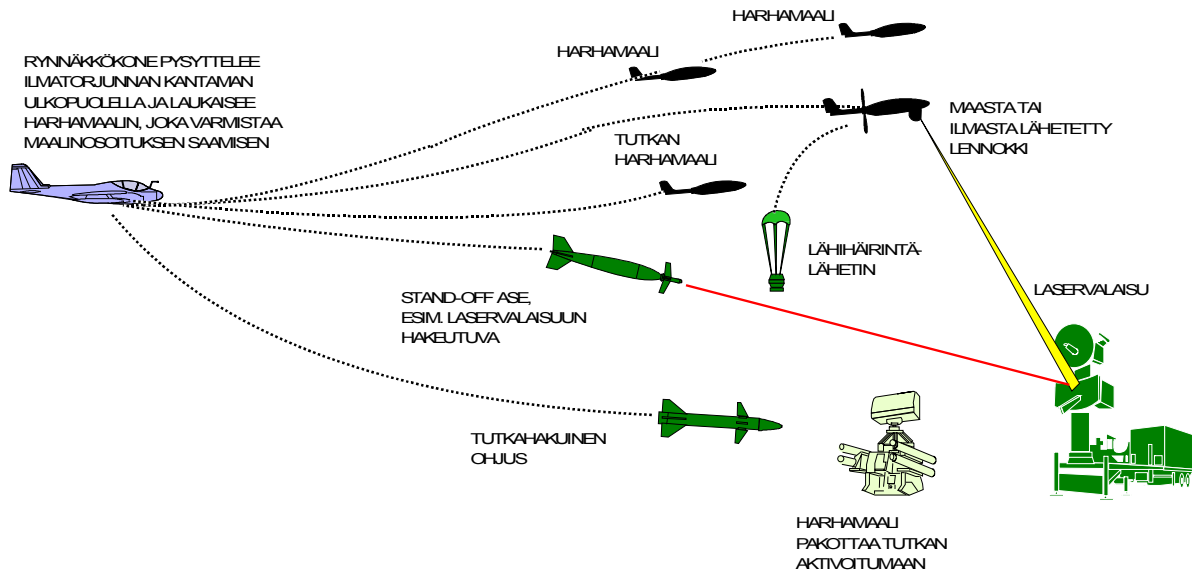
- Hakupäiden ja tiedonsiirtolinkkien kehittymisen myötä ohjuksen hakupään antamaa informaatiota voidaan käyttää hyväksi maalin seurannassa ja häirintätilanteen arvioimisessa (TVM, Track Via Missile).



Kuva 271: Vaikka sotatekniikan kehitys on vähentänyt taistelupanssarivaunun merkitystä ja vaikka verkostokeskeisen sodankäynnin arvellaan päättävän 50 vuotta jatkuneen raskaan panssarivaunun elinjakson, edustaa taistelupanssarivaunu vielä toistaiseksi taistelukentän tulivoimaisinta ja liikkuvinta komponenttia. [J. Kosola]

- Lavettien välillä on kyettävä välittämään maalitietoja ja tulikomentoja (target handover) optimaalisen laukaisulavetin valitsemiseksi, saturatiohyökkäysten torjumiseksi ja ammuskulutuksen tasaamiseksi.
- Ilmatorjunnan paljastamiseksi ja ohjusuhan väistämiseksi käytetään ilmasta laukaistavia aerodynaamisesti lentäviä harhamaaleja, joiden tehtävänä on houkuttaa vihollinen aktiivoimaan tutkansa ja ampumaan ohjuksiaan niihin.
- Ilmatorjunnan paljastamisessa, kyllästämisessä ja lamauttamisessa käytetään kasvavassa määrin lennokkeja. Tällainen lennokki voi toimia harhamaalin tavoin ja sisältää esimerkiksi häirintälähettimen tai lämpösensorin ja maalinvalaisujärjestelmän, mikä mahdollistaa tulen käytön ilmatorjunta-asemaa vastaan turvalliselta etäisyydeltä ja pakottaa vihollisen reagoimaan niihin.
- Kehitys kulkee kohti 'ammu ja unohda' -tyyppisiä ohjuksia, joiden kuvaava hakupää kykenee itse etsimään ja luokittelemaan maalit sekä hakeutumaan niitä kohti. Lisäksi ohjuksia pyritään käyttämään sekä panssarimaaleja että linnoitteita, henkilöstöä ja helikoptereita vastaan. Panssarimaalien tuhoamiseen käytetään top-attack-toimintoa³³ ja muut kohteet tuhotaan suoralla osumalla.

³³ Top-attack -ohjus lentää noin metrin verran tähtäysviivan yläpuolella ja maalin ylittäessään sen laseriin ja magneettiseen herätteeseen perustuva herätesytytin laukaisee alaspäin suunnatun ontelopanoksen panssarivaunun kansipanssariin, joka on vaunun heikoin kohta.



Kuva 272: Lennokkien ja harhamaalien käytöllä voidaan pakottaa vihollinen kuluttamaan ohjuksiaan toisarvoisiin maaleihin. Lennokilla voidaan lisäksi häiritä ilmatorjunnan valvonta ja seurantatutkia hyvin läheltä. Lennokkia voidaan käyttää myös maalin tiedusteluun ja valintaan sekä laservalaisuun.

- Mikroaalto- ja sensoritekniikan kehittymisen myötä älykkäiden aseiden hinta laskee. Hintaa pyritään pienentämään myös siirtämällä osa ohjuksen elektroniikasta aselavetille. Samalla voidaan toteuttaa keveämpiä, pienempiä ja nopeampia ohjuksia. Komento-ohjaus laser- tai valokuitulinkin välityksellä on esimerkkinä tällaisesta kehityssuunnasta. Tämä kehityssuuntaus on osin päinvastainen 'ammu ja unohda' -suuntaukselle. Onkin odotettavissa, että asejärjestelmien kehitys kulkee toisaalta kohti älykkäitä itsenäisesti toimivia aseita, joita käytetään valikoiden merkittäviä maaleja vastaan ja toisaalta kohti halvempia komento-ohjattuja järjestelmiä, joita voidaan käyttää massamaisesti.
- Omasuojajärjestelmien läpäisemiseksi ohjusten lähtösignaalia (lähinnä infrapuna-alueella) pienennetään ja nopeutta lisätään. Vastatoimenpiteiden välttämiseksi asetta ohjaava sensori sijoitetaan eri paikkaan kuin ohjuksen laukaiseva lavetti.
- Valokuitu syrjäyttää metallijohtimen ja radiolinkin maasta maahan sekä ilmasta maahan tarkoitettujen ohjusten ohjausmediana. Valokuitulinkillä voidaan toteuttaa suurikapasiteettisia pitkiä yhteyksiä, joilla voidaan siirtää ohjuksen hakupään antama informaatio ampuvalle lavetille sekä ohjauskomentoja lavetilta aseelle. Lämpösensori kykenee tyypillisesti havaitsemaan maalin maksimissaan 5 km etäisyydeltä, joten ohjuksen laukaisijalla on hyvin aikaa valita maali sekä ohjuksen lähestyessä valittua maalia tarkentaa hakeutumispiste sopivaksi. Näin voidaan sekä tehostaa asejärjestelmän toimintaa, että siirtää osa kertakäyttöisen aseiden älykkyydestä monikäyttöiseen maajärjestelmään. Tämä vähentää älykkään aseiden valmistuskustannuksia. Kuidun purkamismenetelmät sekä kuiturakenteet ovat kehittyneet siinä määrin, että yli 60 - 100 km kantama olisi mahdollista saavuttaa jo nykyisin. Jopa 100 - 200 km kantaman toteuttamismahdollisuuksia tutkitaan. Valokuitulinkkiä hyödyntävästä aseesta esimerkkinä on syvällä vihollisen selustassa panssarintorjuntaan tarkoitettu amerikkalainen **FOGM** (Fiber-Optic Guided Missile) jonka lämpösensorin muodostama kuva välitetään valokuitua pitkin ampuvalle lavetille. Ampuja voi siten valikoida maalin ohjuksen lentäessä maalialueen yllä ja myös varmistua todennäköisestä tuho vaikutuksesta. Ohjus lentää sisäisen inertianavigoinnin ja GPS-paikantimen

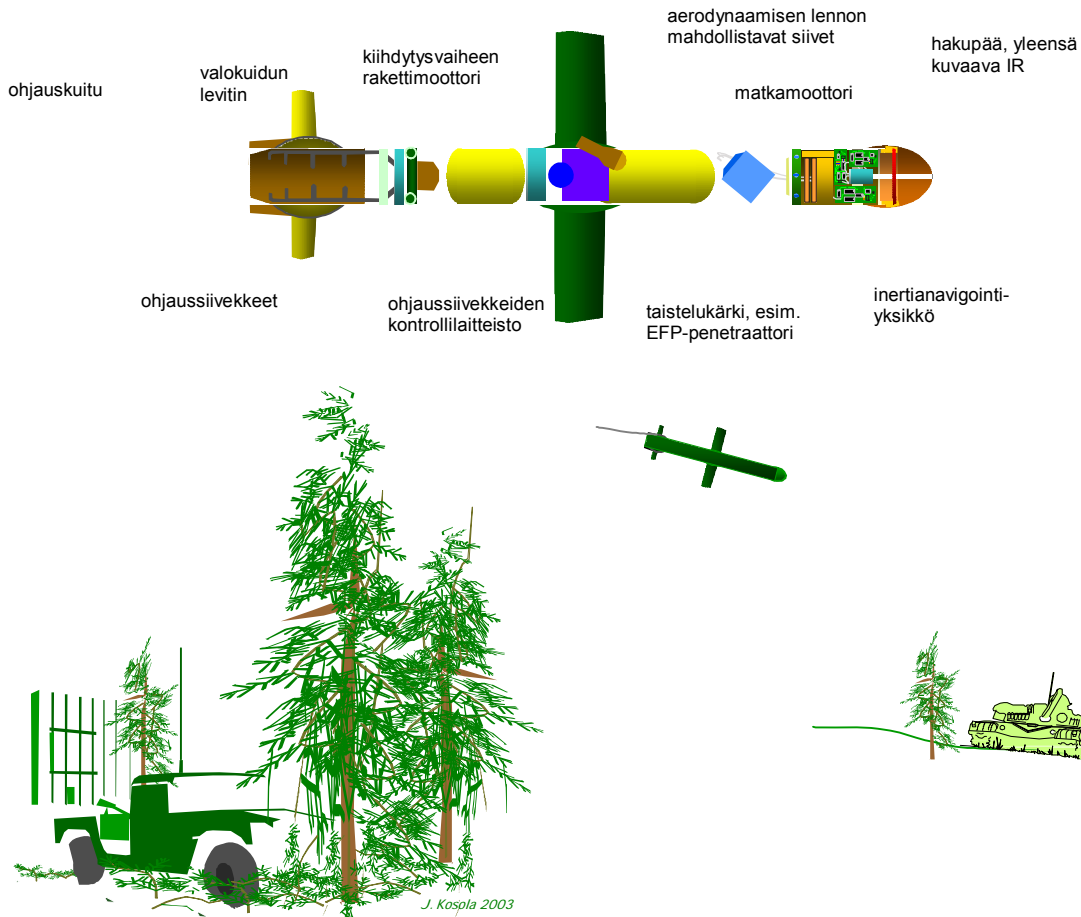
avulla alkumatkan sille osoitetulle maalialueelle. Matkan aikana ohjuksen sensori kykenee etsimään itsenäisesti maaleja, joten kuitua ei käytetä varsinaisesti ohjaukseen. Operaattori voi tosin myös itse valita maaleja sekä varmentaa sensorin tekemän valinnan. Lisäksi on muistettava se, että valokuituohjaus ei ole altis häirinnälle. Lämpöhakeutuvien aseiden yhteydessä on esitetty lisää esimerkkejä valokuitulinkin sisältävistä aseista.



Kuva 273: Valokuituohjattu PolypheM-ohjus. 140 kg painavan ohjuksen kantama on 60 km. Ohjus lentää 120 - 220 m/s nopeudella ja 20-400 m korkeudella inertia- ja GPS-paikantimen avulla haluttuun maalipisteeseen. Vakautetussa hakupäässä on kuvaava PtSi-matriisi-ilmaisin, joka havaitsee maalin 8 km etäisyydeltä. Maalintunnistus 1,5 km etäisyydeltä antaa operaattorille 10 s aikaa valita ja vahvistaa maali. [J. Kosola]

- Elektroniikkaa ryhdytään hyödyntämään myös suora-ammuntaan tarkoitetuissa tykkijärjestelmissä, erityisesti helikopterimaaleja vastaan tarkoitetuissa ammuksissa. Tällaisista esimerkkinä on saksalainen Rheinmetallin lämpöhakeutuva **EPHAG** (Endphasengelenktes Hubschraubeabwehrgeschoss) ja RGM-120 (Rh-Beamrider-Geschoss). RGM-120 ammutaan 120 mm panssarivaununauunalla, minkä jälkeen se hakeutuu puoliaktiivisesti maalista heijastuvaan panssarivaunun lähettämään lasersäteilyyn. Amerikkalaisessa 120 mm CAT/FCS-ammuksessa maalia seurataan panssarivaunun lämpökameralla, valaistaan tulenjohtolaserilla ja korjauskomennot välitetään mikroaaltolinkillä. Ammuksen ohjaus perustuu impulssiohjaukseen³⁴.

³⁴ Impulssiohjauksessa ei käytetä siivekkeitä, vaan ammusta tai ohjusta ohjataan suunnatun räjähdysvaikutuksen avulla. Ammuksen sivulla laukaistu räjähdyspanos kohdistaa ammuksen sivuttaisen voiman, joka kääntää ammuksen lentorataa. Impulssiohjauksella voidaan toteuttaa hyvin nopeita ohjausliikkeitä.



Kuva 274: Valokuituohjus voidaan laukaista suojasta, jolloin maali ei saa siitä varoitusta muutoin kuin aktiivisella tutkalla. Laukaisun jälkeen ohjus lentää tyypillisesti noin 500 metrin korkeudessa, jotta ohjuksen perästä purkautuva kuitu ei osuisi maahan ennen ohjuksen osumista maaliin. Lähestyessään maalialuetta ohjus pudottautuu matalammalle saadakseen paremman kuvan maalialueesta.

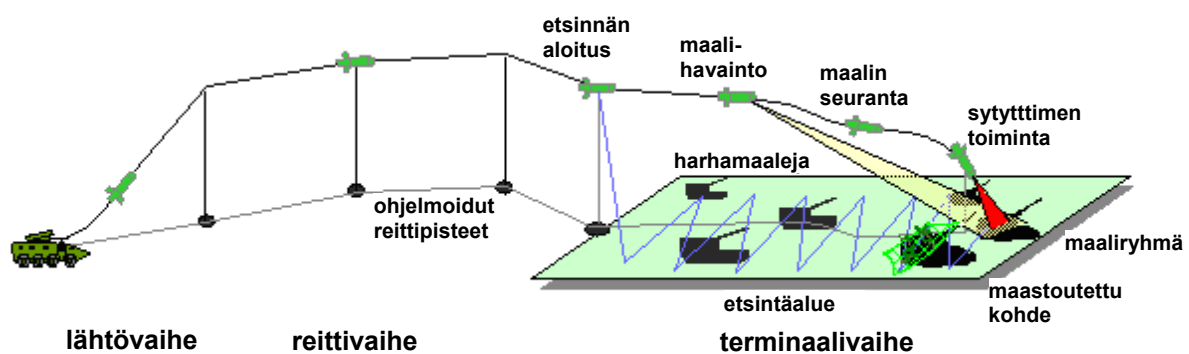
- Informaatioidankäynnin tarpeisiin kehitetään uusia hyötykuormia, joiden maalina on yhteiskunnan infrastruktuuri. Tällaisille aseille on tyypillistä vaikutuksen tilapäisyys (lamauttava tuhoavan sijaan) ja oheisvahinkojen, erityisesti ihmisuhrien, välttäminen. Yksi esimerkki tällaisista aseista on sähköverkon tilapäisesti lamauttava hiilikuitupommi, josta Suomessa käytetään virheellisesti nimitystä grafiittipommi. Amerikkalaiset käyttivät F-117-häivekoneesta pudotettavia CBU-102 rypälepommeja jo Persianlahdella ja myöhemmin Serbiassa. Pommin hiilikuiturihmat tarttuvat kytkinkenttään ja aiheuttavat oikosulkuja. Tuulen mukana leviävien rihmojen puhdistaminen kestää varsin pitkän aikaa, mutta pysyviä vaurioita sähköjako- ja verkkoille ei synny.

Edellä mainitut kehityssuunnat voidaan yhdistää näkemykseksi, jonka mukaan asejärjestelmien tehoa voidaan lisätä merkittävästi ja kustannustehokkaasti vain elektroniikalla. Asejärjestelmien älykkyys ja hinta kasvavat, mutta toisaalta entistä pienemmällä asemäärällä saadaan aikaan entistä suurempi tuhoamisvaikutus. Aseiden väheneminen johtaa tarvittavien lavettien ja niitä käyttävien joukkojen määrän vähenemiseen. Tämä lisää joukon liikkuvuutta ja vähentää konventionaalisista aseista johtuvia tappioita. Pieni joukko on helpommin suojattavissa ja sen liikkeen edistäminen on helpompaa, mikä johtaa tukevien järjestelmien määrälliseen pienemiseen. Lisäksi pienen joukon huoltotarve on pienempi kuin ison.

Seuraavassa esitellään käytettäviä ohjaus- ja hakeutumismenetelmiä. Sopivimman menetelmän valinta riippuu luonnollisesti aseenn käyttötarkoituksesta.

OHJUksen LENNON VAIHEET

Aseenn tyypistä riippuen, sen lento voidaan jakaa eri vaiheisiin. Laukaisuvaiheessa (launch phase) käynnistetään aseenn elektronikka, ohjelmoidaan aseenn reitti ja maali sen tietokoneelle. Laukaisuvaiheessa ase saatetaan turvallisesti irti laukaisulavetista. Ase voidaan pudottaa lentokoneenn ripustimesta tai se voidaan saattaa kiihdytysmoottorilla irti lavetista (boost phase) aerodynaamiseen lentoon ja ohjaukseen riittävän nopeuden saavuttamiseksi. Reittivaiheessa (midcourse phase) ase lentää lavetin komentojen ohjaamana tai aseeseen ohjelmoitua reittiä pitkin mahdollisimman lähelle maalin arvioitua sijaintipistettä. Lavetti voi usein päivittää reittivaiheen pisteitä.



Kuva 275: Esimerkki aseenn lennon vaiheista laukaisusta loppuhakeutumiseen.

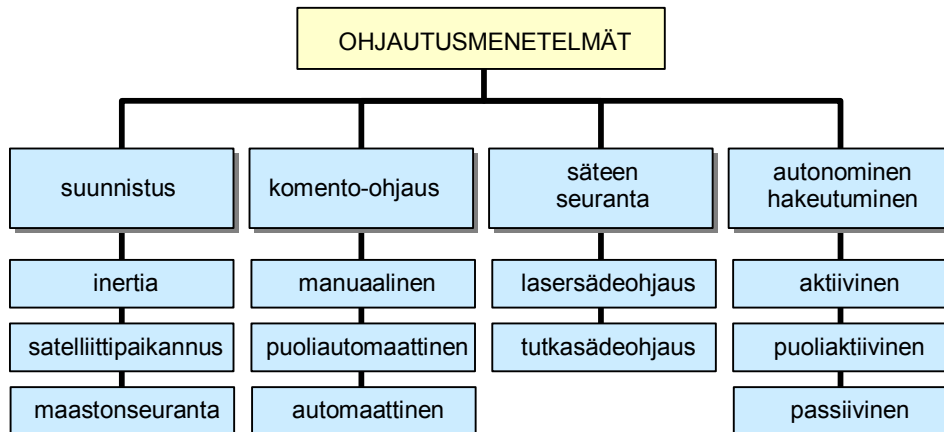
Terminaalivaihe (terminal phase) käynnistyy aseenn saapuessa herättesytyttimen toimintaetäisyydelle maalista. Vaiheen tehtävänä on saattaa ase maaliin tai niin lähelle sitä, että aseenn taistelulataus kykenee riittävällä todennäköisyydellä tuhoamaan maalin. Terminaalivaiheen ohjautusmenetelmä voi vaihtua reittivaiheen menetelmästä – esimerkiksi reittivaiheessa voidaan käyttää komento-ohjausta tai tutkasäteilyyn hakeutumista ja loppuvaiheessa lämpölähteeseen hakeutumista.

OHJAUTUSMENETELMÄT

Ohjautuksen tehtävänä on joko saattaa laukaistu ase osuaan maaliinsa tai aseenn sytyttimen ja taistelulatauksen toimintaetäisyydelle antamalla aseelle ohjauskomentoja. Ohjausmekanismi voi perustua aerodynaamikkaan siivekkeiden ja muiden lentopintojen asennon muuttamisella, työntövektorin muuttamiseen raketti- tai suihkumoottorin virtaussuuntaa muuttamalla tai impulssiohjaukseen, jossa aseenn suuntaa muutetaan pienten räjähdepanosten aikaan saamalla liikemomentilla.

Ohjautusmekanismit voidaan jakaa neljään pääluokkaan: suunnistukseen, komento-ohjaukseen, säteenseurantaan ja autonomiseen hakeutumiseen. Suunnistuksessa aseeseen ohjelmoitetaan sen lentoreitti ja ase saatetaan haluttua reittiä pitkin ohjelmoituun maalipisteeseen. Inertiapaikannusta hyödyntävä ase voi toimia täysin ilman ulkopuolista signaalia, mutta inertiapaikannuksen virhe kasvaa ajan myötä. Sen vuoksi inertiapaikannusta täydennetään

usein joko maastonseuranta- tai satelliittipaikannusjärjestelmällä. Suunnistusjärjestelmät eivät edellytä näköyhteyttä maaliin tai aseeseen, minkä vuoksi niitä käytetään yleensä reittivaiheen aikana, mutta niiden tarkkuus ei tyypillisesti riitä terminaalivaiheen ohjautukseen. Komento-ohjatussa aseessa aseiden ohjautuskomennot tulevat laukaisevalta lavetilta. Lavetti seuraa sekä maalia että asetta ja ohjaus perustuu yleensä aseiden ohjaamiseen näköyhteyksreittiä pitkin suoraan maaliin tai valittuun ennakkopisteeseen. Elektroniikan kehittyessä manuaaliset ohjautusmekanismit ovat kehittyneet automaattisiksi.



Kuva 276: Ohjautusmenetelmät voidaan jakaa neljään pääluokkaan: suunnistamiseen, komento-ohjaukseen, säteenseurantaan ja aseiden itsensä suorittamaan hakeutumiseen.

Säteenseurantajärjestelmissä ampuva lavetti lähettää laser- tai tutkasäteestä muodostuvan kujan, jota ohjus seuraa ja jonka keskipisteeseen se hakeutuu. Toisin kuin komento-ohjatuissa järjestelmissä, joissa ampuva lavetti seuraa sekä maalia että asetta ja välittää korjauskomennot aseelle, säteenseurajajärjestelmässä lavetti seuraa vain maalia ja ase päättää itsenäisesti oman sijaintinsa sädekujassa ja laskee korjauskomennot sen perusteella.

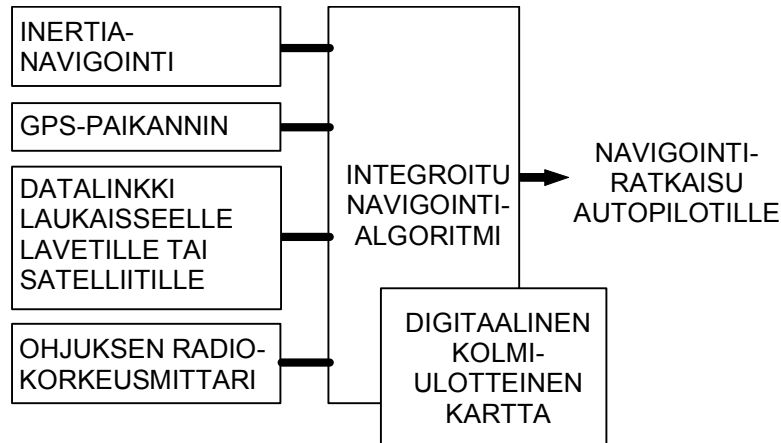
Autonomisesti hakeutuviissa aseissa ase havaitsee itse maalin – tai lavetti osoittaa sen sille laukaisuvaiheessa – jonka jälkeen se hakeutuu maalista tulevaan herätteeseen. Sen mukaan onko tämä heräte syntynyt aseiden hakupäässä, ampuvassa lavetissa tai maalissa nämä asetet jaotellaan edelleen aktiivisiin, puoliaktiivisiin ja passiivisiin.

SUUNNISTAVAT ASEET

Navigointijärjestelmiä käytetään esimerkiksi risteilyohjuksissa sekä keskipitkän ja pitkän kantaman maa- ja ilmamaaliohjuksissa. Navigoiva ase hakeutuu ennalta annettuun maaliin sisäisen inertiaipaikantimen, maastonseurantatutkan (TERCOM, TERRain CONtour Matching, tai TERNAV TERRain NAVigation) tai satelliittipaikantimen avulla. Inertialaitteiden antama suunta- ja paikkatieto riittää yleensä vain summittaiseen hakeutumiseen maali-alueelle ja lopullinen hakeutuminen maaliin tapahtuu jostain muuta menetelmää käyttäen. GPS:n antama suunta- ja paikkatieto käytetään yleensä vain keinona päästä maalialueelle³⁵. Tämän vuoksi ohjuksen tietokoneelle on ennen laukaisua ohjelmoitava maalin lopullisen valintaa lennon terminaalivaiheessa tarvittavat tiedot. Ohjus voidaan esimerkiksi ohjata

³⁵ Pelkkä satelliittipaikannus on yleensä liian epätarkka ja epävarma, esimerkiksi Persianlahden sodassa vain puolet GPS-ohjatuista AGM-154A (Joint Standoff Weapon) osui maaliinsa. [Journal of Electronic Defence March 2001: Raids on Iraq Uneath Questions]

tiedustelusatelliitin tai -lentokoneen ottaman kuvan johonkin yksityiskohtaan, kuten kahden ääriviivan - vaikkapa sillan kannen ja kannatinpilarin - leikkauspisteeseen. Nämä tiedot voidaan ainakin periaatteessa syöttää myös satelliitin kautta ohjuksen lennon aikana, mikä mahdollistaa maalipisteen muuttamisen myös ohjuksen laukaisun jälkeen.

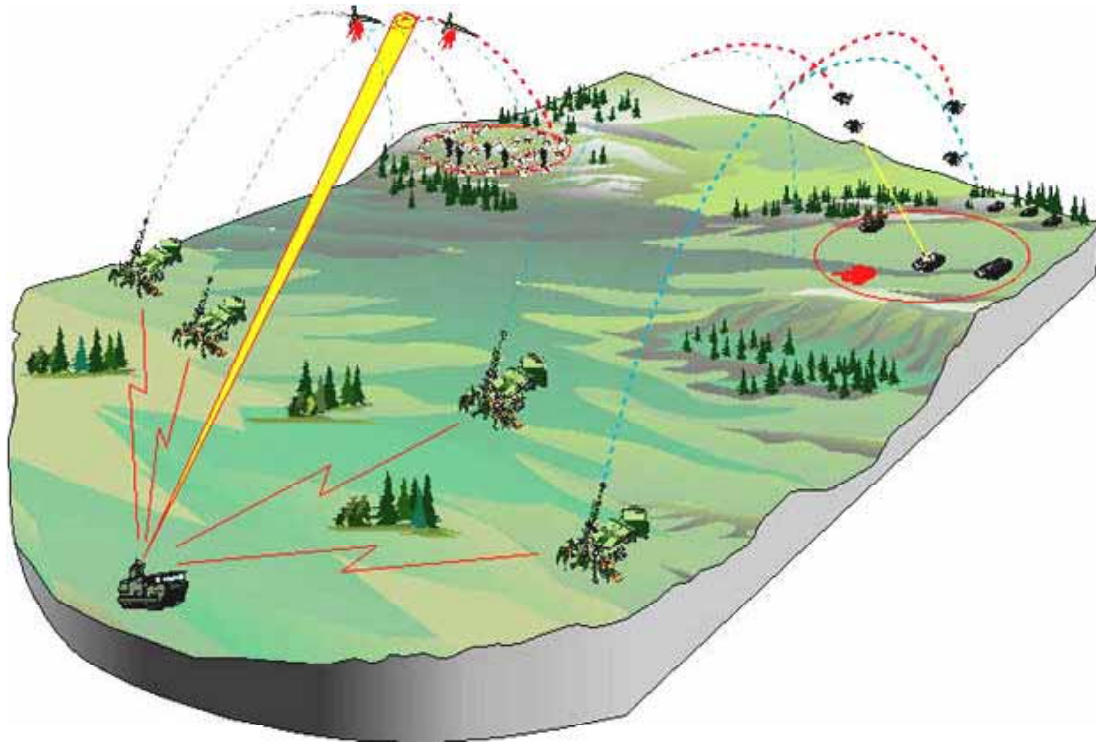


Kuva 277: Esimerkki navigoivan asean navigointijärjestelmän lohkokaaviosta. Datalinkkiä voidaan käyttää sekä sensori- ja navigointitiedon välittämiseen laukaisseelle lavetille tai satelliitin kautta komentokeskukseen että ohjuksen maalipisteen muuttamiseen.

Risteilyohjukset käyttävät inertianavigointia, maastonseurantatutkaa ja/tai satelliittipaikannusjärjestelmää etsiytyäkseen maalialueelle. Saavutettuaan maalialueen ohjus voi käyttää millimetriaaltotutkaa, TV-sensoria tai kuvaavaa lämpösensoria (IIR, Imaging InfraRed) loppuhakeutumiseensa, mikäli asekuorman tyyppi edellyttää tarkkaa osumista maaliin. Taistelukentällä konventionaalinen asekuorma voi sisältää useita miinoja ja/tai henkilö- ja pst-siroitteita. Esimerkiksi **AGM-109 Tomahawk** ohjuksen asekuorma on 400-500 kg. Ohjus lentää hieman alle äänen nopeudella (885 km/h) ja sen kantomatka on noin 400-500 km. Risteilyohjuksen normaali lentokorkeus on noin 1500 – 3000 metriä, mutta uhka-alueella ohjus pudottautuu 20 – 100 metrin korkeuteen, mistä sitä on vaikea havaita. Vaikka ohjuksen tarkkuuden väitetään olevan kymmenen metrin luokkaa, risteilyohjusten käyttäminen taktisia maaleja vastaan on hyvin epätodennäköistä niiden korkean hinnan ja hitaan käytettävyyden (maalin paikantamisesta tulivaikutukseen kuluvan ajan) vuoksi.

Kenttätykistön tulelle on tyypillistä poikittaishajontaan nähden suuri pituushajonta, minkä vuoksi tykistön tulen peittoalueeksi muodostuu ampumasuuntaan nähden pitkä soikio. Tämän erityisesti pitkällä kantamalla tulen tarkkuutta heikentävän seikan vähentämiseksi on suunniteltu käytettävän GPS-järjestelmää (**GAM**, GPS Aided Munition³⁶). GAM-ammus kykenee itse määrittämään lentoratansa ja tarvittaessa jarruttamalla lentoa se kykenee vaikuttamaan osuispisteeseensä. Lentorataansa korjaavan ammuksen osumatarkkuuden väitetään nousevan yli kymmenkertaiseksi konventionaaliseen ammuksen verrattuna.

³⁶ Ranskalainen GIAT käyttää 155 mm maaliin hakeutuvasta ammuksestaan nimitystä GAM (Guided Artillery Munition, joten GAM-nimityksen käyttö saattaa aiheuttaa sekaannusta.



Kuva 278: TCM-ammusta voidaan ohjata tutkalla ja satelliittipaikannuksella. [Bofors]

Esimerkkinä lentorataansa vapaasti korjaamaan kykenevästä kranaatista mainittakoon ruotsalais-yhdysvaltalaisena yhteisprojektina kehiteltävä Boforsin 155 mm TCM (Trajectory Correctable Munition), joka perustuu BROMSA-sytyttimeen. Sytyttimen GPS-vastaanotin mittaa ammuksen lentorataa sekä antaa korjauskomentoja inertianavigointiyksikölle. Järjestelmään kuuluvalla tutkalla voidaan sekä seurata ammusten lentoa, että lähettää korjauskomentoja ammuksille. Ohjaussiivikkeiden avulla kranaatti voi myös nostaa lentorataansa. 52-kaliiperin putkella ammuttuna kantama on perävirtausyksiköllä yli 60 km CEP:n ollessa alle 20 m (jos satelliittipaikanninta häiritään ja järjestelmä käyttää tutkaa, CEP on alle 60 m).

Toinen mahdollisuus pienentää pituushajontaa paikannusjärjestelmän sijasta on se, että ammus mittaa lähtönopeutensa ja säätää jarrusiivikkeitä sen mukaisesti. Menetelmä ei ole yhtä tarkka kuin satelliittipaikannukseen pohjautuva, mutta sen etuna on riippumattomuus muista järjestelmistä. Kolmas mahdollisuus lisätä tykistön tulen tarkkuutta on varustaa ensimmäiseksi ammuttava laukaus inertia- ja GPS-paikantimen lisäksi radiolähettimellä ja käyttää sen antamaa tietoa ballististen korjausten tekemiseen, jolloin tarvittavat korjaukset kyetään tekemään jo ennen ensimmäisten räjähdelaukausten ampumista tai aikaa vievien tarkistusammuntojen suorittamista. Ammus tuhoetaan ilmassa ennen kohdealuetta, jottei se varoittaisi vihollista odotettavissa olevasta tuli-iskusta.

KOMENTO-OHJAUS

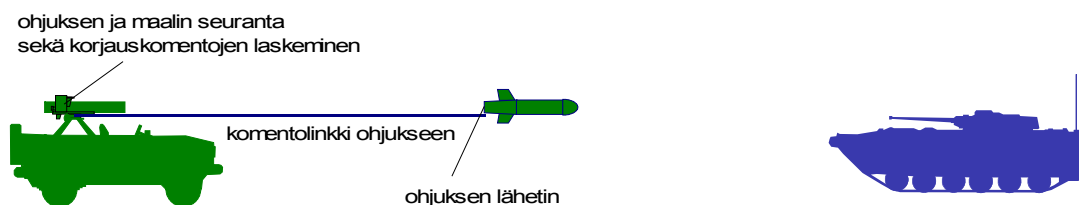
Komento-ohjatuissa järjestelmissä aseiden lentoa maaliin ohjataan ampuvalta lavetilta tulevilla elektronisilla komennoilla. Ensimmäiset komento-ohjatut asejärjestelmät perustuivat manuaaliseen toimintaan (MCLOS, Manual Command to Line Of Sight), jossa ampuja ohjasi suoraan ohjuksen lentoa tarkkailemalla maalin lisäksi ohjuksen lentoreittiä ja tekemällä siihen

korjauksia. Tällaisen aseiden ohjaaminen edellytti erittäin hyvää koulutustasoa ja hyviä olosuhteita.

Elektroniikan kehittyessä manuaalinen toiminta kyettiin automatisoimaan. Ensimmäisessä vaiheessa automatisoitiin ohjuksen lennon ohjaaminen maalin seurannan jäädessä ampujan vastuulle. Tällaisesta järjestelmästä käytetään yleisesti nimitystä SACLOS (Semi-Automatic Command to Line of Sight). Siinä ampuja seuraa maalia kaukoputken, tutkan, valovahvistimen tai lämpötähtäimen läpi ja pyrkii pitämään tähtäimen hiusristikon maalissa. Ohjuksen peräosassa on lähetin, joka välittää ampujan tähtäimelle tietoa ohjuksen paikasta. Tähtäimen tietokone laskee tähtäyspisteen ja ohjuksen sijainnin erotuksen perusteella korjauskomennot ja välittää ne ohjukselle. Ohjuksen lähetin on vanhoissa järjestelmissä yksinkertainen ihmisilmälle näkyvä soihtu ja uusissa järjestelmissä pulssinpaikkamodulaatiolla (PIM, Pulse Interval Modulation) koodattuja infrapunasäteilypulsseja lähettävä laser. Valesatunnaisen PIM-koodin tavoitteena on erottaa maalia mahdollisesti suojaavan häirintälähtetimen lähettämien pulssit ohjuksen lähettämistä pulsseista. Se mahdollistaa lisäksi usean ohjuksen samanaikaisen ampumisen ja seuraamisen.

Automaattinen maalinseuranta ja ohjaus (ACLOS, Automatic Command to Line of Sight) tarkoittaa järjestelmää, jossa lavetilla oleva sensori kykenee seuraamaan maalia automaattisesti ja ohjaamaan asetta itsenäisesti. Tällaisessa järjestelmässä operaattorin tehtäväksi jää maalin valinta sensorin tekemän uhka-analyysin ja tulitusehdotuksen perusteella, tulituspäättöksen vahvistaminen sekä tarvittaessa tähtäyskeskipisteen siirtäminen parempaan paikkaan.

Komennot ohjukselle välitetään mikroaaltolinkillä tai kuparikaapelilla ja uusimmissa järjestelmissä valokaapelia pitkin. Mikäli maalin seurannassa käytetään passiivista sensoria – kuten lämpökameraa tai matalavalotelevisiota – ja ohjuksen ohjaamisessa kupari- tai valokuitujohdinta, voi maali saada ennakkovaroituksen vain ohjuksen laukaisun tai kiihdytysvaiheen havaitsevalta ohjusvaroittimelta tai omalta aktiiviselta sensoriltaan.



Kuva 279: Komento-ohjatussa järjestelmässä ampuva lavetti seuraa sekä maalia että ohjuksen lentoa ja laskee korkeuskomennot ohjukselle. Komennot välitetään kupari- tai valokaapelilla tai mikroaaltolinkillä ohjukselle.

Esimerkkejä komento-ohjatuista aseista ovat:

- Ranskalaisessa **Crotale NG** -ilmatorjuntaohjusjärjestelmä, jossa käytetään ACLOS-ohjausta. Aselavetin tähtäinjärjestelmä seuraa automaattisesti sekä maalia että ohjusta. Sensoreina käytetään lämpökameraa ja tutkaa. Kulloinkin käytettävän sensorin valinta tehdään signaalikohinasuhteen perusteella, jolloin voidaan käyttää olosuhteisiin nähden optimaalista sensoria. Komennot ohjukselle välitetään mikroaaltolinkillä.



Kuva 280: Ranskalainen Crotale-ilmatorjuntaohjusjärjestelmä asennettuna suomalaiseen Patrian panssariajoneuvoon. [SA-kuva]

- Matra BAE Dynamicsin **Rapier 2000**, joka käyttää passiivista lämpökameraa tai tutkaa maalin seurantaan. Ohjus perustuu SACLOS-ohjaukseen. Operaattori seuraa maalia joko passiivisella infrapunasensorilla tai tutkalla. Järjestelmä ohjaa ohjuksen automaattisesti operaattorin osoittamaan maaliin mikroaaltokomentolinkillä.
- Amerikkalainen panssarintorjuntaohjus **BGM-71 TOW** (Tube-launched, Optically tracked, Wire-guided), jota käytetään myös Suomessa. Ohjuksen nopeus on noin 1000 km/h ja kantama noin 500-3750 m. Tähtäimen ja ohjuksen välinen komentolinkki perustui alunperin kupariseen parikaapeliin, mutta on uudemmissa versioissa korvattu valokuitu- tai radiolinkillä. Uusin TOW F&F (Tube-launched, Optically "Engaged", WireLESS Fire & Forget) -versio mahdollistaa sekä komento-ohjatun että autonomisen laukaisun



Kuva 281: vasemmalla TOW F&F-ohjus [Raytheon] ja oikealla BILL-ohjus. [Bofors]

- Ruotsalainen BILL (Bofors Infantry Light and Lethal) on johdinohjattu SACLOS-ohjus. BILL on ns. top-attack-ohjus, joka lentää 1,05 metriä tähtäysviivan yläpuolella kun se ammutaan panssarimaaleja vastaan. Tällöin sytyttimenä käytetään magneettiseen herätteeseen ja laseretäisyysmittariin perustuvaa herättesytytintä. Kun ohjus ammutaan bunk-

kereita, helikoptereita yms. kohteita vastaan, se voidaan komentaa lentämään tähtäysviivalla. Tällöin käytetään iskusytytintä. Ohjusta voidaan käyttää 150 – 2 200 metrin päässä olevia liikkuvia ja staattisia maaleja vastaan. Ohjuksen lentoaika 2 200 metriin on noin 13 sekuntia. Ohjuksen perässä on koodattuja pulsseja lähettävä laserlähetin, jota ampumalavetin tähtäin seuraa.

SÄTEENSEURANTA

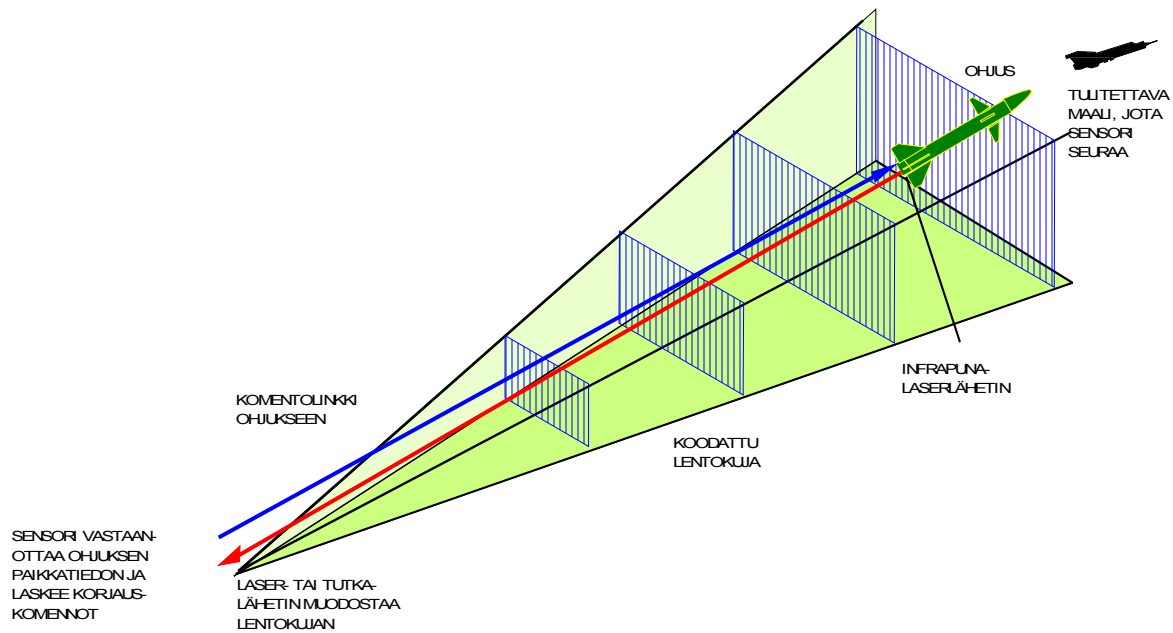
Komento-ohjattujen järjestelmien ohjusta ja sen lentoa on vaikea häiritä elektronisesti, sillä ohjuksen paikkatietolähetin käyttää koodattua lähetystä, jonka toistaminen harhautusmielessä on mahdotonta. Jos sensorilta ohjukselle välitettävät komennot kulkevat kaapelissa, on komentolinkin häirintä mahdotonta. Myös radiolinkin häirintä on hyvin hankalaa, sillä ohjuksen vastaanotinantenni sijaitsee takaosassa ja on suunnattu kohti tähtäintä – siis pois päin maalissa mahdollisesti olevasta häirintäjärjestelmästä. Tämän vuoksi seurantasensorin (tutka tai optroninen) harhautus ja häirintä on tyypillisesti helpompaa kuin ohjuksen komentolinkin.

Mikäli tähtäinjärjestelmä lähettää ohjukselle paikkatietoja tutka- tai lasersignaalilla ³⁷, ohjus kykenee laskemaan koodatun signaalikujan perusteella sijaintinsa suhteessa tähän kujaan ja tekemään itse tarvittavat korjaukset lentoreittiinsä. Tällaisesta järjestelmästä käytetään nimitystä säteenseuraja (beam rider). Olennaisin ero komento-ohjatun ja beam rider -ohjuksen välillä on se, että ensin mainitussa ohjuksen lentoa ohjaava tietokone on tähtäinjärjestelmässä ja jälkimmäisessä ohjuksessa.

Brittiläinen Shorts **Starstreak** on ilmatorjuntaohjus, jossa ampuva lavetti seuraa ja valaisee maalia laserilla. Ohjus sisältää kolme laservalaisuun hakeutuvaa suurinopeuksista nuolta. Nuolet irtautuvat ohjuksesta kiihdytysvaiheen jälkeen, jolloin niiden nopeus on noin 4,5 Mach. Ohjukset lentävät kineettisen energiansa avulla maksimissaan noin kuuden kilometrin etäisyydelle.

Edellä kuvatut lavetin ja maalin välistä näköyhteysreittiä kulkevat ohjausmenetelmät soveltuvat vain lyhyen kantaman järjestelmiin, joissa maalin liikenopeus on suhteellisen pieni. Tämä pätee useimpiin taistelukentän olosuhteisiin ja järjestelmiin, muttei esimerkiksi pitkän kantaman ohjusjärjestelmiin. Niissä käytetäänkin usein maalin liikeradan perusteella tehtävää ennustetta maalin sijainnista. Tällaisessa COLOS-järjestelmässä (Command Off the Line Of Sight) lavetti seuraa erikseen sekä ohjusta että maalia, laskee arvion maalin paikasta sillä hetkellä, kun ohjuksen arvioidaan osuvan siihen, ja antaa ohjukselle korjauskomennot tämän mukaisesti. COLOS-ohjus ei siten lennä suoraan kohti maalia, vaan kohti laskettua ennakkopistettä. Esimerkki tällaisesta järjestelmästä on venäläisvalmisteinen BUK-M1 ilmatorjuntaohjus.

³⁷ Useimmissa nykyisistä järjestelmistä käytetään 1,064 µm laserlähetettä. Näköturvallisuuden vuoksi ollaan kuitenkin siirtymässä kohti pidempiä aallonpituuksia, kuten hiilidioksidilaserin 10,6 µm.



Kuva 282: Säteenseuraaajaohjus tietää sijaintinsa koodattuun tutka- tai laserlähetykseen perustuvan lentokujan suhteen ja kykenee ilmoittamaan sen tähtämelle, joka laskee tarvittavat korjauskomennot ja välittää ne komentolinkillä ohjukseen.

MAALIN HAKEUTUVAT ASEET

Maaliin hakeutuvien aseiden hakeutumisperiaatteet riippuvat hyvin paljon aseiden käyttötarkoituksesta. Esimerkiksi ilmatorjuntaohjusten (SAM, Surface to Air Missile) käyttökohteet vaihtelevat olkapäällä kannettavasta lyhyen kantaman olkapääohjuksista koko yhtymää suojaaviin ilmatorjuntajärjestelmiin. Lyhyen kantaman järjestelmissä käytetään yleensä lämpösensoria tai laserohjausta. Pitkän kantaman järjestelmissä käytetään yleensä puoliaktiivista tai aktiivista tutkaohjausta. Ilmasta maahan ammuttavat ohjukset (ASM, Air to Surface Missile) vaihtelevat syvälle vihollisalueelle tunkeutuvista pitkän kantaman risteilyohjuksista (ALCM, Air-Launched Cruise Missile) rynnäkkökoneissa ja helikoptereissa käytettäviin lyhyen kantaman ohjusjärjestelmiin. Pitkän kantaman järjestelmissä käytetään yleensä lennon alkuvaiheessa navigointiohjausta ja maaliin hakeutumisessa jotakin muuta menetelmää. On syytä huomata, että asejärjestelmissä voidaan käyttää useita eri ohjaus- ja hakeutumismenetelmiä ja sensortyypppejä. Siten aseiden luokittelu yhteen tiettyyn ryhmään kuuluvaksi saattaa olla vaikeata, minkä vuoksi asejärjestelmät saattaa olla helpompi luokitella kohteen mukaisesti (PST-ohjus, IT-ohjus jne.). Koska tämän kirjan näkökulmaksi on valittu spektrin hyödyntäminen tiedustelu-, valvonta-, johtamis- ja asejärjestelmissä, perustuu myös asejärjestelmien käsittelyyn ryhmittely hakupään ominaisuuksiin.

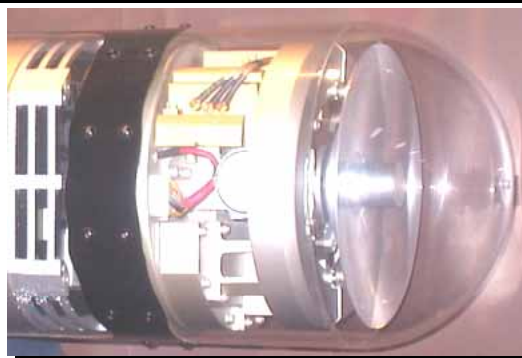
Aktiiviset millimetrialueen hakupäät

Laserhakuisten ohjusten yhteydessä esitellystä Hellfire-ohjuksesta on tehty millimetriaalto-tutkaversio **AGM-114L Hellfire Radio Frequency Longbow**. Ohjus sisältää Ka-kaistalla toimivan GaAs-millimetriaaltotutkan, jonka avulla ohjus suorittaa loppuhakeutumisen. Ohjus on ns. *fire-and-forget* -tyyppinen, eli se kykenee täysin itsenäiseen maaliin hakeutumiseen. Siten ohjuksen laukaissut Longbow-varustettu helikopteri kykenee suojaautumaan välittömästi laukaisutapahtuman jälkeen ja siirtymään seuraavalle tulitusalueelle. Helikopterin roottorin

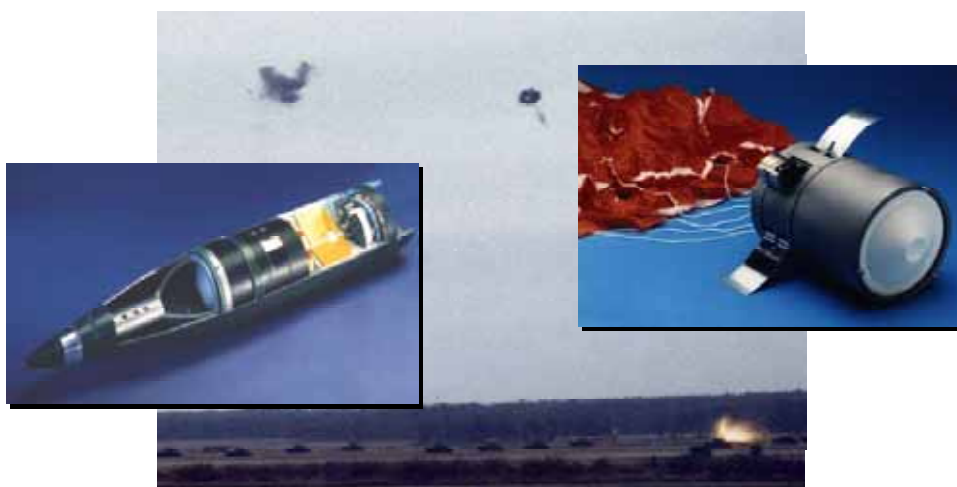
navassa oleva Longbow-järjestelmän millimetriaaltotutka kykenee muodostamaan kuvan maalialueesta nopealla hypyllä puunlatvojen yläpuolelle, minkä jälkeen lentäjä voi laskeutua turvaan puuston katveeseen valikoimaan maaleja ja tulittamaan niitä. Longbow-varustettujen ohjusten tulitus voi siten tapahtua täysin suojasta. Järjestelmään kuuluu ns. target handover –toiminto, joka mahdollistaa maalinsoituksen siirtämisen helikopterilta toiselle tai maasta helikopteriin. Ohjuksen kantama on noin 8 km.



Kuva 283: Englantilainen Brimstone-ohjus on aktiivisella millimetrihaku-päällä varustettu ns. ammu-ja-unohda-ohjus, joka voidaan ampua autonomisessa tilassa myös usean ohjuksen ryppäänä (salvo attack). [J. Kosola]



Ohjuksen taistelukärki on sijoitettu poikkeuksellisesti samaan tilaan hakupään kanssa. Ohjus kykenee näkemään sumun ja normaalin savun läpi eivätkä perinteiset naamiointimenetelmät juuri estä sen toimintaa. Lisäksi millimetriaaltoalueen voimakas vaimennus tuo sille suojaa kaukana sijaitsevilta häirintäjärjestelmiltä. Tällaisia ohjuksia vastaan tehokkaimpia olisivat omasuojahäirintäjärjestelmät, jotka toimivat lyhyeltä etäisyydeltä. Ohjuksen käynnistyttyä helikopterin tulenjohtotietokone päivittää ohjuksen inertianavigointilaitteelle sen sijainnin ja valitun maalin sen hetkisen sijainnin sekä liikesuunnan ja -nopeuden. Liikkuvia ja lähellä sijaitsevia maaleja tulitettaessa ohjus lukitaan maaliinsa ennen laukaisua. Jos tämä ei ole mahdollista, ohjus ammutaan ilman lukittumista ja se lentää kiihdytysvaiheen inertiaohjauksen avulla, minkä jälkeen ohjus käynnistää oman tutkansa.



Kuva 284: 155 mm SMart –kantoammuksen hyökkäys. Vasemmalla 155 mm kantoammuksen sisällä kaksi sirotetta, oikealla sirote. [Diehl]

Aktiivisia millimetriaaltohakupäitä voidaan käyttää myös suhteellisen halvoissa siroteissa, jotka toimitetaan maalialueelle esimerkiksi tykistön kantoammuksissa. Yksi tällainen järjestelmä on amerikkalainen **SADARM** (Sense And Destroy Armor). Se on 155 mm tykistökranaatin avulla toimialueelle levitettävä itsenäisesti maaliin hakeutuva panssarintorjunta-ammus. Kussakin 155 mm kantoammuksessa on kaksi SADARM-sirotetta, jotka pudotetaan kantoammuksesta laskuvarjon varassa. Kun sirote on saavuttanut sille ennalta ohjelmoidun korkeuden maasta, se irrottautuu laskuvarjosta ja levittää siivekkeet, jotka sekä stabiloivat sen putoamisen että pyörittävät sitä ympäri.



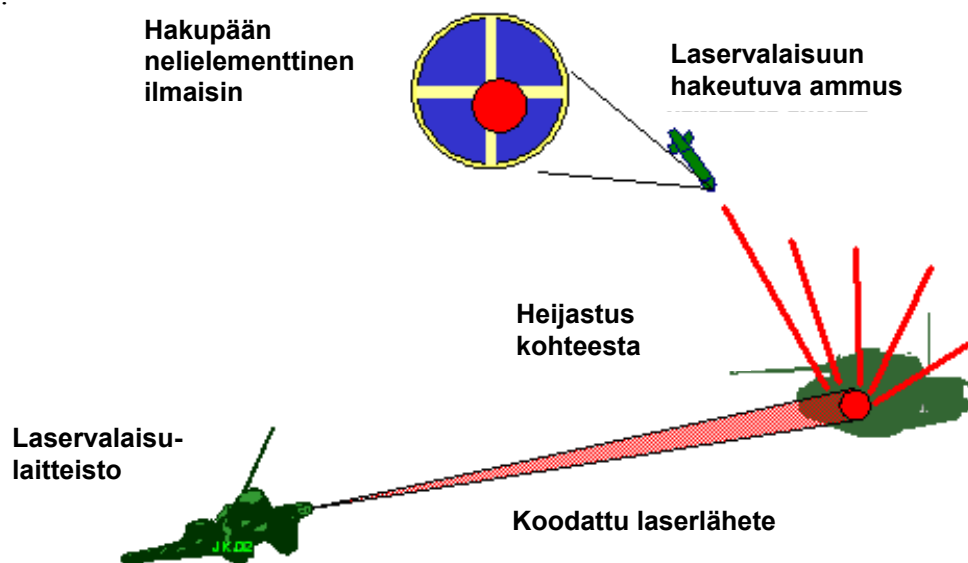
Kuva 285: SMARt sirotteessa vasemmalla millimetriaaltotutka-antenni, johon signaali syötetään ontelopanoksen räjähdysaineen läpi aaltoputkella sirotteen keskellä sijaitsevasta mmW-tutkasta. Kuvassa alhaalla oleva ulkonema on lämpösensori. Sirotteen takaosassa, kuvassa oikealla on laskuvarjo. Tutka-antennin takana olevat kuulat on tarkoitettu elävää massaa ja panssaroimattomia ajoneuvoja vastaan. [J. Kosola]

SADARM-sirotteessa on sekä millimetriaaltotutka että infrapunasensori, joilla se pyrkii löytämään maaleja. Sirotteen sensorin näkemä alue maassa on säteeltään lyhenevän spiraalin muotoinen. Kun sirote havaitsee maalin, se räjähtää 10 - 150 metrin etäisyydellä. Tällöin siitä lähtee räjäyttämällä muotoiltu typpäkulmainen projektiili, jonka nopeus on noin 1700 - 2000 m/s. Mikäli sirote ei havaitse maalia, se tuhoaa itsensä. Sirotetta on tarkoitus käyttää lähinnä keveästi panssaroituja telatykkeitä ja panssaroituja miehistönkuljetusajoneuvoja vastaan. Sen läpäisy on noin 0,5 - 0,8 kertaa panoksen läpimitta. 155 mm projektiiliin voitaisiin sijoittaa noin 120 mm sirote, joka kykenisi läpäisemään noin 60 - 100 mm panssariterästä. Toisena esimerkkinä mainittakoon saksalainen SMARt (Sense of-fuzed Munition for Artillery 155 mm), jota valmistetaan kahta tyyppiä: toinen 155 mm kantoammuksen sisälle asetettavaksi ja toinen lentokoneesta sirotettavaksi. Sirotteessa on sekä millimetriaalto- että infrapunahakupää. Infrapunailmaisoin toimii kolmella aallonpituudella. Millimetriaaltohakupää puolestaan toimii 94 GHz kaistalla. Sensorin spiraalimaisesti maata pyyhkäisevä näkökenttä kattaa noin 35.000 m² alueen. EFP-taistelulataus räjäytetään noin 100 - 120 m korkeudella. Tatantaalipenetrattori läpäisee 140 - 150 mm panssariterästä. Taistelulatauksessa on myös volframikuulia pehmeiden maalien tuhoamiseksi. Valmistajan lupaama osumistodennäköisyys on 80 % ja tuhoamistodennäköisyys 95 %.

Maaliin hakeutuva ammus voidaan toimittaa kohdealueelle myös kranaatinheittimellä, kuten millimetriaaltohakupään sisältävä englantilainen kranaatinheittimellä ammuttava **Merlin**.

Puoliaktiivinen laservalaisu

Ilmasta – maahan -laservalaisujärjestelmien toimintamatka on 10 km luokkaa. Valaisussa käytetään koodattua modulaatiota häirinnän erottelemiseksi valaisusignaalista. Lasersäteen teho on hyvin suuri (noin 100 mJ) ja valaisupulssijono on jatkuva, joten laservalaisun ilmaisu laservaroittimella on periaatteessa helppoa. Laserpohjaiset maalinseurantajärjestelmät ovat suhteellisen halpoja ja pienikokoisia. Kapean keilanleveyden ja lyhyen pulssin pituuden vuoksi ne ovat myös tutkaa huomattavasti tarkempia. Toisin kuin tutkajärjestelmissä, laserissa ei ole sivukeiloja, joita pitkin häirintäsignaali saataisiin maalinseurantajärjestelmään kovin suuressa avaruuskulmassa. Toisaalta laser on alttiimpi ilmakehän epäpuhtauksille ja sää-ilmioille ja mahdollisuudet muuttaa aallonpituutta esimerkiksi häirinnän väistämiseksi ovat rajalliset. Kaikki nykyiset lasersäteilyyn hakeutuvat aseet perustuvat 1064 nm Neodyymi (Nd) -lasereihin. Pulssiteho on noin 4 MW, pulssien kesto 20 ns ja toistotaajuus noin 10 - 20 Hz.



Kuva 286: laserheijastus fokusoidaan pisteeksi ilmaisimelle. hakupää pyrkii saamaan kaikkien ilmaisinelementtien signaalin yhtä suuriksi.

Lukuisista laservalaisuun hakeutuvista asejärjestelmistä tässä yhteydessä mainittakoon tykistöllä ammuttavat ammuksat, ilmasta pudotettavat LGB-pommit sekä helikopterista tai rynnäkkökoneesta ammuttavat ohjukset. Länsimaisista laservalaisuun hakeutuvista tykistökranaateista tunnetuin on Martin Mariettan **M-712 Copperhead**, joka ammutaan 155 mm tykillä tulikomennon perusteella maalialueelle. Ampumaetäisyys on 3-16 km. Tulenjohtaja valitsee ja osoittaa maalin laservalaisujärjestelmällä (GLLD, Ground Laser Locator Designator). Testien mukaan Copperhead-ammuksen osumistarkkuus on puolen metrin luokkaa. Ammuksen osumiseen maaliin vaikuttaa tulikomennon tarkkuus ja pilvikorkeus – sillä ammus ei saa lasersignaalia pilvipeitteen läpi. Matala pilvikorkeus on aiheuttanut ongelmia aseiden sovitamisessa eurooppalaiseen toimintaympäristöön. Venäläinen LOMO valmistaa puoliaktiivisia (SAL, Semi-Active Laser) -hakupäitä 152 mm Krasnopol- ja 122 mm Kilotov-2M-projektiileihin. Hakupää toimii 1,06 μm aallonpituudella ja sensorin näkökenttä on maalinetsintämoodissa 30 astetta ja lukituksen jälkeen seurantomoodissa 6 astetta. Järjestelmän 1D15-maalinvalaisulaserilla saavutetaan noin 2 - 3 km lukitusetäisyys taisteluvaunun kokoiseen ja tyyppiseen maaliin. Hakupään elektroninen suojaus häirintää vastaan on pyritty saamaan aikaan avaamalla hakupään vastaanotin vasta sopivalla hetkellä, koodaamalla oikea maalinvalaisusignaali valittavalla pulssijonolla ja käyttämällä ilmaisimessa kapea-

kaistaisia optisia suotimia. Käytettävä koodi valitaan neljästä mahdollisesta ennen kranaatin lataamista. Maalinvalaisulaserissa on oltava vastaava koodi käytössä. Ukrainalainen Tochnost on kehittänyt Krasnopolista kevyemmän Kvitnyk-kranaatin, joka painaa 48 kg, ja sisältää 8 kg HE-latauksen.



Kuva 287: Laservalaisuun hakeutuva venäläinen Kilotov-kranaatti. [J. Kosola]

Tunnetuin laserhakuinen lentopommi (LGB, Laser Guided Bomb) lienee amerikkalainen laserohjattujen pommien perhe, joka on nimetty **Paveway**-järjestelmäksi. Se käsittää konventionaaliseen vapaapudotteiseen pommiin asennettavan noin 14 kg painavan 1,064 μm alueella toimivan laserhakupään ja ohjausyksikön sekä tähtäin- ja laservalaisuyksikön (LTM, Laser Target Marker). Pommien koko vaihtelee 227 kg:sta (500 lb) 907 kg:aan (2000 lb). Pommin pudotusalueelle toimittavan lentokoneen kannalta kyseessä on tavallinen pommi; sähköistä yhteyttä lentokoneeseen ei ole. Laservalaisu voidaan suorittaa toisesta lentokoneesta tai maassa olevasta valaisujärjestelmästä. Pudotuksen jälkeen pommi käynnistää ohjaussiivekkeiden voimayksikkönä toimivan kaasugeneraattorin sekä levittää ohjaussiivekkeet. Hakupää pyrkii pitämään ohjuksen lentoreitin suoraan kohti maalista heijastuvaa lasersäteilyä.

Laserpommien laukaisuetäisyys on tyypillisesti noin 5 – 6 km – siivillä varustetun pitkän kantaman laserpommin kantama voi olla huomattavastikin tätä pidempi. Esimerkiksi Longshot-siipiyksiköllä varustettu GBU-12 kantama on 30.000 jalan korkeudesta pudotettuna yli 60 km³⁸.

Laservalaisuun hakeutuvista ohjuksista tunnetuin lienee **AGM-114 Hellfire II** -ohjuksesta tehty lasersäteilyyn puoliaktiivisesti hakeutuva K-versio (SAL, Semi-Active Laser homing)³⁹. Ohjuksen inertianavigointijärjestelmä ja autopilotti pitää ohjuksen suunnassa myös silloin kun ohjus lentää pilvipeitteen, savun tai sumun läpi. Ohjus kykenee siten toimimaan jonkin aikaa ilman maalinosoitusta ja lukituttumaan uudelleen maaliin. Maali voidaan valaista hyökkäävästä tai toisesta ilma-aluksesta (lock-on before launch) tai se voidaan suorittaa maasta kannettavalla tai ajoneuvon asennetulla lasermaalinosoitusjärjestelmällä (lock-on after

³⁸ Graig Hoyle: Raytheon unveils Paveway IV for UK. JDW 26 February 2003: 8.

³⁹ Liittoutuneiden ilmahyökkäys Irakiin 1991 alkoi operaatiolla, jossa matalalla tutkakatveessa lentävien armeijan AH-64 merijalkaväen AH-1W -helikoptereiden ampumilla ja lasersäteilyyn hakeutuvilla Hellfire-ohjuksilla tuhottiin irakilaisien kaukovalvontatutkiensa suojaksi rakentamat keskivalvontatutkat. Maalin valinnan ja laservalaisuun suorittivat erikoisjoukot. Kun keskivalvontatutkat oli saatu lamautettua, tuhottiin venäläiseen Tall King -tutkaan perustuva kaukovalvontaverkko aktiivisten tutkien osalta tutkasäteilyyn hakeutuvien HARM-ohjuksin. Passiiviset kaukovalvontatutkat tuhottiin Tomahawk risteilyohjuksin.

launch). Laserlähete on koodattu usean ohjuksen samanaikaisen tulittamisen mahdollistamiseksi sekä harhauttavan häirinnän väistämiseksi.



Kuva 288: Vasemmalla amerikkalainen ja oikealla venäläinen laserhakeutuvan pommin hakupää. Oikeanpuoleisen kuvan vasemmanpuoleinen moduuli on venäläinen IR-hakuisen täsmäpommin hakupääyksikkö. [J. Kosola]

Puoliaktiivinen tutkavalaisu

Keski- ja pitkän matkan ilmataistelu- ja ilmatorjuntaohjukset ovat poikkeuksetta puoliaktiivisia tai aktiivisia tutkavalaisuun hakeutuvia ohjuksia. Puoliaktiivisessa järjestelmässä valaisun suorittaa ampuva ilmatorjuntalavetti tai lentokone. Aktiivisessa ohjuksessa valaisuun käytetään ohjuksen omaa pientä tutkalähetintä. Ohjus voi lentää alkumatkan inertia- ja/tai GPS-navigoinnin turvin. Maamaali-ohjuksissa ei yleensä käytetä tutkavalaisu.

Laserohjauksen ja passiivisen lämpöhakeutumisen sijasta pommien ja ohjusten hakeutumisesa voidaan käyttää myös synteettisen apertuurin tutkaa (SAR). Laserpommien (LGB) ongelmana on se, ettei maalinosoitusta voida tehdä pilvipeitteen tai sumun läpi. Amerikkalaisten arvioiden mukaan SAR-ohjattu ammus kykenisi osumaan maaliin 3 metrin tarkkuudella. Tämä olisi kolminkertainen parannus yhdistettyyn inertia- ja GPS-ohjaukseen verrattuna. Toisaalta SAR-ammuksen osumakulma on 60 astetta tai tätä enemmän, joten lentokoneen on kyettävä lentämään varsin korkealla ja lähellä maalia. Esimerkki tällaisesta SAR-ammuksen kehittämiseen tarkoitettusta projektista on amerikkalainen WASSAR-hanke (Wide Area Search Synthetic Aperture Radar seeker), jonka tavoitteena on kehittää huokea liikkuvien ja paikallaan olevien maalien havaitsemiseen, tunnistamiseen ja autonomiseen hakeutumiseen tarkoitettu hakupää. Vaatimuksena on 5 - 35 GHz alueella toimiva 10 - 20 W SAR-hakupää, jonka kantama olisi 8 - 12 km ja resoluutio 10 - 100 cm. Hakupään aloittaisi maalien etsinnän 3000 m korkeudesta 6 - 9 km etäisyydeltä lentäen noin 200 m/s nopeudella⁴⁰. Hakupään resoluutio laaja-alaisessa moodissa riittää mielenkiintoisten kohteiden havaitsemiseen ja karkeaan luokitteluun. Spot-moodin 10 cm resoluutio puolestaan mahdollistaa maalien tunnistamisen ja jopa yksilöinnin, joten hakupää kykenee valikoimaan havaitsemistaan maaleista esimerkiksi komentoajoneuvot, taistelupanssarivaunut tms. kohteet, jotka siihen on ohjelmoitu korkealle prioriteetille.

⁴⁰ USAF eyes next-generation SAR seeker. Jane's IDR Jan 2002: 17.

Passiiviset lämpöhakupäät

Nykyaikaiset lämpöhakupäät ovat 2-ulotteisia ns. tuijottavia ilmaisinmatriiseja (FPA, Focal Plane Array tai staring array), jotka muodostavat kohteesta 2-ulotteista kuvaa. Ne ovat syrjäyttämässä yksielementtiseen ilmaisimeen perustuvat vanhemmat järjestelmät, jotka kykenivät vain aistimaan lämmön lähteen ja hakeutumaan siihen⁴¹. Nykyiset kuvaa muodostavat lämpöhakupäät kykenevät tunnistamaan ja mahdollisesti jopa yksilöimään kohteen. Kuvaavissa hakupäissä käytetään yleensä 8 - 14 µm infrapunaikkunaa ja yksielementtisissä lämpöhakuisissa infrapunaohjuksissa 3 - 5 µm ikkunaa tai vanhemmissa vain loittonevaan maaliin (kuuma moottori näkyvissä takaa päin) ammuttavissa ohjuksissa 0,7 - 1,5 µm lähi-infrapunaikkunaa.

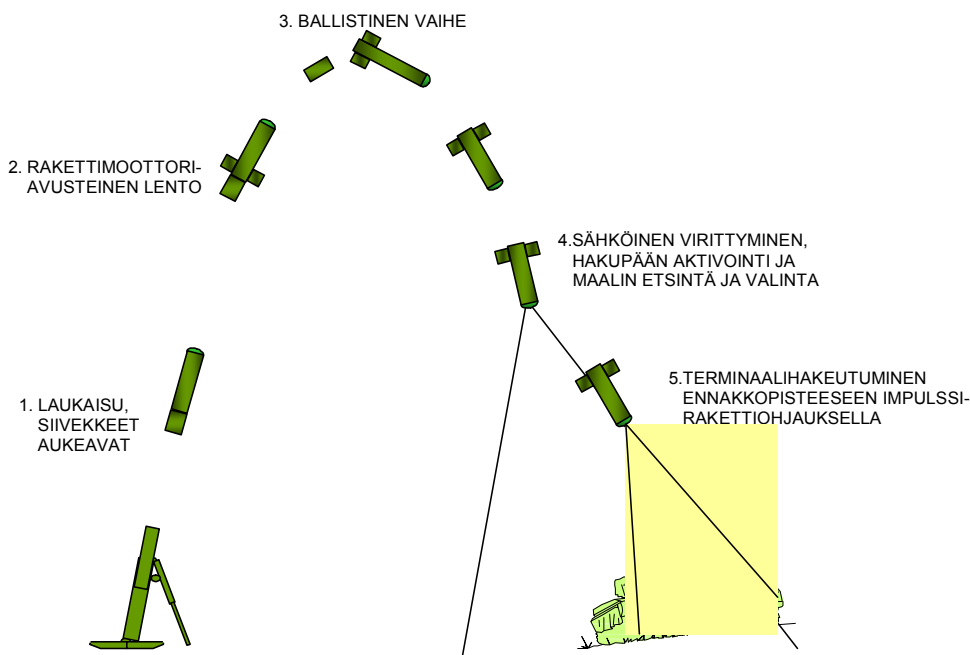
Pitkän kantaman ilmasta maahan ammuttavasta lämpösensoria hyväksikäyttävästä ohjuksesta voidaan mainita amerikkalainen **SLAM** (Stand-off Land Attack Missile), joka käyttää inertia-navigointia ja GPS-paikannusta lennon alkuvaiheessa ja kuvaavaa lämpökameraa (IIR) maaliin hakeutumisessa. Aseessa on datalinkki, jonka avulla ampuja voi seurata ohjuksen lentoa ja arvioida osumispuheen avulla tuho vaikutusta sekä muuttaa ohjuksen maalin valintaa tai tähtäyspistettä. Ohjuksen kantama on 100 kilometrin luokkaa ja se voi kantaa tytärammuksia tai yksittäisen suurikokoisen taistelukärjen.

Esimerkkejä lyhyen kantaman ilmasta maahan ammuttavista ohjuksista ovat amerikkalaiset Popeye ja Maverick. **AGM-142A Popeye** on ilmasta ammuttava ohjus, joka lähettää TV- tai IIR-hakupäänsä kuvan asejärjestelmälavetille, jossa operaattori ohjaa aseensa lentoa maaliin datalinkin välityksellä. **AGM-65 Maverick** ohjuksen A- ja B-versioissa on TV-hakupää, D-, F- ja G-versioissa kuvaava infrapunahakupää ja H-versiossa millimetriaaltotutka. Ohjus lukee maalin johonkin osaan, josta saadaan riittävä kontrasti, kuten kahden eri pinnan leikkauskohtaan. Ohjuksen sensorin kuva välitetään datalinkillä asejärjestelmän operaattorille, jonka tehtävänä on tarvittaessa säätää ohjuksen hakeutumispistettä maalissa ohjuksen lähestyessä sitä.

Neljäs lämpösensoria hyväksi käytettävänä asetyyppi ovat hakeutuvat panssarintorjunta-ammukset, joista erimerkkeinä voidaan mainita amerikkalainen BAT ja ruotsalainen Strix. Panssarintorjuntaan syvällä vihollisen selustassa tarkoitettu Northrop Grummanin **BAT** (Brilliant Anti-Tank) käyttää akustista sensoria ja infrapunasensoria etsimään ja yksilöimään maaleja, joita vastaan se hyökkää itsenäisesti. BAT levitetään sirotekasetista, risteilyohjuksella tai raketinheittimistön (MLRS) kantoammuksella. Yhdellä MLRS:n ATACMS-ohjuksella voidaan ampua 13 BAT-ammusta 145 km etäisyydelle. Maalialueelle toimittamisen jälkeen ammus laukaisee laskuvarjon, jonka varassa leijuen se etsii maaleja akustisen sensorinsa avulla. Se kykenee havaitsemaan raskaan dieselmoottorin äänen kuuden kilometrin etäisyydeltä. Havaittuaan maalin se irrottautuu laskuvarjosta ja hakeutuu kohti maalialuetta. Saavuttuaan maalialueelle se laukaisee sekundäärilaskuvarjon, jonka avulla se kykenee hidastamaan laskeutumistaan niin paljon, että sen akustisen sensorin ohjaama infrapunasensori kykenee havaitsemaan maalin. BAT:ssa ei ole moottoria, vaan se lentää aerodynaamisesti. Maalin tarkka paikantaminen ja yksilöinti tehdään lämpösensorin kuvan perusteella. Ammus kykenee päättelemään sisäisen tietokoneensa avulla lämpökameran kuvasta, mikä maaleista on hyökkäämisen arvoinen. Koska BAT hakeutuu oikealle maalialueelle akustisten sensoreidensa

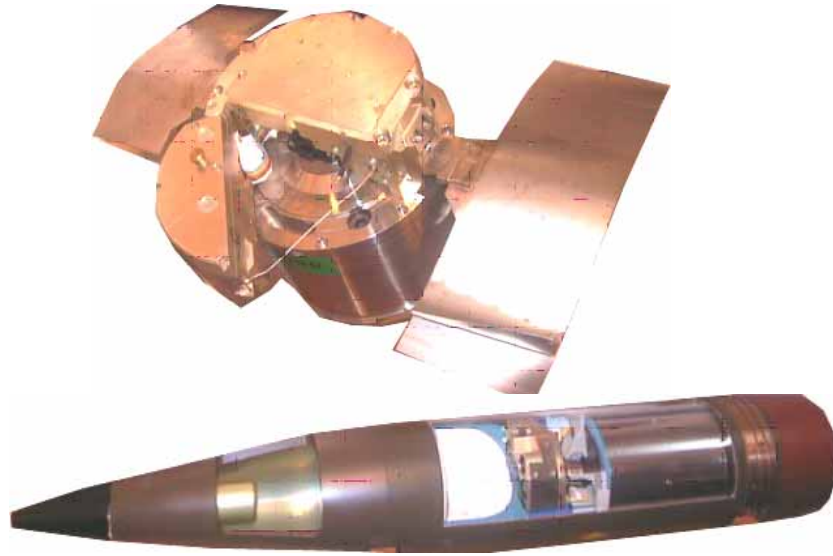
⁴¹ Yksielementtiseen sensoriin ja mekaaniseen pyyhkäisyyn perustuvia hakupäitä tullaan valmistamaan ja käyttämään vielä pitkälle tulevaisuuteen niiden vaatiman suhteellisen yksinkertaisen valmistusteknologian vuoksi. Ne tulevat kuitenkin leimautumaan teknisesti vähemmän kehittyneiden maiden aseistukseksi.

avulla ja taisteluajoneuvojen äänten perusteella, järjestelmää voidaan käyttää lähinnä liikkuvia (tela-) panssarimaaleja vastaan. Boforsin **Strix** on 120 mm kranaatinheittimellä ammuttava itsenäisesti maaliin hakeutuva infrapuna-alueella toimiva ammus, jonka kantama on yli 7 km. Ammuksesta on kehitteillä puoliaktiivinen lasersäteilyyn (SAL, Semi-Active Laser) hakeutuva versio. **BONUS** (Bofors Nutation Shell) käsittää 155 mm kantoammuksen sisälle pakatut kaksi pst-sirotetta. Hakupäässä on monikaistailmaisoin, jonka valmistaja ilmoittaa toimivan ”useammalla kuin kahdella” aallonpituudella.



Kuva 289: Ruotsalaisen Boforsin Strixin lennon vaiheet. Ammuksen infrapunahakupää sisältää elementtirivin, jolla ammus muodostaa kuvan maalialueesta pyöriessään siivekkeiden avulla kymmenisen kierrosta sekunnissa. Terminaalihakeutumiseen ammus käyttää impulssiohjusta.

Esimerkkeinä valokuitulinkkiä ja passiivista lämpösensoria käyttävästä aseesta voidaan mainita amerikkalainen EFOGM ja Eurooppalainen FOM. **EFOGM**-ohjuksessa käytetään 640x480 PtSi-matriisia, Nykytekniikalla voitaisiin toteuttaa suurempiakin ilmaisimatriiseja, joten ohjuksen näkökykyä voidaan lisätä nykyisestä. Ohjus lentää sisäisen inertianavigoinnin ja GPS-paikantimen avulla sille osoitetulle maalialueelle. Matkan aikana ohjuksen sensori kykenee etsimään itsenäisesti maaleja. Operaattori voi halutessaan myös valita maaleja sekä varmentaa sensorin tekemän valinnan. Ohjus lentää noin 300 metrin korkeudessa, joten ampujalla on hyvä näköala kohdemaastoon. **FOM** on Saksan, Ranskan ja Italian yhteisprojekti valokuituohjatun ohjuksen valmistamiseksi. 140 kg painavassa FOM-ohjuksessa on 20 kg ontelo/sirpale-taistelukärki ja työntövoiman lähteenä on kaasuturbiini. Ohjus lentää 20 - 400 metrin korkeudessa 120 - 200 m/s (430 - 720 km/h) nopeudella. Sensorina on stabiloitu kuvaava 3,4 - 5,5 μm alueella toimiva PtSi-infrapunasensori, joka havaitsee maalit 8 km etäisyydeltä – tai 3 km matkalta huonoissa sääolosuhteissa. Tyypillinen yksilöntietäisyys on noin 1,5 km, joka antaa operaattorille noin 10 s aikaa varmistaa maalin valinta. Jos maali hylätään ennen ohjuksen terminaalivaihetta, ohjus kykenee jatkamaan lentoaan ja etsimään uuden maalin. Ohjuksessa on sisäinen inertiaipaikannin, laserkorkeusmittari ja GPS-vastaanotin. Mikäli ohjus ei pääse maaliinsa esimerkiksi maalin peittävän rakennuksen tms. vuoksi, se kykenee kiertämään esteen ja hyökkäämään toisesta suunnasta. Ohjuksen kantama on 15 - 30 km ja sitä pyritään jatkamaan yli 100 kilometrin.



Kuva 290: Boforsin BONUS-kantoammus ja sirote. [J. Kosola]

Ammuttavien ohjusten ja ammusten lisäksi elektroniikkaa ja passiivista lämpöhakupäätä voidaan hyödyntää myös miinoissa. Tällaisesta esimerkkinä mainittakoon amerikkalainen **WAM** (Wide Area Munition), joka on käsin asennettava älykäs miina. Se tarkkailee ympäristöään akustisin ja seismisin sensorein. Kun se havaitsee maalin lähistöllään (noin 100 metrin säteellä), luokittelee maalin sen seismisen ja akustisen herätteen perusteella (esimerkiksi telat tai pyörääjoneuvo, rynnäkö- tai taisteluvaunu) ja hyökkää, mikäli maalin luokitus vastaa siihen ohjelmoitua hyökkäysprofiilia. WAM laukaisee lämpöherätteeseen hakeutuvan projektiilin havaitun maalin yläpuolelle, missä tämä projektiili suuntautuu kohti maalia ja laukaisee räjähteellä muodostettavan projektiilin maalin kansipanssarin läpi. Tällaisista aseista käytettiin ennen nimitystä *'offroad mine'*. Nyttemmin aseelle on helpommin saatavissa rahoitusta nimityksellä *'laaja-alue ammus'*. Ilmiö on sama kuin sirote miinoissa, jotka nimettiin uudelleen *'aluevaikutteisiksi aseiksi'*.



Kuva 291: AIM 9X Sidewinder on ohjusperheen uusin versio [Raytheon].

Passiivisesti tutkalähettimeen hakeutuvat ohjukset

Tutkasäteilyyn hakeutuvista ohjuksista käytetään yleensä nimitystä ARM (Anti-Radiation Missile). Ne etsivät ja lukkiutuvat tutkan pääkeilan ja mahdollisuuksien mukaan myös sivukeilojen säteilyyn. Ohjuksen tulisi kyetä hakeutumaan myös tutkan sivukeilaan, koska jos se ei kykene ilmaisemaan kuin pääkeilan, sen hakeutumiseen tarvitsema lähete on käytettävissä vain silloin kun tutkan antenni osoittaa ohjusta kohti. Ohjuksen herkkyys on tyypillisesti kapeakaistaisessa etsintätilassa (tutkan lähetystaajuus tunnetaan etukäteen) noin - 80 ... - 90 dBm ja laajakaistaisessa etsintätilassa (kun tutkan lähetystaajuutta ei tunneta, vaan ohjus etsii sitä) noin - 60 dBm. Tutkahakuisen ohjuksen kantama vaihtelee vanhakojen versioiden 15 kilometristä uusimpien 70 kilometriin (jopa 150 km joidenkin arvioiden mukaan). Ohjuksen tutkapoikkipinta-ala on 0,1 m² luokkaa, joten sen havaitseminen laukaisuvaiheessa on vaikeaa. Lähestyessään maalia tutka voi (lähestymisohjelmasta riippuen) lentää muutaman kymmenen metrin korkeudella, jolloin se voi sekoittua maavälkkeeseen. Toisaalta ohjuksen suuri nopeus – 200 - 700 m/s mahdollistaa sen dopplererottelun maavälkkeestä. Toinen mahdollisuus on se, että ohjus lähestyy maaliaan korkealta pyrkien pysymään tutkakeilan yläpuolella.

Ohjus kykenee paikantamaan tutkasäteilyn tulosuunnan, muttei voi tietää etäisyyttä. Tutka voidaan paikantaa lähestymällä sitä vinosti, jolloin tutkaan saadaan useita suuntimia, joista ristisuuntimalla saadaan karkea paikka. Ohjus lentää suurella nopeudella, esimerkiksi 1 km/s, joten sen on saatava signaali tutkasta useita kertoja sekunnissa koko lentonsa ajan. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että ohjuksen on kyettävä hakeutumaan tutkaan myös sen sivukeiloista. Mikäli tutka havaitsee ohjuksen laukaisun ja lopettaa lähetyksensä, ei säteilyyn hakeutuminen onnistu. Useimmat nykyaikaiset ohjukset jatkavat muistiyksikön ja autopilotin varassa kohteen lähestymistä. Osa ohjuksista kykenee myös siirtymään leijuntatilaan (loiter mode), jossa ne etsivät tutkalähetettä. Joissakin ohjuksissa leijunta-aikaa pidennetään laskuvarjolla; laskeutuessaan hitaasti varjon varassa ohjus etsii tutkalähetettä ja havaittuaan sen irrottautuu varjosta ja hakeutuu tutkaan.

Merkittävin teknologinen kehitys ohjusjärjestelmissä on satelliittinavigointijärjestelmien integrointi ohjausyksikköön. Se mahdollistaa tarkan hakeutumisen ennalta määrättyyn paikkaan. Mikäli tutka havaitaan halutun etsintäalueen sisällä, voi ohjus hakeutua paikan sijasta signaalilähteeseen. Optisen hakupään käyttö on toinen rinnakkainen kehitysmahdollisuus.

Esimerkki:

Valvontatutkan ominaisuudet ovat: lähetysteho $P_t = 500$ W, pulssinpituus 50 mikrosekuntia, antennin keilanleveys on 2 x 4 astetta, vahvistus 35 dB ja sivukeilatase 40 dB. Tutka keilaa 10 kierrosta minuutissa. Tutkan kantama tutkapoikkipinta-alaltaan 1 m² kokoisen maaliin on noin 70 km.

Tutkasignaalin tehotiheys S etäisyydellä R tutkasta on

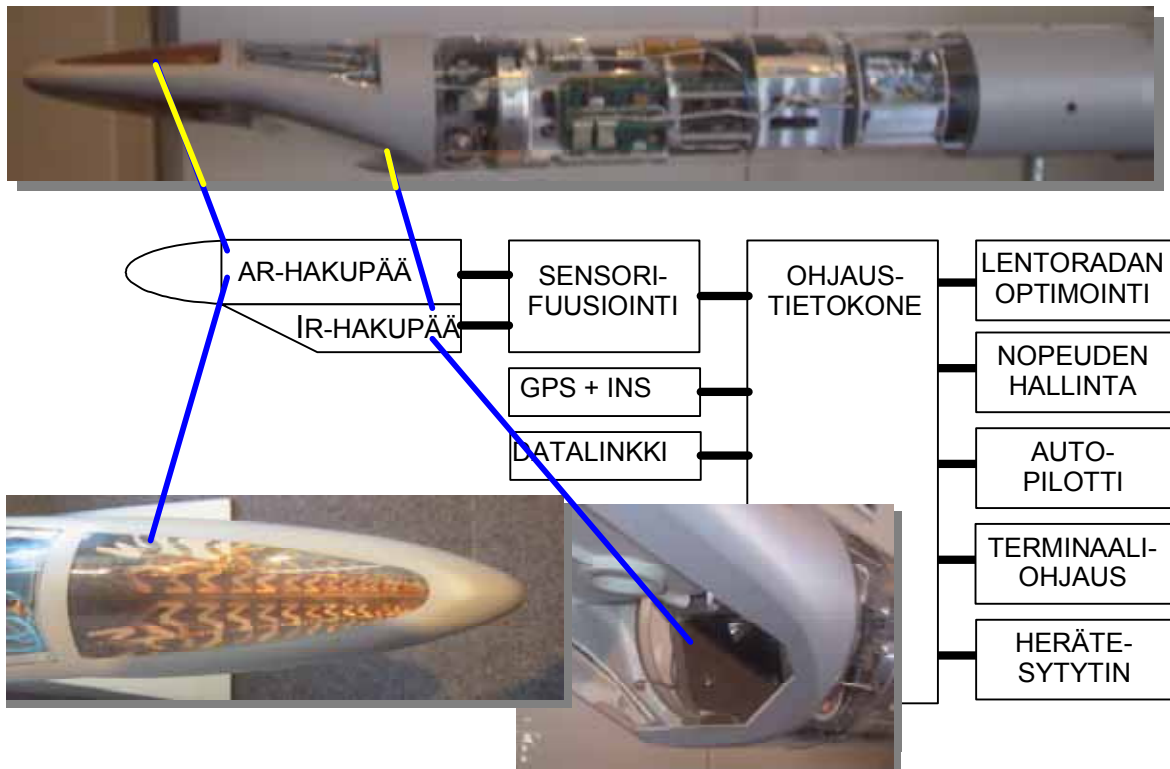
$$S = \frac{P_t \cdot G \cdot 10^{\frac{-SLL}{10}}}{4 \cdot \pi \cdot R^2}$$

Jos tutka toimii kiinteällä taajuudella ja tutkahakuisen ohjuksen isotrooppinen herkkyys on $S_{\min} = -80 \dots -90 \text{ dBm/m}^2$, saadaan ohjuksen lukittumisetäisyydeksi sivukeilaan:

$$R = \sqrt{\frac{P_t \cdot G \cdot 10^{\frac{-SLL}{10}}}{4\pi \cdot S_{\min}}} = 37 \dots 115 \text{ km}$$

Jos tutka käyttää taajuushypintää ja hakupää joudutaan lukitsemaan laajakaistaisessa moodissa (- 60..-70 dBm isotrooppinen herkkyys), putoaa lukittumisetäisyys 4...12 kilometriin.

Tutkahakeutuvien ohjusten taistelukärki on yleensä niin pieni, ettei tutka tuhoudu täysin. Ohjuksen osumatarkkuus on noin 10 - 30 metriä ja sen taistelulataus lähettää 5 000 – 25 000 raskasmetallikappaletta, joiden vaikutussäde on 30 – 100 metrin luokkaa. Ohjus hakeutuu säteilylähteeseen, eli antenniin, tuhoten sen tai vaurioittaen antennia ja sen kääntölaitteistoa, kaapelointeja yms. tutkan kannalta tärkeitä kohtia. Kuitenkin tutkan lähetin ja vastaanotin sekä muut järjestelmäkomponentit jäävät yleensä ehjäksi. Tämän vuoksi ARM-hyökkäystä täydennetään usein muilla aseilla sen jälkeen kun tutka on lamautettu.



Kuva 292: Saksalaisen tutkahakuisen ARMIGER-ohjuksen elektroniikan lohkokaavio. Ohjus hyödyntää sekä tutka- (1 - 18 GHz) että IP-alueen (8 - 12 μm FPA-matriisi) herätteet ja kykenee tarvittaessa lentämään GPS:n ja inertianavigoinnin (INS) avulla. Herätesytytin on primäärisensoreiden tukema, millä pyritään vähentämään elektronisten vastatoimenpiteiden vaikuttamismahdollisuuksia ohjukseseen. [J. Kosola]

Yksinkertaisimpana vastatoimenpiteenä on tutkan lähettimen jaksottainen käyttö epäiltäessä ARM-hyökkäystä. Tämä toimii, mikäli ohjus ei sisällä tutkajärjestelmään jo lukkiutunutta toissijaista sensoria, kuten IIR- tai TV-hakupäätä. Tällainen kaksoishakupäällä varustettu järjestelmä kykenee hakeutumaan ensisijaisesti tutkalähteeseen ja viimeiset 2-3 km lämpösensorin avulla ilman tutkasignaalia. Hyökkääjän kannalta jo pelkkä tutkan sammuttaminen saattaa olla riittävä vaikutus, sillä se mahdollistaa vapaan lentotoiminnan, tai lähestymisen tutkan havaitsematta ja tutkan tuhoamisen muilla aseilla.

Esimerkiksi ensisijaisesti omasuojakäyttöön tarkoitetun Raytheon **AGM-88 HARM** (High-speed Anti-Radiation Missile) -ohjuksen laukaisukorkeus on tyypillisesti noin 5 km ja ohjuksen hyökkäyskulma 45 – 60 astetta. Ohjus voidaan laukaista sokeana tunnettujen tutkajärjestelmien suuntaan syöttämällä sille maalin koordinaatit (pre-briefed mode). Jos ohjus havaitsee tutkan, se hyökkää, muuten sen itsetuhomekanismi tuhoaa sen. Ohjus voidaan myös lukita laukaisuhetkellä havaittuun lähettimeen tai siihen voidaan syöttää tuhottavalle järjestelmälle tyypillisen tutkasäteilyn parametrit, joiden perusteella se kykenee hakeutumaan mihin tahansa kriteerit täyttävään maaliin (target of opportunity mode). Ohjuksen väitetään myös kykenevän lukittumaan muihin tutkajärjestelmän emissioihin, jolloin se kykenisi tuhoamaan tutkajärjestelmän myös sen jälkeen kun sen lähetin on sammutettu. Kyseessä lienee tällöin hakeutuminen tutkajärjestelmän datalinkkiin tai viestilähtetimiin. Ohjuksen uusimpien versioiden älykkyyttä on lisätty siten, että ne kykenisivät etsimään lämpösensorin avulla tutkajärjestelmän ohjauskontin tai ajoneuvon ja hakeutumaan siihen lähetinantennin sijasta. Tällöin saavutettaisiin huomattavasti suurempi ja vaikeammin korjattavissa oleva tuho. HARM:a käytetään sekä SEAD-tehtävissä (Suppression of Enemy Air Defences) että hävittäjä- ja rynnäkkökoneiden itsesuojeluaseena. Ohjuksen kantama on noin 20 km, nopeus yli Mach 2. Taistelukärkenä käytetään herätesytyttimellä varustettua esisirpaloitua räjähdettä, joka on tehokas suojaamattomia kohteita vastaan noin 50 – 150 metrin etäisyydeltä.



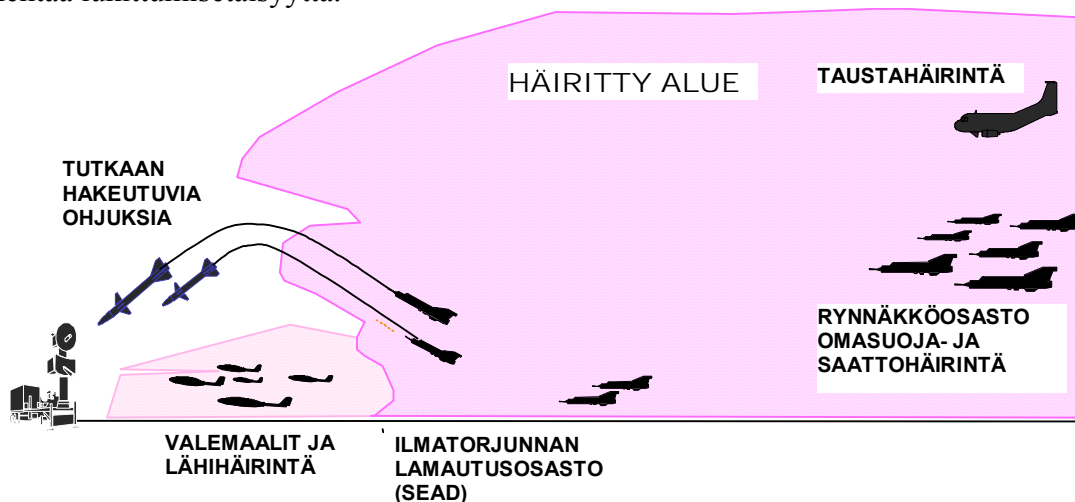
Kuva 293: Israel Aircraft Industries ITALD (Improved Air-Launched Decoy) on varustettu aktiivisilla tutkasignaalin toistimilla sekä passiivisilla tutkaheijastimilla. Harhamaali kykenee seuraamaan maanpintaa ja lentää ennalta ohjelmoitua lentoreittiä imitoiden hävittäjä-, rynnäkkö- tai pommikoneen maalikaikua ja lentorataa. Suihkumoottorilla varustetun harhamaalin nopeudeksi valmistaja ilmoittaa yli 0,8 Mach ja kantamaksi lähes 300 km lentoajan ollessa tyypillisesti 20 min. Liitoversiota käytettiin menestyksellä sekä Persianlahden että Balkanin operaatioissa. [IMI]

SEAD-operaatioon varustetun lentokoneen varustus käsittää maaleista ilmoittavan tutkavaroitin, signaalianalysaattorin lähetinten luokitteluun ja uhan arvioimiseen sekä useita

ARM-ohjuksia. SEAD-hyökkäys alkaa massamaisella valemaalien käytöllä, millä pyritään saamaan puolustaja käynnistämään tutkat ja käyttämään ohjuksia valemaaleihin, jotka häiritsevät tutkan toimintaa lähihäirinnällä. Tämän jälkeen ilmatorjunnan lamautusosasto (SEAD) suorittaa ARM-hyökkäyksen. Kun tutkajärjestelmä on lamautettu tai tutkat käännetty pois päältä ARM-hyökkäyksen väistämiseksi, osasto tuhoaa ilmapuolustusjärjestelmän ASM-ohjuksin lentorynnäköllä. SEAD-osaston perässä hyökkää taustahäirinnän suojasta varsinainen rynnäkköosasto pyrkien tuhoamaan kohteen, jonka suojaksi ilmapuolustusjärjestelmä on ryhmitetty.

Vastatoimenpiteenä tutkasäteilyyn hakeutuville aseille tutkajärjestelmissä voidaan käyttää suhteellisen yksinkertaisia harhamaaleja, jotka matkivat tutkan läheteitä. Tutkajärjestelmän suunnittelussa voidaan lisäksi käyttää *tietoliikenne-* ja *sensorijärjestelmät*-luvuissa esiteltyjä LPI/LPD-menetelmiä. Pieni sivukeilataso yhdistettynä laajakaistaiseen LPD-lähteeseen kykenee suojaamaan lyhyen kantaman tutkajärjestelmän tutkahakuisilta ohjuksilta, mutta kauko- ja keskivalvontatutkien lähetystehot ovat niin suuret, ettei tutkahakuisen ohjuksen lukittumista niihin voi käytännössä estää pitkältäkään etäisyydeltä. Lisäksi hyökkäävä kone kykenee lähestymään niitä tutkan alakatveessa. Pieni lähetysteho ja sivukeilataso joka tapauksessa lyhentävät tutkahakuisen ohjuksen lukittumisetäisyyttä, mutta on nähtävissä, että ohjusten älykkyys sekä sekundäärinen sensorin ja paikannusjärjestelmän lisääminen mahdollistavat hakeutumisen maaliin myös ilman jatkuvaa tutkaherätettä. Tutkan maastouttaminen saattaa tulevaisuudessa vaikeuttaa maalitiedustelun lisäksi myös ohjuksen hakeutumista.

Siirtyminen käyttämään riittävän matalia toimintataajuuksia tuo suojaa tutkahakuisilta ohjuksilta, sillä matalampi taajuus johtaa pidempään aallonpituuteen. Tämä edellyttää myös antennien koon lisäämistä, mikä tutkajärjestelmässä on helpommin toteutettavissa kuin ohjuksessa, mistä seuraa se, että tutkahakuisen ohjuksen herkkyys putoaa lyhentäen lukittumisetäisyyttä. Elektroninen pysty- ja vaakakeilaus mahdollistaa valesatunnaisen ja tilanteen mukaisen keilausten, jolloin tutka voi paremmin havaita ohjuksen laukaisun sekä jatkaa muiden sektoreiden valvontaa kuitenkin minimoiden säteilytehon ohjuksen suuntaan. Tämä pienentää lukittumisetäisyyttä.



Kuva 294: Esimerkki lentorynnäkön kulusta.

Tutkasäteilyyn hakeutuvilta ohjuksilta suojautuminen edellyttää siis:

1. riittävää tilannetietoisuutta (mitä maaleja valvottavassa tilassa on ja minkälaisen uhkan ne muodostavat)

2. tutkien koordinoitua käyttöä (mikä tutka milloinkin lähettää mihinkin suuntaan)
3. sensorifuusiota (maalitilannekuva perustuu passiivisiin sensoreihin ja aktiivisia tutkia käytetään vain silloin kun passiivisin menetelmin ei saada riittäviä tietoja)
4. tutkien sivukeilatasojen pienentämistä tasolle, joka estää ohjuksen lukittumisen pääkeilan ulkopuolelta.
5. osumistodennäköisyyden pienentämistä harhamaalein
6. elektronisen keilauksen käyttöönottoa
7. aktiivista omasuojajärjestelmää tärkeimpien tutkajärjestelmien suojaamiseksi

Ohjusuhalta suojautumista on kuitenkin tarkasteltava muiden tuhoutumisriskien kanssa rinnan. Tämän johdosta tutkien suojauksessa on usein luovuttu omasuojalaitteiden hankinnasta. Operaattoreiden toimintatavalla, tutkan rakenneratkaisuilla ja tutkan toimintatapaan vaikuttavilla ohjausmenetelmillä onkin monessa yhteydessä todettu saavutettavan tarkoituksenmukaisin suojautumistaso.

HERÄTESYTYTTIMET

Herätesytytin on laite, joka räjäyttää ammuksen tai ohjuksen taistelulatauksen oikealla etäisyydellä maalista. Oikea räjäytysetäisyys on tärkeä, sillä esimerkiksi ontelokranaatin läpäisykyky riippuu olennaisesti ammuksen ja maalin välimatkasta räjähdysketkellä. Herätesytyttimillä tykistökranaatti saadaan räjähtämään ilmassa, jolloin sirpalevaikutus kaivautunutta vihollista vastaan on mahdollisimman suuri. Ilmatorjunta-ammusten ja ohjusten ei yleensä edellytetä osuvan suoraan kohteena olevaan lentokoneeseen tai helikopteriin, vaan tuho vaikutus syntyy aika- tai herätesytyttimellä maalin lähellä räjähtävän ammuksen sirpalevaikutuksesta. Herätesytyttinten toiminta on siten olennaisen tärkeätä järjestelmän kannalta. Ja aivan yhtä tärkeätä on herätesytyttimen häirintä omasuojajärjestelmälle.

Radiotaajuiset herätesytyttimet

Herätesytyttimet perustuvat joko optiseen tai radiotaajuiseen säteilyyn. Radiotaajuisen sytyttinten etuna on niiden kyky toimia kaikissa sääolosuhteissa. Vanhat herätesytyttimet ovat toimineet muutamien satojen megahertsien taajuuksilla, mutta nykyisin herätesytyttimissä käytetään yleensä yli 1 GHz taajuuksia ja toimintaperiaatteena dopplertutkaa. Mikäli sytyttimessä käytetään esimerkiksi jotakin hapen resonanssitaajuutta, voidaan saada olennaista suojaa häirinnältä ja estää signaalin pääsy omasuojajärjestelmien varoittimiin. Vastatoimienpiteenä radiotaajuisia herätesytyttimiä vastaan voidaan käyttää kohinahäirintää tai toistavaa häirintää. Nykyteknologia mahdollistaa kuitenkin valesatunnaisen modulointisignaalin hyväksikäytön herätesytyttimessä, jolloin toistohäirintä ei käytännössä tehoa mahdotonta. Kohinahäirinnällä voidaan pyrkiä peittämään tutkakaiku häirintälähtetimen lähettämän kohinan sekaan. Tämän vaikeuttamiseksi herätesytyttimessä voidaan käyttää spektrin levitystä taajuus- tai vaihemodulaation avulla. Sytyttimen lähetin voidaan käynnistää aikautuksella, millä pyritään, siihen, että sytyttimen aktivoituessa ammus tai ohjus on niin lähellä maalia, ettei sen omasuojajärjestelmä ehdi reagoida.

Optiset herätesytyttimet

Vaihtoehtona radiotaajuisille herätesytyttimille voidaan käyttää optisia aallonpituuksia, yleensä infrapuna-alueita. Aktiivinen herätesytytin voi mitata kohteesta heijastuvan säteilyn intensiteetin muutosta. Tällaisessa sytyttimessä käytetään usein lähettimenä valodiodia (LED, Light Emitting Diode). LED:ä ei voida kuitenkaan käyttää pidemmällä mittausetäisyyksillä, jolloin joudutaan käyttämään laserdiodia. Mittausmenetelmä voi tällöin perustua sytyttimestä lähetettävän ja maalista heijastuvana pulssin kulku-aikaan, tai moduloidun lähetteen ja palaavan heijasteen vaihe-eroon. Häirinnän väistämiseksi voidaan käyttää valesatunnaista pulssinvälialiaika-avainnusta (PIK, Pulse Interval Keying), jolloin häirintäjärjestelmän lähettämät pulssit vaikuttavat tulevan satunnaisilta etäisyyksiltä. Sytyttimen logiikka voi tällöin hylätä kaikki epäloogiset pulssit: sytytinhan kykenee päättelemään, että koska mittausetäisyys kohteeseen lyhenee lähes lineaarisesti, kaikki muut vastaanotetut pulssit ovat vääriä. Valesatunnaisen koodin vuoksi häirintäjärjestelmä ei kykene luomaan loogisesti etenevää harhauttavaa signaalijonoa, vaan joutuu tyytymään jatkuvaan häirintään. Tämä jakaa häirintä-energian aikatasossa, kun sytytin taas voi keskittää energiansa pulsseihin. Omasuojajärjestelmän häirintäjärjestelmän on kyettävä kyllästämään sytyttimen etupää, mikä saattaa olla vaikeata, sillä optisen herätesytyttimen kapeahko näkökenttä vaikeuttaa häirintäsignaalin saattamista sytyttimen ilmaisimeen. Häirintä voidaan perustaa myös omasuojaheitteenä käytettävään IR-suoja-asavuun tai sumuun, jolloin herätesytytin joko räjähtää kohdatessaan suojaverhon, tai ammus tai ohjus joutuu turvautumaan varalla olevaan iskusytyttimeen.

HÄIRINTÄJÄRJESTELMÄT

Elektroninen häirintä

Elektroninen häirintä oli pitkään erityisesti viesti- ja tutkajärjestelmiä vastaan tarkoitettu erillinen taistelumuoto. Nykyisin häirintä on kiinteä osa kokonaisasevaikutusta, minkä vuoksi häirintäjärjestelmiä käsitellään tässä kirjassa muiden elektroniikkaan perustuvien asejärjestelmien yhteydessä. Häirinnän vaikutusmekanismeja sen sijaan on käsitelty erikseen viesti-, sensori-, ja asejärjestelmäluvuissa eri teknologioiden ja järjestelmien yhteydessä.

Häirintäjärjestelmän tavoitteena on lamauttaa maalina oleva vihollisen järjestelmä sähkömagneettisen säteilyn avulla. Lamauttamisella tarkoitetaan tässä sitä, että maalina olevan kohteen normaali toiminta estyy häirinnän aikana. Kun häirintä lopetetaan tai kohdennetaan uudelleen, palautuu vihollisen kyky hyödyntää häiritettyä järjestelmää. Häirinnän vaikutus on siten ajallisesti ja paikallisesti rajoitettu. Häirintä voi kohdistua

- Tiedustelu- ja valvontajärjestelmiin, kuten tutka, ESM, ELINT, lämpökamera.
- Viestijärjestelmiin, kuten kenttäradioverkot, solukkoverkkojen liityntä, langattomat liityntäjärjestelmät, runkoverkot, satelliittitietoliikenne.
- Paikannusjärjestelmiin, kuten satelliittipaikannus, radiopaikannus, maastonseuranta ja korkeudenmittaus.
- Asejärjestelmien sensoreihin, komentolinkkiin tai herätesytyttimeen.

Häirinnän tarkoitus voi olla häirintäalustan omasuoja (self-protection jammer), muun lähistöllä olevan joukon tai muiden alustojen suojaaminen (escort jammer), taikka tietyn sektorin

suojaaminen etäältä (stand-off jammer, tai läheltä (stand-in jammer). Häirintälähetin voi olla myös kertakäyttöinen (expandable jammer) lennokilla, tykistöllä tai jalkapartion toimenpitein alueelle toimitettava. Häirintään voidaan käyttää lukuisia eri tyyppisiä lavetteja, kuten:

- Taistelija:** Kannettavat joukkueen tai komppanian taistelun välittömään tukemiseen tarkoitetut häirintälähetimet, kantama yleensä alle kilometrin, esimerkiksi peiteisessä maastossa kantama on tyypillisesti joitakin satoja metrejä.
- Ajoneuvo:** Panssaroitu tai panssaroimaton pyörä- tai tela-ajoneuvo, johon asennettu yhtymän taistelun välittömään tukemiseen tarkoitettuja häirintälähettimiä, joiden kantama on kymmeniä tai jopa satoja kilometrejä.
- Lennokki:** Ilma- tai maasotatoimien tukemiseen tarkoitettu ylemmän johtoportaahan häirintäalusta, jolla luodaan nopeasti häirintävaikutus painopistealueelle. Häirinnän kantama on muutamia kymmeniä kilometrejä. Lennokin yhtenä perusideana on se, että siihen voidaan asentaa taistelutilanteen mukaisesti erilaisia hyötykuormia, joten erityisen häirintälennokin kehittäminen ei ole mielekäästä. Todennäköisemmin häirintään käytetään yleiskäyttöisiä lennokeita, jotka varustetaan tarpeen mukaisesti tiedustelu- ja valvontasensoreilla tai tulenjohtoja häirintäjärjestelmillä.



Kuva 295: EADS Ewation suunnittelema lennokki, jonka hyötykuormaksi on mahdollista varustaa joko häirintä- tai tiedustelujärjestelmä. [EADS Ewation]

- Helikopteri:** Ylemmän johtoportaahan ase häirinnän painopisteen luomiseen, etulinjan joukkojen täydelliseen lamauttamiseen ja vaikutuksen ulottamiseen syvälle vihollisen selustaan. Esimerkiksi amerikkalainen Quick Fix.

Taktinen häirintälentokone:

Lavettina on tyypillisesti vanhasta rynnäkkökoneesta modifioitu häirintään erikoistunut lentokone, kuten EA-6B Prowler ja EF-111 Raven. Käytetään yleensä rynnäkköosaston suojaamiseen ilmatorjunnalta.

Operatiivinen häirintälentokone:

Lavettina on yleensä suuri ja hitaasti lentävä kuljetus koneesta modifioitu lentokone, kuten C-130 koneesta modifioitu EC-130 Compass Call, jota käytetään ilmatorjunnan ja johtamisyhteyksien lamauttamiseen.

Pienikokoisia lähihäirintälähtimiä voidaan toimittaa kohdealueelle myös kantoammuksilla, kuormaraketeilla tai sissitoiminnalla, ja ne voidaan jättää vetäydyttäessä kohdealueelle. Tällainen lähihäirintälähetin voi pysytellä jonkin aikaa hiljaa ja alkaa häiritä kellon ohjaamana. Älykäs lähihäirintälähetin voi myös tarkkailla spektriä ja aloittaa häirintänsä vasta havaittuaan radioliikennettä tai tutkasignaaleja. Älykäs lähihäirintälähetin toimii siten elektronisen miinan tavoin.

Häirintäsignaali

Häirintäsignaali voi olla tarkoitettu maalina olevan järjestelmän harhauttamiseen (deception jamming) tai normaalin toiminnan estämiseen. Harhauttavassa häirinnässä pyritään imitoimaan järjestelmän omaa lähetettä. Helpoin tapa toteuttaa harhauttava häirintä on tallentaa vastaanotettu signaali digitaaliseen muistiin ja toistaa lähete pienellä viipeellä. Tutkajärjestelmissä tätä menetelmää käytetään pääsääntöisesti seurantatutkia vastaan, jotta tutka tulkitseisi harhautuslähetteen tutkakaiuksi ja määrittäisi siten maalin kulman ja etäisyyden väärin. Viestijärjestelmissä harhautusta käytetään sanomaverkkojen tukkimiseen ja sekaannuksen synnyttämiseen puheverkoissa. Tutka- ja salausteknologian kehittyminen ja salaustekniikoiden yleistymisen on kuitenkin johtanut siihen, että oikein suunniteltuja järjestelmiä on lähes mahdoton harhauttaa. Siten järjestelmän toiminnan lamauttaminen on tehokkain häirinnän muoto. Lamauttavassa häirinnässä optimaalinen signaalimuoto on teoreettisesti kohina (noise jamming), joka muistuttaa mahdollisimman paljon vastaanottimen omaa lämpökohinaa. Tällöin häirintäsignaalia ei voida erottaa vastaanottimen omasta pohjakohinasta.

Häirintäjärjestelmä koostuu yhdestä tai useammasta häirintälähtimestä sekä niihin liitetystä tai integroidusta tiedustelujärjestelmästä. Tiedustelujärjestelmä vastaa signaalien sieppaamisesta, ominaisuuksien erittelystä, käyttötarkoituksen analysoimisesta sekä luokittelusta. Häirintäjärjestelmä vastaa havaittujen ja tärkeiksi luokiteltujen viestiyhteyksien katkaisemisesta. Häirintälähtimiä on tyypillisesti 2-3 yhdessä järjestelmässä; yhden häiritessä toinen siirtyy uuteen asemapaikkaan ja kolmas valmistautuu häirintään. Tässä vaiheessa keskitytään käsittelemään häirintäjärjestelmän toimintaa, sillä tiedustelujärjestelmät käydään läpi *sensorijärjestelmät* -luvussa. Tärkeimmät häirintälähtimen ominaisuuksia kuvaavat parametrit ovat:

- Häirintäteho (EIRP:na)
- Häirintäsignaalin kaistanleveys; laaja- tai kapeakaistainen
- Häirintäsignaalin pulssitus; jatkuva tai pulssitettu

- Häirintälähetteen tyyppi; modulaatiolaji sekä modulointinopeus
- Häirintäsignaalin taajuus; kiinteä tai pyyhkivä
- Häirintäsignaalin lähetysaika; jatkuva tai reagoiva, reagointinopeus
- Harhauttavan signaalin muodostaminen
- Häirinnän kohde; RF-etupää, välitaajuus, ilmaisin
- Häirintälähetteen polarisaatio; yleensä sama tai mahdollisimman lähellä kuin häiritävällä järjestelmällä

Häirintäteho riippuu käytettävissä olevasta lähetystehosta ja antennivahvistuksesta. Lähettimen teho riippuu häirintäjärjestelmässä käytettävästä teknologiasta sekä suurimmasta sallitusta fyysisestä koosta, painosta ja lämpökuormasta. Lisäksi häirintäjärjestelmän – kuten kaikkien sotavarusteiden – hankinta-, käyttö-, koulutus-, varastointi- ja ylläpitokustannukset asettavat omat rajansa käytettävissä oleville teknologioille ja toteutettaville rakenteille. Putkilähettimillä voidaan saada suuria lähetystehoja, mutta ne ovat kalliita, suurikokoisia ja painavia. Puolijohteilla voidaan toteuttaa suhteellisen pienitehoisia ja -kokoisia sekä keveitä ja verrattain halpoja häirintäjärjestelmiä. Tarvittaessa häirintäjärjestelmän kokonaistehoa voidaan lisätä käyttämällä useampia rinnakkaisia RF-pääteasteita. VHF-taajuuksilla voidaan saavuttaa 100 W – 10 kW suuruisia häirintätehoja yksittäisillä lähettimillä, mutta käytettävissä oleva häirintäteho laskee taajuuden kasvaessa aluksi kääntäen verrannollisena käytettävään taajuuteen ja EHF-alueella kääntäen verrannollisena taajuuden neliöön.

Antennivahvistusta lisäämällä voidaan nostaa EIRP:ä. Toisaalta antennivahvistuksen lisääminen kaventaa häiritävissä olevaa sektoria. Joissakin häirintäjärjestelmissä, kuten HF-häirintäjärjestelmissä, käytetään ympärisäteileviä monopoli- tai dipoliantenneja, joilla voidaan kattaa koko 360 asteen sektori. Ympärisäteilevän antennin käyttö on ainoa mahdollisuus esimerkiksi lähihäirintälähettimissä, joiden sijoittumista häiritävään lähettimeen nähden ei voida tietää etukäteen. Sen sijaan omien linjojen takaa toimivien häirintälähetinten ei yleensä kannata häiritä 360 asteen sektoria, vaan häirintä voidaan keskittää 90 - 180 asteen sektoriin. Ohjattavien antenniryhmien kehittyessä ja halvetessa tultaneen ottamaan käyttöön täsmähäirintälähettimeitä, jotka ensin suuntivat aktiiviset lähettimet ja sen jälkeen kohdentavat häirintätehon niihin. Täsmähäirintäjärjestelmä voi saada maalinsoituksen myös muilta sensoreilta, esimerkiksi tutkavalvontalentokoneelta tai lennokilta.



Kuva 297: Norjan armeijan käyttämä HF-V/UHF häirintäjärjestelmä Tor, joka on saanut nimensä viikinkitarujen jumalan Odinin pojan mukaan. Häirintäjärjestelmä on asennettu Suomessa valmistettuun raskaaseen P6 telakuorma-autoon. [EADS Ewation]

Taulukossa 22 on esitetty joidenkin häirintäjärjestelmien ominaisuuksia. Taulukosta voidaan havaita, että suurin osa häirintäjärjestelmän tärkeistä parametreista pidetään salaisina. Tämän vuoksi julkisissa lähteissä esitetään yleensä toissijaisia parametreja, kuten lähettimen paino ja tehonkulutus. Eri järjestelmien suorituskykyä voidaan kuitenkin arvioida varsin tarkasti selvittämällä, minkä aikakauden teknologialla järjestelmä on toteutettu ja kuinka paljon se vie tilaa, painaa ja kuluttaa tehoa. Nykyaikaisten hyppivätaajuisten tai laajakaistaisten läheteiden häirintä ei enää onnistu normaaliolosuhteissa pelkällä raa'alla voimalla, vaan häirintäjärjestelmien ohjelmoitavuus ja älykkyys ovat vähintään yhtä tärkeitä kuin häirintäteho. Tämän vuoksi häirintäjärjestelmien perinteiset parametrit kuten pyyhkäisy nopeus, häirintäteho, modulaatiot tai kaistanleveydet eivät enää ole niin salaisia kuin ennen pelkkien kiinteätaajuisten analogisten läheteiden aikakaudella.

Kapeakaistaisella kohinalla pyritään häiritsemään yhtä viestijärjestelmän siirtokanavaa. Laajakaistaisella kohinalla vaikutetaan useisiin kanaviin samanaikaisesti. Sitä käytetään, kun ei tiedetä millä taajuudella signaali sijaitsee tai miten signaalin energia on jakautunut spektriin. Mitä laajemmalle kaistalle häirintäjärjestelmä joutuu jakamaan tehonsa, sitä pienemmäksi muodostuu tehotiheys yksittäisellä kanavalla – toisaalta samanaikaisesti häirittyjen kanavien määrä on suurempi. Kapeakaistainen häirintä edellyttää signaalin taajuuden tarkkaa mittaamista, mikä ei muodostu ongelmaksi toimittaessa perinteisiä viestijärjestelmiä vastaan. Sen sijaan esimerkiksi hajaspektriläheteen kaistan mittaaminen on huomattavasti vaikeampaa, jolloin häirintäjärjestelmä saattaa joutua ulottamaan tehonsa signaalia laajemmalle kaistalle. Laajan kaistan käyttö on perusteltua myös teknisesti yksinkertaisissa lähettimissä, jotka eivät kykene tarkkailemaan kohteen käyttämiä taajuuksia ja ohjaamaan häirintää oikeille kanaville. Esimerkiksi pienikokoiset lennokki- ja lähihäirintäjärjestelmät ovat useim-

miten tällaisia yksinkertaisia laajakaistaisia häirintäjärjestelmiä. Piiriteknologian kehitys lisää kuitenkin myös pienikokoisten häirintälähetinten älykkyyttä, joten ennen pitkää myös ne kykenevät älykkääseen kapeakaistaiseen häirintään.

Valmistaja	Maa	Tyyppi	Käyttö	Alusta	Taajuus	EIRP	Antenni	Aika	ESM	LT
ASELAN	Turkki	JAMINT-3	viesti	ajoneuvo	20 – 500	50–2000	logp	on	on	
BAe	Australia	RIOT	viesti	kannettava	20 – 170	5	piiska	0,3 s	on	on
Daimler-B	Saksa	Hummel	viesti	ajoneuvo	VHF	2000			on	on
Daimler-B	Saksa	SGS-2300	viesti	ajoneuvo	1 – 500	1			on	on
Elta Electr.	Israel	EL/L8222	omas.	lentokone	6 – 18G	200	torvi/linssi	on	on	
Lokheed-M	USA	AN/ALQ178	omas.	lentokone	E-J	>300	torvi	<1 s	on	on
Rodale Ele.	USA	AN/ALQ167	omas.	lentokone	1 – 18 G	> 1 kW		250 ns	on	
Tadiran	Israel	TAJS	viesti	ajoneuvo	1,5–1000	1 kW	piiska	on	on	
Thomson	Ranska	TRC274	viesti	kaikki	1 – 1000	1 kW	suunt/ymp.	on	on	
Tracor	USA	TACJAM	viesti	kannettava	20 – 500	20 tai 100	logp.	on	on	

Selityksiä: Käyttö: Viesti = viestijärjestelmiä vastaan, omas. = alustan omasuojahäirintäjärjestelmä
 Taajuus: MHz, ellei toisin ole ilmoitettu.
 Antenni: logp = logperiodinen, suunt. = suuntaava, ymp. = ympärisäteilevä.
 Aika: Aika signaalin havaitsemisesta häirinnän aloittamiseen.
 ESM: integroitu häirinnän elektroninen tukitoiminto.
 LT: look-through-toiminto (lähetin kykenee valvomaan kaistaa häirinnän aikana).

Taulukko 22: Eri häirintäjärjestelmien toiminnallisia ominaisuuksia. [Lähde: Don Herskovitz; A Sampling of EW Jammers. Journal of Electronic Defence. Syyskuu 1998, Vol. 21, Nro. 9]

Yleensä häirintäjärjestelmä pyrkii käyttämään vain niin suurta tehoa, että se juuri ja juuri riittää yhteyden katkaisemiseen. Suurimman häirintätehon määrää suurin käytettävissä oleva hetkellinen teho sekä keskimääräinen häirintäteho. Edellinen määräytyy järjestelmän tehovahvistinten tehon siedosta ja jälkimmäinen käytettävissä olevan teholähteen (esimerkiksi voimakoneen tai akun) maksimikuormituksesta tai häirintälähettimen lämpenemisestä johtuvasta rajoituksesta. Mikäli järjestelmän keskimääräinen häirintäteho muodostuu rajoitukseksi, voidaan maksimitehoa kasvattaa lähetinkomponenttien kestopajaan saakka *pulssimuotoisella häirinnällä* lyhentämällä lähetysaikaa.

Häirintäsignaalina voidaan käyttää esimerkiksi AM- tai FM-moduloitua kohinaa, tai satunnaista ASK-, FSK- tai PSK-avainnettua dataa. Paras häirintäsignaali on kuitenkin sama kuin häirittävän järjestelmän oma signaali, koska vastaanotin on optimoitu vastaanottamaan juuri sentyyppistä energiaa. Siten PSK-järjestelmään kyetään siirtämään häirintätehoa parhaiten lähettämällä satunnaisella datalla avainnettua PSK-signaalia samalla kaistalla ja samalla nopeudella kuin häirittävä järjestelmä itsekin toimii. FSK-järjestelmää kyetään kuitenkin häiritsemään tehokkaammin kokoamalla häirintäenergia yhden symbolin taajuudelle.

Häirintäsignaalin keskitaajuuden on luonnollisesti vastattava häirittävän signaalin keskitaajuutta. Joissakin tapauksissa käytetään kuitenkin pyyhkäisevää häirintää, jossa häirintäsignaalin taajuutta muutetaan ajan funktiona niin, että häirintäsignaali pyyhkii häirittävän kaistan yli. Tästä nimitys *pyyhkäisyhäirintä*, jossa häirintälähetin askeltaa ennalta asetetuin kanavaväleihin halutun taajuusalueen yli. Häirittävän kanavan kannalta pyyhkäisyhäirintä vastaa pulssimuotoista häirintää. Pyyhkäisyhäirinnän tehokkuuteen vaikuttaa myös kanavalla vietetyt häirinnän aika. Mikäli yhden kanavan häirintäaika on liian lyhyt verrattuna hyötylähteen symbolinopeuteen, ei häirinnällä ole mitään vaikutusta. Näin ollen yhdellä kanavalla tulee häiritä riittävän kauan, jotta voidaan olla varmoja, ettei virhekorjauskoodi kykene korjaamaan häirittyä lähetettä. Häirintäsignaalin taajuuspyyhkäisy on kuitenkin suhteellisen

helppo toteuttaa ja jos häirintäteho on muutoinkin riittävä, ei sen jakautuminen kahdelle eri signaalikanavalle ole suuri ongelma.

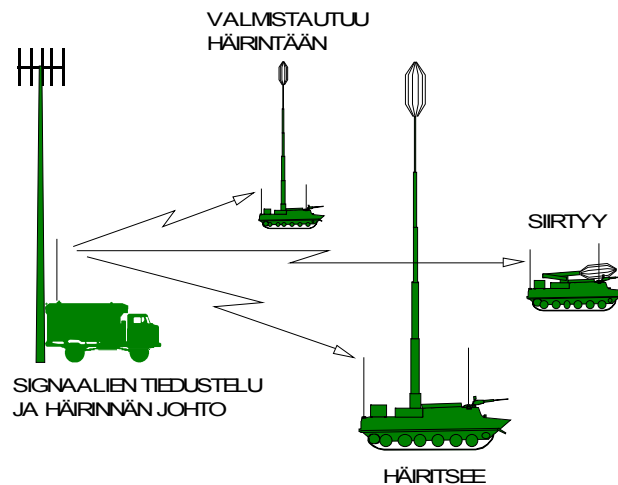


Kuva 298: Taktisten ja strategisten HF-lähetteen häirintään tarkoitettu HF-häirintä-asema. [EADS Ewation]

Häirintäsignaalia voidaan lähettää joko jatkuvasti tai pulssitettuna. Häirintä voidaan toteuttaa reagoivana, jolloin häirintä aktivoidaan vain silloin kun viestijärjestelmän lähettimen signaali saadaan siepattua. Tällöin häirintälähetin ei paljastu niin nopeasti ja niin suurella todennäköisyydellä kuin jatkuvasti häirintäsignaalia lähettävä järjestelmä. Esimerkiksi häirittävän viestijärjestelmän operaattorit voivat jopa olla täysin tietämättömiä häirinnästä, koska sitä ei kuulu silloin kun hyötylähetin ei lähetä. Ja kun hyötylähetin alkaa lähetyksensä, on lähetteen seasta vaikea erottaa taitavasti toteutettua häirintäsignaalia.

Harhauttavassa häirinnässä pyritään lähettämään oikean signaalin ja viestin mukaista lähetettä ja saada vastaanottaja uskomaan lähetteen aitouteen. Vanhalla tekniikalla toteutetuissa järjestelmissä kyetään käyttämään oikeakielistä puhetta vihollisen harhauttamiseen. Nykytekniikalla toteutetut salauslaitteet ja lähettäjän tunnistavat autentisointijärjestelmät estävät harhauttavan tiedon syöttämisen viestijärjestelmiin. Joissakin häirintäjärjestelmissä

käytetään signaalin nauhoittamista tai tallentamista digitaaliseen muistiin sekä toistamista suurella teholla useita kertoja. Tällä pyritään toisaalta harhauttamaan vastaanottavaa järjestelmää uskomaan lähete aidoksi ja toisaalta matkimaan lähetettä mahdollisimman suuren häirintätehon saamiseksi vastaanottimen ilmaisimelle. Tavoitteena on myös kyllästyttää kohteena oleva sanomaverkko sen omilla sanomilla niin, että sen sanomien käsittely- ja siirtokapasiteetti loppuvat kesken.



Kuva 299: Kolmesta häirintäajoneuvosta sekä erillisestä signaalitiedusteluajoneuvosta koostuva taktinen häirintäjärjestelmä.

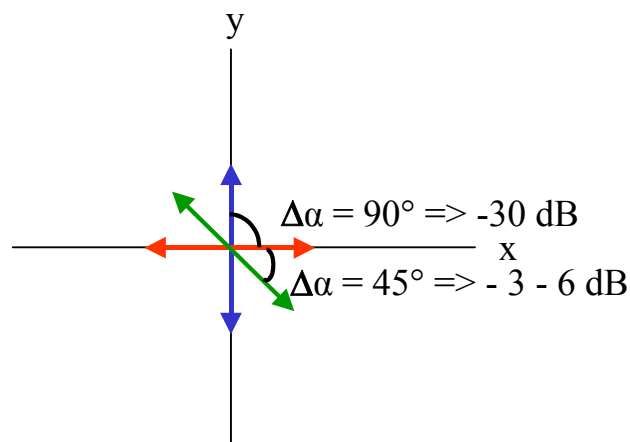
Häirintäjärjestelmällä pyritään saamaan vastaanotin sieppaamaan mahdollisimman suuri osa häirintätehotiheydestä ja välittämään se vaimentumatta ilmaisimelle, jossa häirintäteho kilpaillee hyötysignaalin kanssa siitä, kykeneekö ilmaisimelle tulkitsemaan hyötylähetteen symbolin oikein. Joissakin tapauksissa voidaan kuitenkin käyttää niin sanottua *impulssihäirintää*, jossa lähetetään hyvin lyhyt, mutta suuritehoinen häirintäsignaali. Jos vastaanottimen välitaajuuskaista on kapea, sen impulssivaste aikatasossa on pitkä. Tällöin lyhyt voimakas häirintäimpulssi saa vastaanottimen ”soimaan”, eli värähtelemään, jolloin hyötylähete sotkeutuu. Värähtelyn vaimeneminen kestää jonkin aikaa, jolloin vastaanotin ei kykene vastaanottamaan hyötylähetettä. Vastaanottimen toivottua edellisestä pulssista häirintäjärjestelmä lähettää uuden impulssin ja vastaanotto estyy taas. Supervastaanottimeen perustuvissa viestijärjestelmissä häirintäteho voidaan keskittää välitaajuuden (IF, Intermediate Frequency) häirintään. Vaikka viestisignaalin taajuutta voidaan muuttaa, on välitaajuus yleensä kiinteä. Siten samalla häirintätaajuudella voidaan vaikuttaa kaikkiin samantyyppisiin vastaanottimiin. Menetelmän ongelmana on kuitenkin nykyisten viestijärjestelmien hyvin suuri välitaajuusvaimennus, jolla tarkoitetaan laitteen ulkopuolella olevan välitaajuuden signaalin vaimenemista IF-piiriin verrattuna. Käytännössä välitaajuushäirintä on sen vuoksi huonompi vaihtoehto kuin pulssitettu tai pyyhkäisevä käyttötaajuuden häirintä.

Häirintäsignaalin polarisaation on vastattava mahdollisimman suurella määrällä kohdejärjestelmän polarisaatiota, muuten häirintäenergiaa ei saada vastaanottimelle asti. Vastaanotinjärjestelmä vaimentaa hyvin paljon signaalia, jonka polarisaatio on vastakkainen järjestelmän polarisaation nähden. Nyrkkisääntönä voidaan pitää 30 dB vaimennusta mikäli lähetys- ja vastaanottoantennit ovat lineaarisesti polarisoituja mutta 90° kulmassa toisiaan nähden. 45 asteen erokulmalla vaimennus on teoriassa 3 dB.



Kuva 300: Saksalainen Hummel-häirintäjärjestelmä. [EADS ewation]

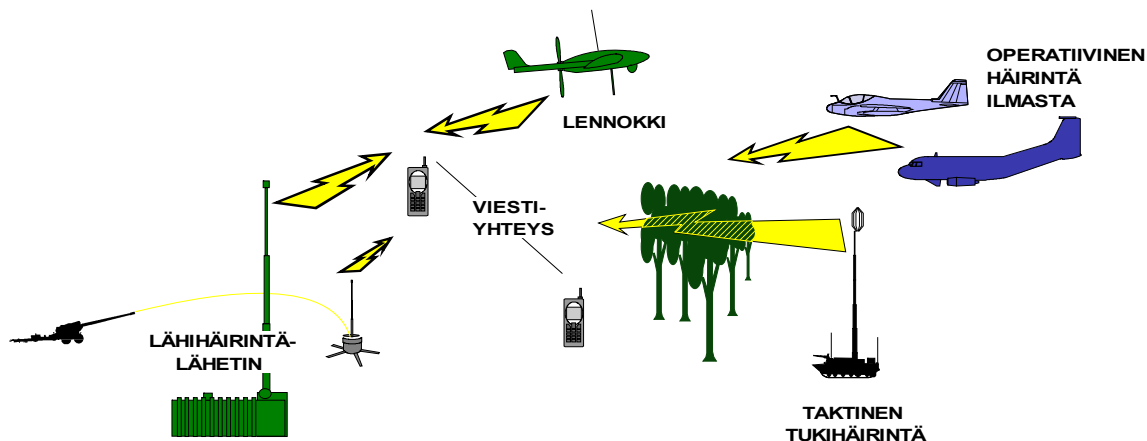
Vastaavanlainen vaikutus on myös elliptisten polarisaatioiden ja ympyräpolarisaatioiden vastaanotossa. Mikäli ympyräpolarisaatioiden kiertosuunta on vastakkainen, syntyy teoriassa ääretön vaimennus, jolloin häirintä ei vaikuta häiritävään kohteeseen. Käytännössä osa häirintäsignaalista pääsee aina vastaanottimelle. Elliptisten polarisaatioiden kallistuskulmien eron ollessa 90° syntyy yhteysvälille n. 20 - 30 dB ylimääräinen vaimennus ja 45° kulmaerolla n. 3 dB vaimennus.



Kuva 301: Lineaaristen polarisaatioiden kulmaeroista johtuvat ylimääräiset yhteysvälin vaimennukset voidaan approksimoida 90° kulmaerolla 30 dB ja 45° kulmalla 3 dB:ksi.

Häirintäjärjestelmän tyyppi

Häirintäjärjestelmä voidaan rakentaa suuritehoiseksi – ja samalla suurikokoiseksi ja painavaksi – tai pienikokoiseksi – ja siten pienitehoiseksi tai lyhytkestoiseksi. Suuritehoiset taktiset häirintäjärjestelmät asennetaan yleensä panssaroiuihin ajoneuvoihin, Suomessa esimerkiksi BTR-50-tela-alustalle tai Sisu NA-140-telakuorma-autoihin. Häirintäteho on alemmalla VHF-kaistalla yli 10 kW, UHF-alueen alkupäässä yli kilowatin ja SHF-alueen alussa yli 100 W.



Kuva 302: Viestijärjestelmää voidaan häiritä maasta ja ilmasta. Ilmasta tai hyvin läheltä maasta lähihäirintälähettimin suoritettu häirintä on tehokkainta.

Ilmasta suoritettu häirintä on monessa suhteessa tehokkaampaa kuin maasta käsin tehtävä häirintä. Suurin hyöty on pieni etenemisvaimennus häirintälähtimeltä vastaanottimelle, koska eteneminen tapahtuu vapaassa tilassa, jolloin vaimennus kasvaa verrannollisena etäisyyden neliöön. Maata pitkin etenevä aalto vaimenee käytännössä neljänteen potenssiin verrattuna. Toinen merkittävä seikka ilmalavettisten häirintälähtimien käytölle on radiohorisontin kasvattaminen huomattavasti suuremmaksi verrattuna maanpäältä toteutettuun häirintään. Ilmasta häirintä voidaan kohdentaa nopeasti taistelukentän eri sektoreille ja ulottaa vihollisen selustaan saakka. Lisäksi kaukana vihollisen hallitseman alueen päällä lentävää häirintälentokonetta on vaikeampi lamauttaa kuin muutaman kilometrin päässä sijaitsevaa häirintäajoneuvoa. Lentokoneisiin asennetut taistelukentän viesti- ja sensorijärjestelmiä vastaan toimivat häirintäjärjestelmät ovat suurempikokoisia ja isompitehoisia, mutta kuitenkin samassa teholuokassa kuin edellä mainitut järjestelmät. Lentokoneisiin sijoitetut järjestelmät ovat yleensä strategisen johtoportaan järjestelmiä, joilla pyritään vaikuttamaan syvälle selustaan saakka lähestulkoon kaikkiin tutka- ja viestijärjestelmiin. Nykyisin on yleistynyt suuntaus sijoittaa häirintäjärjestelmiä myös helikoptereihin, joissa yhdistyvät ilmasta suoritettun häirinnän edut taktisen järjestelmän reagointinopeuteen.

Lennoikkien yleistymisen myötä niitä varustetaan myös tiedustelu- ja häirintäjärjestelmillä. Lennokissa joudutaan käyttämään pienitehoisia ja -kokoisia komponentteja, minkä vuoksi häirintäteho on VHF-alueella maksimissaan muutama sata wattia ja UHF-alueella kymmeniä watteja. Lennokki kykenee kompensoimaan pienen häirintätehonsa suorittamalla häirintää hyvin läheltä, jopa häirittävän yhtymän päältä. Pieni häirintäteho vähentää häirinnän vaikutusta myös omiin joukkoihin, eli omien yhteyksien häirintää (jamming fracticide). Lennokkia pidetään tällä hetkellä kustannustehokkaimpana häirintäalustana, koska siinä yhdistyy

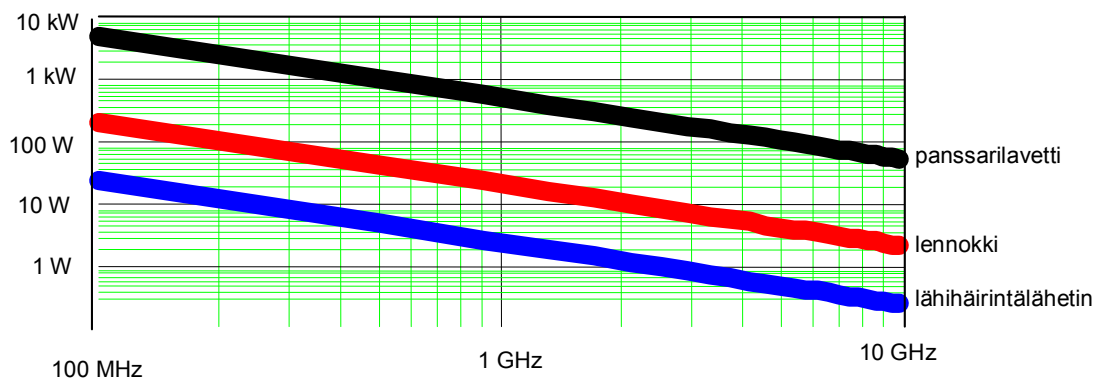
painopisteen luomisen nopeus, vaikea tuhottavuus, suuri häirintävaikutus ja muihin ilma-
aluksiin verrattuna pieni kokonaiskustannus.



Kuva 303: Ylhäällä tykistön kantoammuk-
sella maalialueelle toimitettava bulgarialai-
nen R-045-lähihäirintälähetin lappeellaan
maassa. Oikealla häirintälähetin toiminta-
asennossa. Iskeydyttyään maahan lähetin
nostaa antennin ylös ja ryhtyy toteuttamaan
ennalta ohjelmoitua häirintätehtävää.

[SA-kuva]

Nykytekniikka mahdollistaa pienikokoisten ja halpojen häirintäjärjestelmien toteuttamisen, jopa niin halpojen, että häirintäjärjestelmiä voidaan toimittaa kohdealueelle kertakäyttöisinä. Kertakäyttöiset häirintälähetimet ovat pienitehoisia ja –kokoisia yksinkertaisia lähetinjärjestelmiä, joiden toimintasäde on pieni, mistä ne ovat saaneet suomenkielisen nimityksen *lähihäirintälähetin*. Englanninkielinen nimitys on näille miehittämätön häirintälähetin, unattended jammer, UAJ. Lähihäirintälähetimet voidaan toimittaa kohteeseensa sissijoukoilla, tykistön tai raketinheittimistön kantoammuksilla tai sirotepommeilla. Ne voidaan myös jättää vetäydyttäessä todennäköisille vihollisen etenemisreiteille, tuliasema-alueille tai esikuntien sijoituspaikoille. Ne voivat aktivoitua joko itsenäisesti herätteestä tai ne voidaan aktivoida joko radiokomennolla tai ajastimella, jolloin ne muodostavat eräänlaisia elektronisia miinakenttiä. Lähihäirintälähettimen lähetysteho rajoittaa komponenttitekniikan lisäksi järjestelmän teholähteenä toimivan pariston rajallinen energia ja siitä saatava suurin hetkellinen teho.



Kuva 304: Esimerkki panssariajoneuvon ja lennokkiin sijoitetun häirintäjärjestelmän sekä lähihäirintäjärjestelmän häirintätehoista taajuuden funktiona.

Häirintäjärjestelmän suurimpana uhkana on välitön vastatoimenpide sen jälkeen kun elektroninen tukitoiminta (ESM) on havainnut ja paikantanut lähettimen. Maahan sijoitettu häirintälähetin voidaan pyrkiä tuhoamaan tai lamauttamaan epäsuoran tulen tai häirintälähetteen hakeutuvan ohjuksen avulla; tutkaan hakeutuvia ohjuksia voidaan käyttää myös häirintälähettimien tuhoamiseen⁴². Vastaavasti ilmasta häiritsevä lähetin voidaan pyrkiä ampumaan alas lähetteen tai alustan lämpö- tai tutkasignaaliin hakeutuvan ohjuksen avulla. Vastatoimenpiteiden haittaamiseksi häirintäjärjestelmän on oltava mahdollisimman liikkuva ja sen signaalin infrapuna- ja tutka-alueilla tulisi olla mahdollisimman pieni.

Häirintäjärjestelmän on kyettävä arvioimaan häirinnän vaikutusta maaliin. Tämän mahdollistamiseksi useissa järjestelmissä on niin sanottu *look-through*-toiminne. Sillä tarkoitetaan aikajakoista tekniikkaa, jossa häirintäpulslien välissä häirintäjärjestelmän tiedusteluvastaanotin pyrkii selvittämään, vieläkö häirityllä taajuuskaistalla on viestiliikennettä, tutkasignaaleja tms. hyötykäyttöä. Jos vastaanotin havaitsee kaistaa käytettävä, se jatkaa häirintää, mutta jos se toteaa kaistan tyhjäksi, se siirtyy häiritsemään muita kanavia.

SUUNNATUN ENERGIAN ASEET

Suunnatun energian aseet (DEW, Directed Energy Weapons) perustuvat suuritehoiseen radiotaajuiseen tai optiseen pulssiin tai suurelle nopeudelle kiihdytettuihin hiukkasiin. Tavoitteena on kohdentaa maaliin niin suuri hetkellinen energia, että se tuhoutuu tai vaurioituu suuren sähkökentän voimakkuuden tai termisen tai mekaanisen shokin vuoksi. Radiotaajuisia energiaa käytetään suurtehomikroaaltoaseessa (HPM, High-Power Microwave) sekä sähkömagneettisissa pulssissa (EMP, Electromagnetic Pulse), joissa sähkökentän energia tuhoaa kohteen puolijohteet. Näistä molemmista voidaan käyttää nimitystä RF-ase. Optista energiaa käytetään kohteen tuhoamiseen pyrkivissä suurteholasereissa sekä sensorin tai käyttäjän lamauttamiseen pyrkivissä sokaisulasereissa. Hiukkasaseet perustuvat varattujen tai varauksettomien hiukkasten kiihdyttämiseen sähkö- tai magneettikentän avulla ja kohdentamiseen pienelle alueelle maalissa. Tässä kirjassa ei käsitellä hiukkasaseita, koska ne ovat vielä hyvin varhaisessa tutkimusvaiheessa eikä niiden ottamista palveluskäyttöön taistelukentälle voida pitää kovinkaan todennäköisenä – ainakaan lähitulevaisuudessa.

Suunnatun energian aseilla on useita etuja verrattuna konventionaalisiin asejärjestelmiin:

- valon nopeus "projektiilin" lentonopeutena; välitön vaikutus maaliin
- suora lentorata: yksinkertainen seurantajärjestelmä; ennakkoa ei tarvita
- näkymätön ja äänetön vaikutuskeino; ei paljastu, joten kohde ei osaa suojautua eikä käynnistää vastatoimenpiteitä jos ase ei tehoa tai sillä ammutaan ohi.
- periaatteessa ehtymätön "lipas"
- kyky vaikuttaa useisiin maaleihin erittäin lyhyessä ajassa; kyky torjua saturaatiohyökkäyksiä
- vaikutuskyky nopeisiin ja liikehtimiskykyisiin maaleihin, kuten ohjuksiin
- epäherkkä aktiivisille elektronisille vastatoimenpiteille
- asevaikutuksen kustannus maalia kohti erittäin pieni

⁴² Amerikkalaisten riippuvuus satelliittipaikannusjärjestelmästä on pakottanut heidät modifioimaan tutkahakuisia ohjuksiaan niin, että niillä kyettäisiin tuhoamaan myös GPS-järjestelmien häirintään käytettäviä häirintäjärjestelmiä. Tästä ei ole kovinkaan pitkä askel sovittaa ohjus hakeutumaan esimerkiksi taktisten radiolinkkien häirintälähettimeen. Tällaisen aseiden kustannustehokkuus tosin ei ole kovinkaan hyvä.

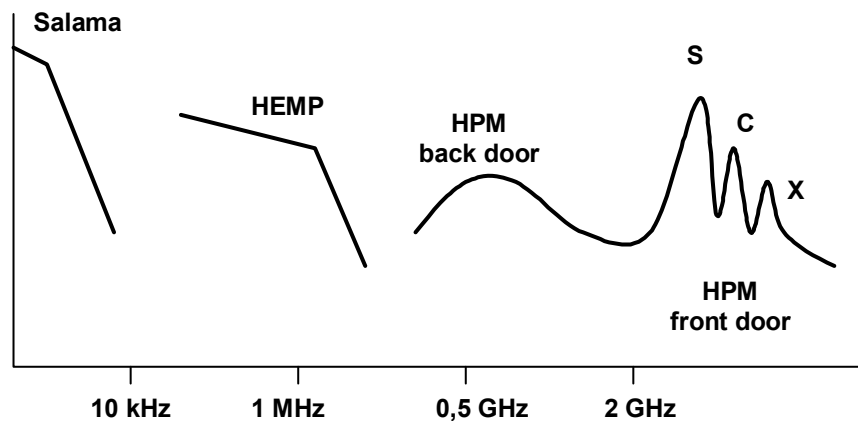
Suunnatun energian aseet vaikuttavat siten hyvin monessa mielessä erinomaisilta asejärjestelmiltä, mutta niillä on toki myös omat heikkoutensa, joista voidaan mainita esimerkiksi:

- maalin oltava näköyhteysreitillä
- teho riippuu säästä ainakin pitkillä etäisyyksillä
- vaikutus maaliin on monimutkainen ja riippuu maalin EP-ominaisuuksista
- asevaikutuksen todentaminen saattaa olla vaikeata
- teknologia ei ole kypsää: käytettävyys ja kustannustehokkuus epävarmaa.

Suurtehomikroaaltoase

Suurtehomikroaaltoaseen (HPM, High-Power Microwave) tuhovaikutus perustuu suurenergiiseen ja suurtaajuiseen sähkömagneettiseen pulssiin. Pulssi johdetaan lähetyssantenniin, josta se etenee maaliin sähkömagneettisena säteilynä ja tunkeutuu ajoneuvojen, konttien ja laitteiden sisälle ovien, luukkujen ja läpivientien raoista (ns. Back Door –tunkeutuminen, josta käytetään myös nimitystä epäsuora tunkeutuminen). Toisessa tunkeutumismekanismissa aalto indusoiu kohdejärjestelmän antenneihin ja metallijohtimiin ja tunkeutuu johtamalla kaapeliyhteyksiä pitkin laitteistoon (ns. Front Door –tunkeutuminen, eli suora tunkeutuminen).

HPM-aseen suorituskykyä arvioitaessa tulee tarkastella aseensa ominaisuuksia, aseensa synnyttämän sähkömagneettisen energian etenemistä aseesta maaliin, energian kytkeytymistä kohteena olevaan järjestelmään ja sen laitteisiin sekä mikroaallojen vaikutusta kohteeseen. Puolustajan – eli suojautumisen – kannalta tehty arvio korostaa luonnollisesti aseensa hyökkäyksellistä kykyä, ehkäpä jopa hieman liioitellen. Tällä pyritään tietysti hankkimaan riittävä turvamarginaali yllätysten ja tulevaisuuden teknisen kehityksen varalta.

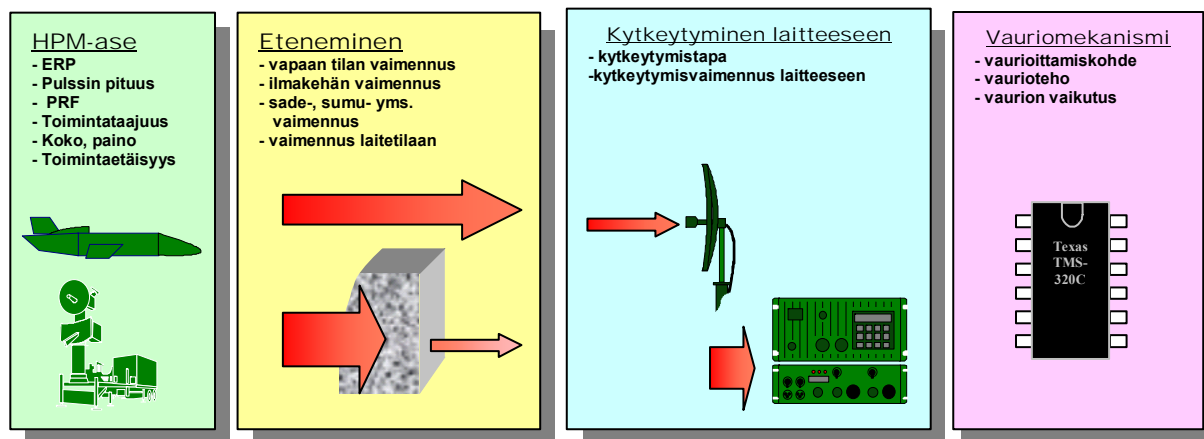


Kuva 305: Suurtehomikroaaltoase vaikuttaa muita sähkömagneettisia häiriöitä ja aseita, kuten salamia ja EMP:a korkeammilla taajuuksilla. [Kuva Fred Levien: *IW in Kosovo*, AoC convention 1999, Anaheim CA]

HPM-aseen rakenne ja toimintaperiaate

Suurtehoinen mikroaaltopulssi voidaan synnyttää monilla tavoin. HPM-asekuormissa käytetään esimerkiksi magneettista pulssikompressiota. Magneettisen pulssikompression toiminta perustuu kelassa kulkevan virtaan ja sen synnyttämään magneettikenttään. Toimintaketju on karkeasti ottaen seuraavanlainen: Korkeaan jännitteeseen (luokkaa 5 kV) ladatun kondensaattorin (esim. ns. Marx Bank) varaus puretaan suuri-induktanssiseen kelaan, mikä synnyttää kelaan sähkövirran. Hieman ennen kuin kelan sähkövirta on maksimissaan, räjäytetään kelan

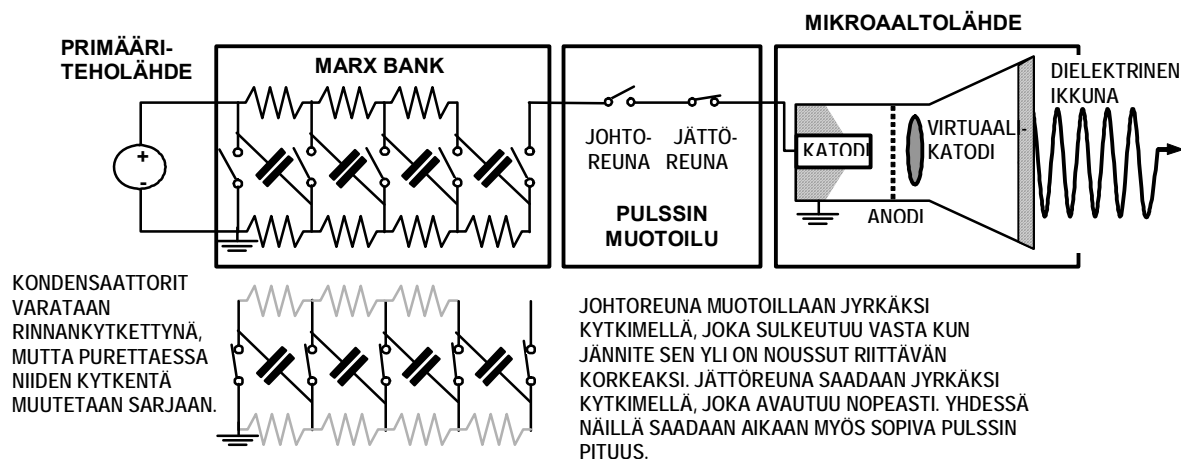
sisällä olevaan metallilieriöön sijoitettu räjähdne. Räjähdyks saa metallilieriön kasvamaan, jolloin se tila pienenee, jossa kelan magneettivuokulkee. Nopea magneettivuon muutos aiheuttaa äkillisen kelan virran muutoksen. Räjähdyksen kemiallinen energia on saatu muutetuksi sähköiseksi energiaksi, jonka suuruus voi olla 50 kJ luokkaa. Ensimmäisen vaiheen synnyttämä virtapulssi syötetään toisen vaiheen kelaan, jossa räjähdyksenmekanismi toistetaan. Pulssi varastoidaan vielä varastointikelaan, josta se syötetään esimerkiksi vircator-putkeen (Virtual Cathode Oscillator). Pulssin nousunopeutta pienennetään noin 60 ns:iin nopealla kipinöintivälillä. Putkesta saatava (esim. 20 GW) teho syötetään antenniin.



Kuva 306: HPM-aseen toimintaan vaikuttavat seikat.

Mikroaaltopulssin synnyttämisen ohella ongelmaksi muodostuu säteilyn kytkeminen avaruuteen. Tähän liittyen on ratkaistava myös käytettävä antenniratkaisu. Heijastinantennit soveltuvat hyvin HPM-asekäyttöön, sillä niissä yhdistyvät hyvä suuntaavuus, suuri tehonkesto, kyky sietää transienttipulsseja. Heijastinantennin yhtenä ongelmana on sen vaatima koko, minkä vuoksi se soveltuu huonosti esimerkiksi risteilyohjauksessa käytettäväksi. Pienikokoisissa HPM-aseissa voidaan käyttää esimerkiksi torvi- tai linssiantenneja. Myös aseiden tarvitseman tehollähteen koko ja paino ovat suuria ongelmia.

J Kosola 2001



Kuva 307: Esimerkki sähköisellä energialla toimivan HPM-aseen rakenteesta. EMP-aseen yhteydessä on esitetty FCG-periaatteella toimivan aseiden rakenne.

HPM-aseen tekniset parametrit

HPM-aseen toiminnan kannalta keskeisimmät parametrit ovat:

- 1) ERP-teho [W], joka saadaan huipputehosta P_t [W] ja antennivahvistuksesta G_t [dBi]
- 2) Toimintataajuus f [Hz]
- 3) Pulssin pituus T [s]
- 4) Pulssintoistotaajuus PRF [Hz]
- 5) Keskimääräinen teho P_{av} [W]

HPM-aseen uhka perustuu suurelta osin sen suureen toimintataajuuteen, joka mahdollistaa kapeiden suurienergisten pulssien muodostamisen sekä säteilyenergian tunkeutumisen kohdelaitteisiin, jotka on suojattu matalampitaajuiselta säteilyltä, esimerkiksi EMP-suojauksella. Mitä korkeampi taajuus on, sitä kapeampia pulsseja voidaan synnyttää, joten ERP-teho saadaan hyvinkin suureksi. Lisäksi taajuuden nostamisen myötä yhä pienemmät raot toimivat aaltojohteina mahdollistaen mikroaaltosäteilyn tunkeutumisen kanavia ja rakoja pitkin laitetiloihin ja laitteisiin. Toisaalta yleisenä sääntönä mikroaaltotekniikassa pidetään sitä, että mikroaaltolähteillä muodostettavissa oleva mikroaaltoteho riippuu $1/f$ verrannollisesti taajuuteen aina noin 10 GHz taajuuksille asti, jonka jälkeen riippuvuus on $1/f^2$. Siten korkeammilla taajuuksilla saavutetaan pienempiä pulssitehoja.

Suurtehoisen mikroaaltopulssin synnyttäminen ei ole ongelma. Nykytekniikalla voidaan saavuttaa noin 20 GW tehotasoa lyhyillä 150 ns luokkaa olevilla pulsseilla ja 0,5 – 17 GHz taajuuksilla. HPM-foorumeilla on esitetty tavoitteena olevan jopa 100 GW pulssitehon⁴³, esimerkiksi vapaaelektronilasereita hyödyntämällä. Laitteiston rakenteen ja koon vuoksi sitä tuskin tullaan käyttämään taktisissa järjestelmissä. Sen sijaan esimerkiksi Vircatoria pidetään potentiaalisena mikroaaltolähteenä HPM-aseissa. Pulssinpituuksudet ovat tällä hetkellä 100 – 1000 ns luokkaa. HPM-aseiden kehityksen varsin kunniahimoisena tavoitteena voidaan pitää tehotasoa 100 GW, yli 100 kW keskimääräistä tehoa ja 50% luokkaa olevaa hyötysuhdetta. Samalla pulssien pituuksia pyrittäneen nostamaan mikrosekunnin yli.

HPM-ase voi olla esimerkiksi:

- A) Terroristien ja erikoisjoukkojen tai agenttien käyttämä HPM-salkkupommi
- B) Risteilyohjukseen sijoitettu HPM-taistelukärki
- C) Lavettiin kiinteästi asennettu HPM-ase

HPM-salkkupommi on pienimmillään attaseasalkun kokoinen ja suurimmillaan umpipaketti-auton tavaratilaan mahtuva ase. Nimitys pommi tulee siitä, että primäärienergian lähteenä käytetään räjähdysainetta, koska räjähteillä on hyvin suuri - 10 GJ/m³ luokkaa oleva - energia/tilavuussuhde. Tästä tosin saadaan hyödynnettyä mikroaaltotehoksi vain 2 – 4 %. Salkkupommin toimintaetäisyys on lyhyt, joten se on saatava kohteensa välittömään (kymmeniä tai satoja metrejä) läheisyyteen. Se voidaan kuitenkin naamioda lähestulkoon miksi tahansa esineeksi, ja siten sijoittaa paikalleen jo rauhan aikana. Pakettiautoversion kantama on salkkupommia pidempi suuren antennin vuoksi.

⁴³ Jopa 1 TW teho voi olla saavutettavissa, muttei pienikokoisilla laitteistoilla. Tehotasojen hahmottamiseksi mainittakoon, että 1 TW teho on tuhatkertainen Loviisan ydinvoimalaitoksen tuottamaan tehoon. Ydinvoimala tuottaa sähkötehoa jatkuvasti, kun taas HPM-ase kykenee tuottamaan tuon tehon vain häviävän pieneksi ajaksi.

Risteilyohjuksen HPM-taistelukärki asennetaan konventionaalisen taistelukärjen tilalle. Sen kantama on jonkin verran HPM-salkkuaseen kantamaa suurempi, mutta kantamaa rajoittaa ohjuksen liikkeestä ja suunnistamisesta johtuva tähtäyksen epätarkkuus, minkä vuoksi aseennikeilan on oltava noin 15 - 30 asteen luokkaa. Tämä rajoittaa antennivahvistuksen ja siten aseenn tehollisen kantaman.

Laivaan, lentokoneeseen tai ajoneuvoon asennettavassa HPM-aseessa voidaan käyttää suurempia antennirakennelmia kuin edellä mainituissa aseissa. Lisäksi tällaisessa aseessa pulssi muodostetaan sähköenergialla eikä räjäyttämällä, joten aseella voidaan ampua useita 'laukauksia' – esimerkiksi 100 - 200 pulssia sekunnin aikana, jonka jälkeen asetta on jäähdytettävä joitakin sekunteja ennen uuden pulssisarjan ampumista. Tällaisen aseenn ja sen tehollähteiden paino ja koko sekä mikroaaltojen etenemisominaisuudet rajoittanevat sen käytön lähinnä laivojen ja lentokoneiden omasuojajärjestelmiin sekä mahdollisesti lentokoneeseen asennettuun hyökkäykselliseen järjestelmään. Maahan sijoitettuna ase sopisi parhaiten lentokoneiden ja älykkäiden ammusten torjuntaan lähietäisyydeltä.

Arvioitaessa HPM-aseiden muodostamaa uhkaa edellä mainittujen asetyyppien (teknisen kehityksen myötä 5 - 10 vuoden sisällä saavutettaviksi) ominaisuuksiksi (niitä puolustajan kannalta turvamarginaalin saavuttamiseksi hieman yläkanttiin arvioiden) voidaan eri lähteiden perusteella olettaa:

HPM-salkkupommi (matkalaukku tai pakettiautoon asennettu)



Pt	5	GW (pulssiteho 10 GW, 50% hyötysuhde)
Gt	32	dBi (7.5 asteen keila, hyötysuhde 70%)
f	5	GHz
ERP	18×10^{12}	W

Risteilyohjuksen, raketin tms. HPM-taistelukärki



Pt	5	GW (pulssiteho 10 GW, 50% hyötysuhde)
Gt	24	dBi (20 asteen keila, hyötysuhde 70%)
f	5	GHz
ERP	11×10^{12}	W

Lavettiin asennettu HPM-ase



Pt	10	GW (pulssiteho 12,5 GW, hyötysuhde 80 %)
Gt	35	dBi (2.4 asteen keila)
f	2-5	GHz
T	100	ns
PRF	200	pps
ERP	13×10^{13}	W

HPM-pulssin eteneminen

HPM-pulssi on kestoltaan niin lyhyt, ettei ilman läpilyönti-ilmiötä ehdi tapahtua⁴⁴, minkä vuoksi pulssinpituuden on oltava nanosekuntiluokkaa. Suuritaajuinen mikroaaltopulssi etenee periaatteessa valon tavoin viivasuoraan, joten aseella on oltava näköyhteys maaliin. Mikro-

⁴⁴ Ilman läpilyönti tapahtuu tasakentällä yli 1 kV/mm kentänvoimakkuudella (vastaa 2,6 GW/m² tehotiheyttä).

aaltosäteily voi levitä näköyhteysreitillä poikkeavasti siroamalla tai aaltojohteen avulla. Ensin mainitussa tapauksessa pulssin tehotiheys ei riittäne maaliin vaikuttamiseen, mutta mikäli metallinen rakenne – esimerkiksi ilmastointiputket – toimii pulssin kanavoivana aaltojohteenä, voi pulssi edetä hyvinkin syvälle rakenteisiin vaimenematta merkittävästi.

Mikroaaltosäteily tunkeutuu laitetiloihin laittilan seinämien, seinämämateriaalien liitos- saumojen, kulkuaukkojen, signaali- ja tehonsyöttö- sekä LVI-läpivientien kautta. Metallirakenteisissa suojissa läpiviennit ovat suurin ongelma suojatason saavuttamisessa. Aukot suojarakenteissa voivat toimia apertuuriantenneina, jotka valaisevat laittilan sisällä olevaa elektroniikkaa mikroaaltosäteilyllä. EMP-läpiviennit ja muut metalliputkitukset puolestaan voivat toimia säteilyn ulkotilasta laittilan sisälle kanavoivina aaltojohteina.

Edetessään materian läpi pulssi vaimenee sitä voimakkaammin, mitä korkeampi sen taajuus on. Mikäli maali sijaitsee esimerkiksi tiiliseinäisessä talossa, on etenemisvaimennus seinän läpi merkittävä, jos pulssi kulkee seinämateriaalin läpi. Jos pulssi vaikuttaa ikkunan kautta, voi sen teho olla jopa tuhatkertainen seinän läpi kulkeneeseen pulssiin verrattuna.

Pulssienergian kytkeytyminen laitteeseen

Suuritaajuiseen mikroaaltosäteilyyn aiheuttavat vaimennusta normaalin etenemisvaimennuksen lisäksi impedanssiepäsovitus kytkeydyttäessä ilmasta kohdejärjestelmään, ohmiset häviöt, tahalliset (suodattimet) ja tahattomat (parasiittiset) siirtolinjalla olevat kapasitanssit ja induktanssit sekä mahdolliset läpilyönnit pulssin kulkiessa antennilta tai antennin toimivalta rakenteelta piirilevyn komponenttien puolijohderajapinnoille. Impedanssiepäsovitus johtaa siihen, että osa tehosta heijastuu eikä absorboitu laitteeseen. Heijastusvaimennus voi olla 5 - 20 dB. Kytkevävaimennus laitteen ulkopuolisesta ilmasta laitteen piirilevylle sisältää heijastusvaimennuksen ja muut häviötermit ollen tilanteesta ja kytkeytymismekanismista riippuen 15 - 40 dB luokkaa.

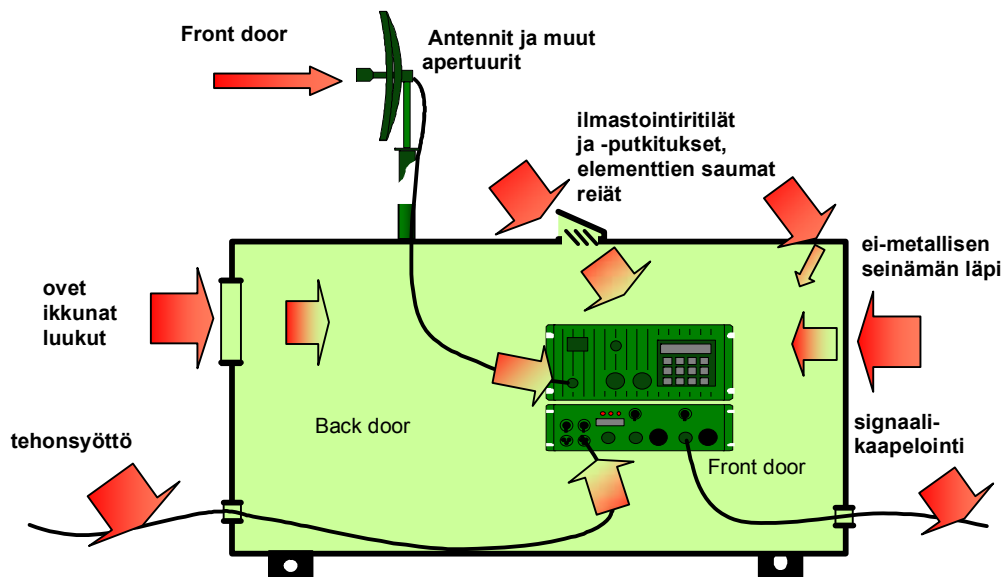
Kokonaisvaimennus on pieni, mikäli kytkeytyminen tapahtuu viesti- tai tutkajärjestelmään antennin kautta, koska järjestelmä on nimenomaisesti suunniteltu kytkemään antennilta tuleva teho laitteeseen. Jos kytkeytyminen tapahtuu esimerkiksi ilmasta muovikuoriseen laitteeseen, kytkeytymisvaimennus ilmasta laitteeseen voi olla yli 20 dB. Ilmassa olevan tehotiheyden on siten oltava yli satakertainen laitteen tuhoavaan tehotiheyteen.

Vauriomekanismi ja vaikutusteho

Laitteen tai järjestelmän pitkäaikaiseen lamauttamiseen pyrittäessä mikroaaltoaseen vaikutus perustuu piirikomponenttien vaurioittamiseen. Suurienerginen pulssi luo kohteena olevien laitteiden puolijohderajapinnoille niin suuren sähkökentän, että puolijohdemateriaali sulaa osittain tuhoten mikropiirit, transistorit ja muut puolijohdekomponentit⁴⁵. Mikäli tyydytään laitteen toiminnan lamauttamiseen tai häiritsemiseen ilman pysyviä primäärivaikutuksia, riittää huomattavasti pienempi teho. Tällöin laite tai järjestelmä voidaan pyrkiä tuhoamaan ase- sekundääri-vaikutuksella: Esimerkiksi ohjuksen tai lentokoneen ohjausjärjestelmän lyhytaikainen lamauttaminen johtaa sekundääri-vaikutuksena koko järjestelmän tuhoutumiseen maahansyöksyn seurauksena. Myös omasuojajärjestelmän lamauttaminen mikroaaltopulsseilla voi johtaa maalin tuhoutumiseen maaliin päässeeseen primääriaseen kautta.

⁴⁵ Vauriomekanismina on puolijohderajapinnan 2. läpilyönti estosuunnassa, jolloin puolijohde- lämpötila nousee paikoin yli piin sulamispisteen 1400 °C yläpuolelle.

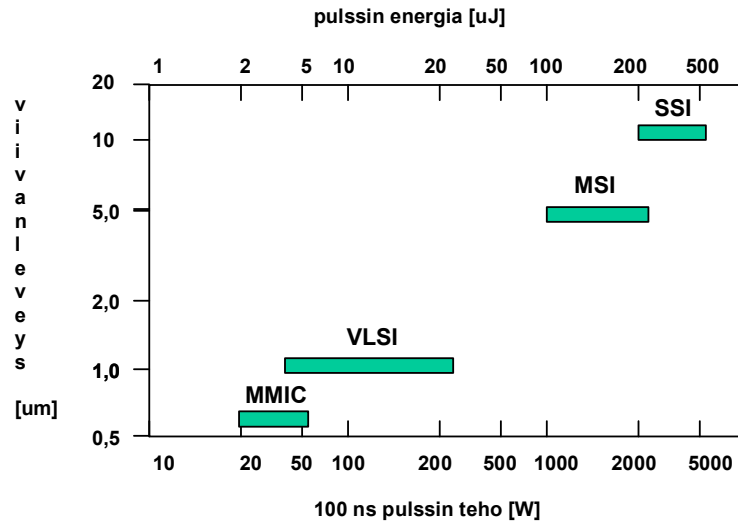
Mikropiirien ja muiden puolijohdekomponenttien häiriytyvyyttä ja vaurioituvuutta on tutkittu monissa sotilas- ja siviilitutkimuslaitoksissa sekä DEW- että EMC-perustutkimukseen liittyen. Tutkimuksissa on havaittu uusimpien ja siten integroidumpien teknologioiden olevan erityisen vaurioitumis- ja lamautumisherkkää, kuten kuvasta 309 voidaan todeta. Elektronisten laitteiden häiriytyvyys riippuu häiritsevän sähkömagneettisen säteilyn taajuudesta. Matalammilla taajuuksilla on suurempi häiritsevä vaikutus kuin korkeilla. Toimintataajuuden lisäksi pulssintoistotaajuudella (PRF, Pulse Repetition Frequency) on olennainen merkitys aseeseen vaikutukseen. Mikäli PRF on lähellä kohteen jonkin säätösilmukan, esimerkiksi ohjuksen hakupään tai vaikkapa automaatti-ilmatorjuntatykin servon, ohjauspiirin ominaistajuutta, on HPM-aseen teho maksimissaan. Siten luokkaa 50 - 200 Hz oleva PRF olisi yleisesti ottaen vaikutukseltaan kaikkein tehokkain.



Kuva 308: Mikroaaltosäteily ei läpäise metalliseinämiä, mutta toisaalta metallirakenne saattaa muodostaa resonaattorin, jossa muodostuu 'kuumia pisteitä', joissa kentänvoimakkuus voi olla jopa ulkoista kenttää suurempi.

Suorassa (front door) kytkeytymisessä hyökkääjä käyttää hyväksi sitä, että kohdelaite maksimoi tietyllä taajuudella spektristä vastaanottamansa sähkömagneettisen energian. Esimerkiksi radiolinkin antenni pyrkii keräämään mahdollisimman suuren osa pääkeilan suunnasta tulevasta sähkömagneettisesta energiasta. Antennin heijastin ja säteilijä on optimoitu sieppaamaan mahdollisimman suuri osa kohtaamastaan sähkömagneettisesta tehosta, antennin ja antennikaapeloinnin kytkentähäviöt on minimoitu linkin toimintataajuuden kaistalla. Linkin suodattimet on suunniteltu vaimentamaan toimintakaistan ulkopuoliset lähetteet, mutta päättämään mahdollisimman suuri osa toimintakaistan sisäpuolisista signaaleista. Sama analogia pätee myös tutkajärjestelmiin.

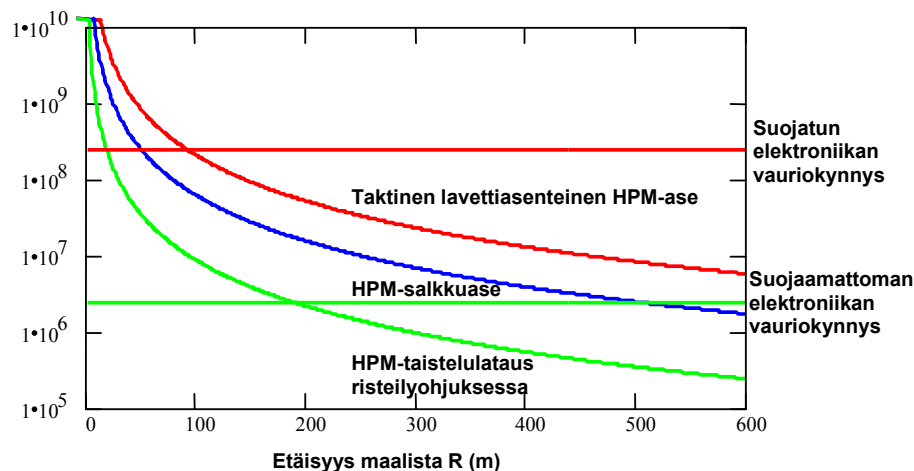
Suora vaikuttaminen on vähintään 40 - 60 dB (eli jopa miljoona kertaa) tehokkaampaa kuin epäsuora vaikuttaminen. Ongelmaksi suorassa vaikuttamisessa tulee tietysti se, että aseeseen pitää tuntea kohteen rakenne ja sijainti. Paras vaikutus saadaan, kun toimitaan kohteen pääkeilassa ja kohteen ominaistajuuksilla. Myös sivukeilasta voidaan vaikuttaa, mutta sivukeilavaimennus vaihtelee taktisten radiolinkkien 10 - 15 dB:stä kiinteän verkon linkkien ja ELSO-sietoisten tutkajärjestelmien 30 - 35 dB:iin. Siten pääkeilasta voidaan vaikuttaa huomattavasti kauempaa kuin sivukeilasta.



Kuva 309: Puolijohdepiirien häiriytyvyys riippuu käytetystä viivanleveydystä; mitä integroidumpi piiri on, sitä pienemmällä säteilyteholla se on lamauteuttavissa.

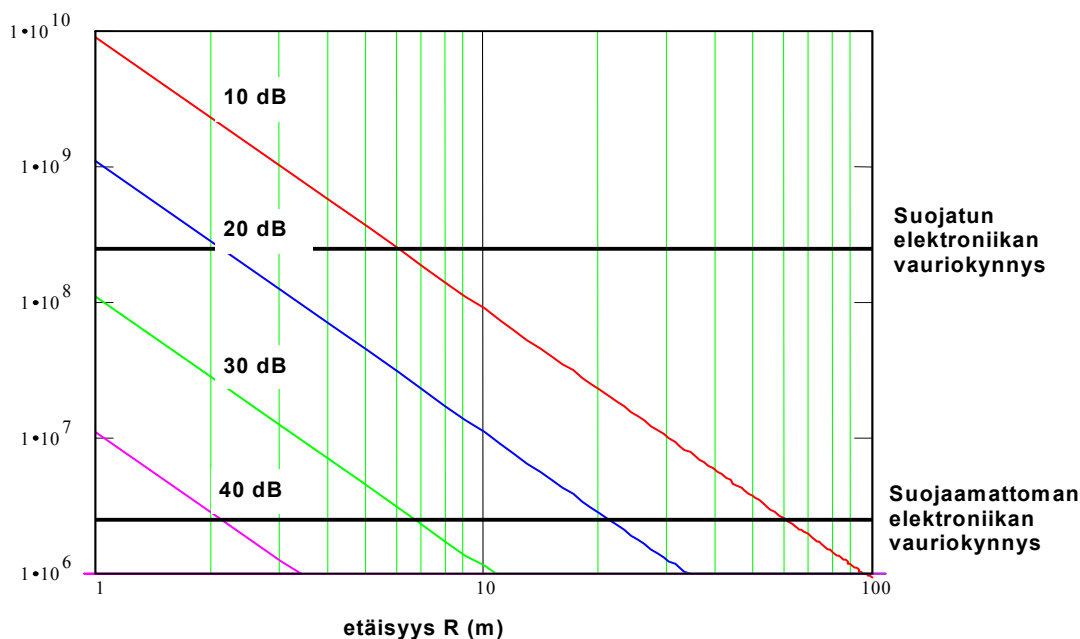
Pääkeilasta vaikuttamisen ensisijainen kysymys on se, millä suoralla järjestelmän pääkeila sijaitsee. Valvontatutkajärjestelmä tietysti paljastaa sijaintinsa ja pääkeilansa keilatessaan valvomaansa avaruutta. Sen sijaan linkkiverkon rakenne täytyy tiedustella jotta tietoliikennejärjestelmää vastaan päästään vaikuttamaan pääkeilasta. Kiinteän tele-, radio-, yleisradio- ja televisioverkon osalta tiedustelu on helppoa jos vaikuttaminen valmistellaan jo rauhan aikana. Sen sijaan taktisella tasalla linkkiverkon rakenne on selvitettävä elektronisella tiedustelulla. Sillä selviää myös kohdejärjestelmän ominaistaajuus: tutka- ja radiojärjestelmähän vastaanottavat samalla taajuusalueella ja kaistalla kuin lähettävätkin.

Kuva 314 esittää kolmen edellä mainitun HPM-aseen aiheuttamaa tehotiheyttä sekä suojautumattoman ja suojatun laitteen vaurioittamiseen tarvittavaa tehoa. Kuvasta nähdään, että taktinen HPM-asejärjestelmä kykenee vaurioittamaan suojattua laitetta vain noin 100 metrin etäisyydeltä, joten käytetyillä lähtöoletuksilla siitä ei ole hyökkäykselliseksi aseeksi. Sen sijaan omasuojakäyttöön sitä voitaisiin soveltaa. Salkkupommi kykenee vaikuttamaan noin puolen kilometrin etäisyydeltä suojaamatonta elektroniikkaa vastaan ja suojattuakin vastaan, mikäli se toimitetaan noin 50 metrin etäisyydelle. Risteilyohjus olisi toimitettava parinkymmenen metrin päähän suojatusta maalista, tai paria sataa metriä lähemmäs suojaamatonta maalia.



Kuva 310: HPM-aseiden tehotiheys $[W/m^2]$ vapaassa tilassa, kun laite on näköyhteysreitillä.

Kuvassa 311 on esitetty risteilyohjuksen aikaansaama tehotiheys 10 - 40 dB tasolle asti suojatuissa suojatiloissa olevia laitteita vastaan. Kuvasta havaitaan, että 10-20 metrin päässä maalista toimiva HPM-risteilyohjus on tehokas, mikäli järjestelmän suojoitus on alle 25 dB.



Kuva 311: HPM-risteilyohjuksen aiheuttama tehotiheys 10 - 40 dB tasolle suojatussa tilassa sijaitsevaan elektronikkalaitteeseen.

Aseen tehokas kantama eri suojoitasoilla

Suojautujan kannalta on usein olennaista tietää, kuinka etäälle HPM-ase on torjuttava, jottei se kykene uhkaamaan omia elektronisia järjestelmiä. Minimitorjuntaetäisyys saadaan kaavasta:

$$R(\text{ERP}, P_{\min}, L_w) = \sqrt{\frac{\text{ERP}}{4 \cdot \pi \cdot P_{\min} \cdot 10^{\frac{L_w}{10}}}}$$

jossa ERP on HPM-aseen ERP-teho, P_{\min} pienin vaikuttava tehotiheys ja L_w laittilan vaimennus.

Suora vaikuttamisen on erityisen ongelmallinen puolustajan kannalta siksi, että hyökkäys tapahtuu juuri sitä reittiä pitkin, jolla laite itse edesauttaa energian kytkemisessä avaruudesta piirikorteille. Ja jos hyökkäys tapahtuu laitteen ominaistajuudella, laitteen antenni maksimoi avaruudesta siepattavan tehon, eikä suojausta voida rakentaa suodatinten varaan.

Potentiaalisimmat hyökkäyskohteet ovat sellaiset järjestelmät, joiden pääkeilasta ase pääsee vaikuttamaan. Tällöin on tiedettävä pääkeilan suunta aseiden vaikutushetkellä, minkä vuoksi kohteiksi soveltuvat erityisen hyvin mekaanisesti keilaavat tutkajärjestelmät sekä kiinteät radiolinkit. Näistä ensin mainitut paljastavat itse pääkeilansa suunnan varsin kauas ja jälkimmäisten keilan suunta on tiedusteltavissa etukäteen.

Jos oletetaan mikroaaltolinkin antennivahvistukseksi $G_r = 33$ dB ja pääkeilan leveydeksi 3,8 astetta sekä etuasteen tuhoamiseen tarvittavaksi vauriotehoksi $S_{\min} = 100$ W, niin radiolinkin tuhoamisetäisyydeksi HPM-aseen ERP:n funktiona saadaan:

$$R(\text{ERP}) := \sqrt{\frac{\text{ERP} \cdot G_r}{4 \cdot \pi \cdot S_{\min}}}$$

Käytännössä aseiden vaikutusetäisyyttä rajoittavat ilmakehän vaimennus ja vaatimus näköyhteysreitistä aseesta maalina olevaan radiolinkkiantenniin. Olennaista on kuitenkin huomata, että ainakin kiinteät radiolinkkijärjestelmät ovat erittäin haavoittuvia HPM-asehyökkäykselle. Mikäli salkkuasetta halutaan käyttää ilmavalvontatutkaa vastaan, tilanne on monessa suhteessa samanlainen kuin hyökkättäessä radiolinkkiä vastaan. Kuitenkin valvontatutkan antenni pyörii horisontaalitasossa, jolloin HPM-ase kykenee erittäin todennäköisesti vaikuttamaan pääkeilan suunnassa, vaikka antennin pääkeila osoittaisikin viistosti ylöspäin. Lisäksi HPM-aseen pulssi voidaan lähettää tarkasti juuri sillä hetkellä, kun tutka-antenni osoittaa kohti asetta käyttämällä hyväksi aseeseen liitettyä yksinkertaista ESM-sensoria

Esimerkki

Arvioidaan HPM-aseen vaikutusta, kun kohteena on radiolinkki ja vaikutusmekanismi suora kytkentä linkkiantenniin. Oletetaan radiolinkin vastaanottimen tuhoamiseen tarvittavaksi vauriotehoksi 180 W. 10 GW HPM-generaattori kytketään $d_{\text{hpm}}=0,40$ m läpimittaiseen paraboloidiantenniin. Matalan kytkentähyötysuhteen ($\eta=10\%$) vuoksi HPM-lähetteen lähtötehoksi P_t saadaan kuitenkin 'vain' 2 GW. Pulssin kesto on noin 150 ns ja taajuus 10 GHz.

HPM-aseen antennivahvistukseksi voidaan olettaa

$$G_t = \frac{4 \cdot \pi}{\lambda^2} \cdot A_e, \text{ missä } A_e = 0,7 \cdot \pi \cdot d_{\text{hpm}}^2, \text{ eli } G_t \text{ on noin } 37 \text{ dB.}$$

Oletetaan, että radiolinkki toimii samalla taajuudella kuin HPM-asekin, jolloin sen antenni on sovitettu aseiden lähettämälle pulssille (muutoin epäsovitukselta johtuva vaimennus olisi merkittävä). Oletetaan antennin halkaisijaksi 40 cm. Tällöin linkki-antennin vahvistus 10 GHz taajuudella on noin 36 dB.

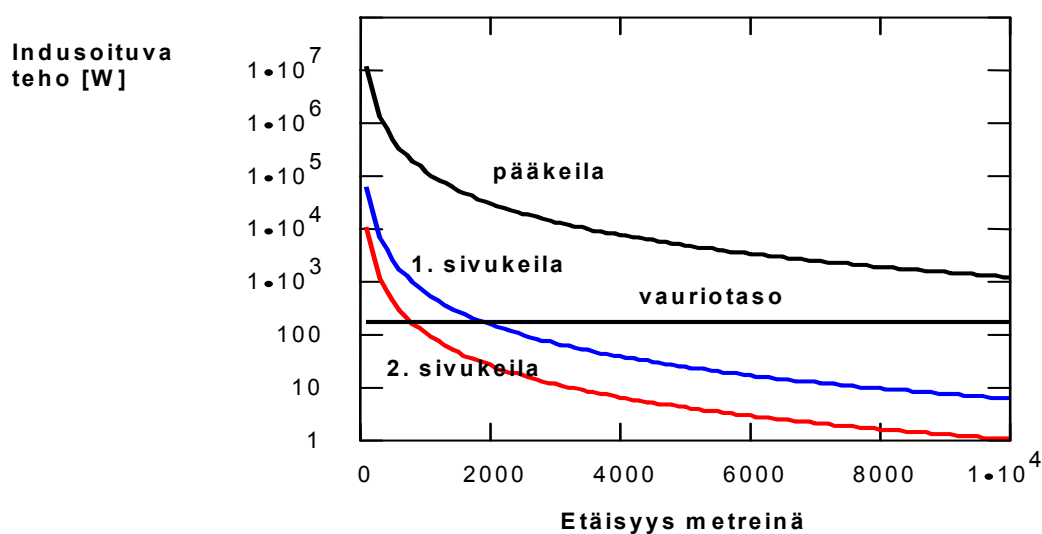
Oletetaan, että ilmakehän vaimennus 5 GHz alueella voidaan jättää huomioimatta ($\alpha=1$). Mikroaaltopulssin tehotiheydeksi etäisyydellä x lähettimestä saadaan:

$$P_o(x) := \frac{P_t \cdot G_t}{4 \cdot \pi \cdot x^2} \cdot 10^{-\alpha \cdot x}$$

Radiolinkki ottaa tästä tehotiheydestä vastaan tehon:

$$P_r(x, \theta) := P_o(x) \cdot G_{rr}(\theta, 0) \cdot \frac{\lambda^2}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{1}{\frac{L_{sys}}{10^{10}}}$$

jossa järjestelmän kokonaishäviöt ovat $L_{sys}=10$ dB ja $G_{rr}(\phi, 0)$ on linkki-antennin vahvistus suuntaan ϕ . Radiolinkin vastaanottama mikroaaltoteho riippuu siis suuresti määrin säteilyn tulosuunnasta, mitä seuraava kuva havainnollistaa. Kuva 316 esittää radiolinkin pääkeilan, ensimmäisen sivukeilan ja toisen sivukeilan kautta vastaanottamaa tehoa HPM-aseen vaikutusetasyyden funktiona. Kuvasta nähdään, että HPM-aseen on oltava joko radiolinkin pääkeilassa tai hyvin lähellä radiolinkkiä. Pääkeilan kapeuden vuoksi HPM-aseella ei kyettäisi tällä kytkentämekanismilla lamauttamaan taistelukentän radiolinkkejä.



Kuva 312: Radiolinkkiin siirtyvä teho HPM-aseen etäisyyden funktiona aseensa vaikuttaessa pääkeilassa (ylimpänä), ensimmäisessä sivukeilassa (keskimmäisenä) ja toisessa sivukeilassa (alimpana). Vaakaviiva esittää minimivaurioittamistehoa.

Jotta esimerkin HPM-asetta voitaisiin käyttää radiolinkkiä vastaan, se tulisi kyetä toimittamaan hyvin lähelle radiolinkkiä, ellei voida olla varmoja siitä, että ase kykenee vaikuttamaan pääkeilassa. Jos ase sijoitettaisiin esimerkiksi risteilyohjukseen ja räjäytettäisiin sadan metrin päässä linkistä, olisi se silti saatava suhteellisen lähelle pääkeilaa tai ensimmäisiä sivukeiloja, kuten seuraava kuva osoittaa. Tässä yhteydessä on muistutettava, että esimerkissä ei otettu huomioon muita kytkeytymisreittejä kuin suoraan aseesta linkkiantenniin.

Suojautuminen HPM-aseen vaikutuksilta

Suojautumisen HPM-aseita vastaan tulee lähteä uhan määrittelystä, eli siitä, mitä puolustajan järjestelmiä vastaan näitä aseita tulnaisiin käyttämään ja minkälaisista aseista hyökkäyksessä käytettäisiin. Ensin tulee siis määrittellä toimintaympäristön sähkömagneettinen uhka, joka määrittää järjestelmien kestokynnyksen. Tämän perusteella voidaan joko määrittellä laitteilta edellytettävä sähkömagneettinen suojataso käyttäen parametrina tilojen ja installaatioiden suojatasoa - tai määrittää laiteiloille ja installaatioille asetettavat vaatimuksen laitteiden ympäristönkestokyvyn perusteella. Laitteiden sietokyky määräytyy käytännössä noudatetta-

van teknologiapolitiikan mukaan; COTS-laitteiden sietokynnys on matalampi kuin MIL-tasoon spesifioitujen.

Koska laitteiden ympäristönsieto-ominaisuuksiin ei juurikaan pystytä vaikuttamaan - muutoin kuin poimimalla joko MIL- tai COTS-tuotteita - tulee päähuomio kiinnittää toisaalta laitetilojen ja installaatioiden suojatasoon ja toisaalta sähkömagneettisesti herkkien järjestelmien toimintaperiaatteeseen ja rakenteeseen. Sähkömagneettisesti herkillä järjestelmillä tarkoitetaan tässä sellaisia järjestelmiä, joiden toimintaperiaatteeseen kuuluu sähkömagneettisen energian tehokas kytkeminen ilmasta laitteisiin, kuten radiolaitteet, satelliitti- ja radiopaikantamislaitteet sekä tutkat ja elektronisen tiedustelun sensorit. Näissä suojautumiskeinoina voidaan käyttää:

- 1) Antennien sivukeilatasojen pitämistä mahdollisimman alhaisena, jotta HPM-ase ei pääse vaikuttamaan pääkeilan ulkopuolelta.
- 2) Elektronisesti valesatunnaisesti keilaavien antennien hyväksikäyttöä, jotta HPM-ase ei voi etukäteen tietää milloin sensori osoittaa kohti asetta.
- 3) Laitteiden varustamista riittävän tehokkain kaistanpäästösuodattimin, jottei laitteen toimintataajuuden ulkopuolinen mikroaaltopulssi kykene vaurioittamaan etupäätä.
- 4) Vastaanottimen etupään suojaaminen nopein purkausputkin ja HPM-ilmaisimin.
- 5) Vastaanotinten etupään suojaamista suojaamispiireillä.
- 6) Järjestelmän suunnittelemista siten, että suora HPM-asevaikutus järjestelmään kuuluvan apertuurin kautta ei kykene lamauttamaan koko järjestelmän toimintaa. Esimerkiksi viestijärjestelmässä tämä tarkoittaa varmentavia kuitu- tai laserlinkkijänteitä, HF/VHF/UHF-varatieradioita yms. muilla taajuualueilla tai muuta siirtomediaa hyväksikäyttävää varajärjestelmää. Sensorijärjestelmissä puolestaan voidaan käyttää optronisia varajärjestelmiä.
- 7) Järjestelmien sijoittamista siten, ettei vihollinen kykene vaikuttamaan HPM-aseella, esimerkiksi sijoittamalla ne metsän, rakennusten, maastoesteiden yms. suojaan potentiaalisimmalta uhkasuunnalta, estämällä vihollisen pääsy sille alueelle, jolta salkku- ja pakettiautoaseet muodostavat uhan, sijoittamalla kriittisimmät järjestelmät joko maanalaisiin tai liikkuviin installaatioihin.

Johtopäätökset HPM-aseen muodostamasta uhasta taistelukentällä

Säteilyn etenemiseen ja kytkeytymiseen liittyvien epävarmuustekijöiden vuoksi HPM-ase on käyttäjänsä kannalta hyvin epävarma, mutta toisaalta siltä suojautumaan pyrkivän kannalta vartenotettava uhka. Korkean toimintataajuuden vuoksi mikroaaltose edellyttää näköyhteysreittiä kohteeseensa. Koska aseiden toimintaetäisyys on varsin lyhyt, sen todennäköisin käyttötapa on joko sijoittaa se strategisten kohteiden lähelle jo rauhan aikana tai toimittaa se esimerkiksi risteilyohjuksella. Taktisia järjestelmiä vastaan aseiden uhka on huomattavasti pienempi kuin strategisia ja operatiivisia järjestelmiä vastaan.

Radiolinkit ja valvontatutkat ovat varsin helppoja kohteita salkkuaseelle, sillä ase voidaan sijoittaa suhteellisen kauas antennin pääkeilassa, ja jos ase toimii maalin normaalilla toimintataajuudella, on linkkiä tai tutkaa hyvin vaikea suojata. Toisena sotilaallisena kohteen voi olla kriittinen sotamateriaali, joka on varastoitu varikkoihin. HPM-ase on tässä suhteessa tehokkaampi kuin vastaavankokoinen räjähdde, sillä mikroaaltosäteily rikkoo juuri kriittisimmät järjestelmäkomponentit, eikä laitteesta näe päällepäin, onko se rikki ja jos on, mikä siinä

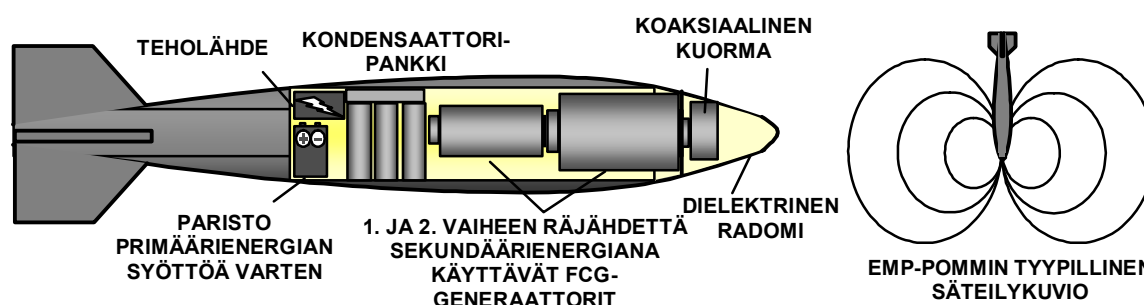
on rikki. Ohjukseen, rakettiin tai tykistökranaattiin asennettavaa HPM-taistelulatausta voidaan käyttää ilmamaalien (lentokone, helikopteri tai lennokki) torjuntaan, sillä HPM-aseen osumatarkkuuden ei tarvitse olla samaa luokkaa kuin konventionaalisen räjähteen, ja sen vaikuttavuus olisi parempi.

Suojautujan on itsensä tapauskohtaisesti pohdittava ja määriteltävä, mille tasolle järjestelmänsä suojaa: pieni suojataso edellyttää HPM-aseen torjumista kaukaa ja jos tämä ei ole mahdollista, tulee vastaavasti suojatason olla korkeampi. Lisäksi vaadittavaan suojatasoon vaikuttaa se, onko järjestelmissä tarkoitus käyttää COTS-tuotteita tai EMC-suojaamattomia sotilasjärjestelmiä, vai suojattua sotilaselektronikkaa. Kultakin järjestelmältä ja laitetilalta vaadittava suojataso tulisi aina arvioida ja määritellä tapauskohtaisesti uhan ja järjestelmän luonteen perusteella.

Sähkömagneettinen pulssi

Sähkömagneettinen pulssi EMP (ElectroMagnetic Pulse) liitetään korkealla ilmakehässä (>35 km) tapahtuviin ydinräjähdysiin; räjähdysten voimasta nopeasti kiihtyvät ja etenevät elektronit synnyttävät sähkömagneettista säteilyä. Kyse on siten eräänlaisesta sähkömagneettisesta shokkiaallosta. Pulssin sähkökenttä saavuttaa noin 50 kV/m tason (pulssin ERP-teho on suurimmillaan noin 50.000 TW). Pulssin nousuaika on 5 ns luokkaa ja kesto lähteestä riippuen 20 - 600 ns. EMP vaikuttaa olennaisesti matalammilla taajuuksilla kuin HPM-ase: 55 % pulssin energiasta on 100 kHz – 1 MHz kaistalla ja 33 % 1-10 MHz kaistalla. Toisin kuin HPM, ydinräjähdyksessä syntyvä sähkömagneettinen pulssi vaikuttaa hyvin laajalla alueella: säteilyvyöhyke on tyypillisesti viiden miljoonan neliökilometrin luokkaa.

Korkeaydinräjähteellä laukaistavan EMP:n käyttökynnys on luonnollisesti hyvin korkea, minkä vuoksi on pyritty kehittämään konventionaalisella räjähteellä toimiva EMP-taistelukärki. Konventionaalinen EMP-pulssi voidaan saada aikaan esimerkiksi pumppaamalla konventionaalisesta räjähdysestä saatavalla energialla magneettivuon kompressioon perustuvaa FCG-generaattoria (Flux Compression Generator) ja johtamalla saatu energia esimerkiksi johonkin säteilylähteeseen, kuten Vircator-putkeen. Mekanismit ovat siten paljolti samantaisia kuin HPM-aseissa, mutta toimintataajuus olennaisesti alhaisempi.



Kuva 313: EMP-pommin rakenne ja sille tyypillinen varsin leveä säteilykuvio. HPM-pommi voidaan tehdä samalla rakenteella vaihtamalla kuormaksi mikroaaltoputki (esimerkiksi Vircator) ja sen perään antenni (esimerkiksi helix). Samaa pommia voitaisiin siten käyttää tilanteen ja maalin mukaan joko EMP- tai HPM-aseena.

Vaikka EMP-pulssi kykenee indusoitumaan suojaamattomiin laitteisiin suoraan, sen ensisijainen vaikuttamismenetelmä on indusoituminen järjestelmään liitettyihin kaapeleihin ja johtu-

minen niitä pitkin laitetilaan. Periaatteessa suoraan järjestelmän suojattuun laitteistosuojaan kytkeytyvä teho ei riitä tuhoamaan sisällä olevia puolijohteita. Esimerkiksi 40 dB:n vaimennus riittää suojaamaan sisällä olevat puolijohteet EMP-pulssia vastaan, mikäli kyseessä on suoraan kytkeytyvä säteily. Järjestelmän kaapeleihin kytkeytyvä teho riippuu kaapeleiden pituudesta. Kaapeleita pitkin johtuvalta pulssilta suojaudutaan joko käyttämällä metallittomia valokaapeleita tai läpivienteihin asennettavia EMP-suodattimia.

Sokaisulaser

Sokaisulasereiden käyttö on kielletty Geneven ja Haagin sopimuksin. Sopimusten sisältö voidaan tiivistää seuraavasti:

- 1) Sellaisen laserjärjestelmän käyttö, jonka *ainoa tarkoitus* on sokaista suojaamatonta tai suojalaseilla varustettua silmää, on kielletty. Tällaisia järjestelmiä ei saa myöskään myydä tai luovuttaa toisille valtioille.
- 2) Laserjärjestelmät tulee pyrkiä suunnittelemaan siten, etteivät ne aiheuta vahinkoa silmälle.
- 3) Sallittujen laserjärjestelmien asianmukaisesta käytöstä oheisvaikutuksena aiheutuvat silmävauriot eivät kuulu sopimuksen piiriin.

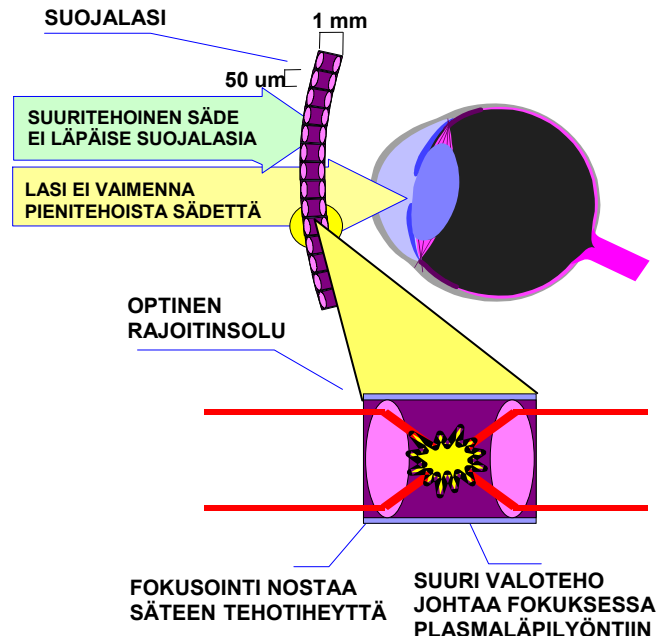
Sopimuksin ei siis ole kielletty lasersokaisujärjestelmien valmistusta, testausta, koulutusta tai varastointia. Myöskään optisia järjestelmiä vastaan suunniteltujen lasersokaisujärjestelmien käyttöä ei ole kielletty, vaikka näillä järjestelmillä voidaan aiheuttaa esimerkiksi kiikarin läpi katsovalle silmälle vakavia vaurioita. Seuraavassa tarkastellaan lasersäteilyn aiheuttamia vaurioita ja suojautumista lasersäteilyltä.

Näkyvän valon ja lähi-infrapun aallonpituuksilla (noin 400 – 1400 nm) säteily pääsee silmän sisälle. Silmän absorptio on suurimmillaan noin 550 nm aallonpituudella (keltavihreä), mikä vastaa auringon säteilyn intensiteettimaksimia. Tällä aallonpituudella myös sokaisulaserin silmään siirtämä teho on suurin. HeNe-rubiinilaserin aallonpituus on lähellä tätä, 632,8 nm. Toinen mahdollisuus on käyttää Neodyymi YAG –laseria ja taajuuskertojaa, jolla NdYAG:n 1064 nm aallonpituus saadaan sopivasti puolitettyä 532 nm:iin, joka absorboituu tehokkaasti verkkokalvoon. Ihmisen verkkokalvo vaurioituu noin 0,5 - 5 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ annoksella ja sarveiskalvo noin 1 J/cm^2 energialla. Laser aiheuttaa pienemmillä tehoilla tilapäisen sokaisuvaikutuksen, jonka kesto riippuu monesta seikasta, kuten tarkasteltavan kohteen ja sen taustan välisestä kontrastista ja taustan valaistustasosta. Kirkkaalla säällä vaikutus voi olla sekunteja, pilvisellä säällä kymmeniä sekunteja ja pimeällä useita minuutteja.

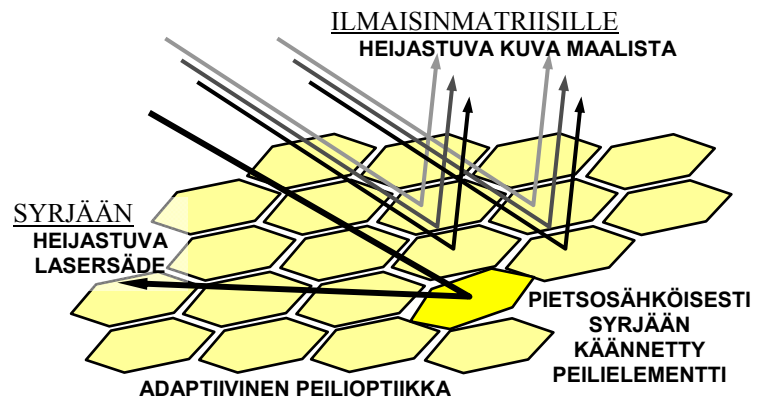
Mekaanisella sulkijalla varustettujen suojalaitteiden reagointinopeus ei riitä laserpulssin nopean nousujan ja lyhyen keston vuoksi. Pulssin nousuaika on vain muutamia nanosekunteja ja kokonaiskesto 50 ns luokkaa. Mahdollisina suojakeinoina lasersokaisua vastaan voidaan käyttää esimerkiksi jotakin seuraavista menetelmistä:

- 1) Optisen rajoittimen menetelmä perustuu plasmaläpilyöntiin. Siinä näkökentän eteen asetetaan suojalasi, joka koostuu pienistä soluista, joissa valoteho fokusoidaan pieneen tilaan. Suuritehoisen säteen valoteho ylittää fokuksessa läpilyönti-ilmiöön tarvittavan tehon aiheuttaen plasmapurkauksen. Menetelmän etuina on riittävä nopeus lyhyillekin pulsseille ja mekanismin monikäyttöisyys; suojalaseihin ei jää käytön jälkeä sokeita pisteitä.

- 2) Nanoteknologian yleistyessä voidaan kehittää adaptiivista optiikkaa, joka koostuu pienten pietsosähköisten elementtien ohjaamista muotoiltavista peilipinnoista. Järjestelmän kompleksisuudesta riippuen muokattavassa peilissä on kymmeniä tai satoja toimilaitteita, kukin kiinnitetty ohueen kalvoon, joka muodostaa peilipinnan. Peili voi koostua jatkuvasta kalvosta tai erillisistä kalvosegmenteistä. Voimakastehoisen lasersäteen osuessa elementtiin se kääntyy, jolloin säde projisoituu syrjään.
- 3) Laserin toiminta-aallonpituuden heijastavasta tai absorboivasta materiaalista valmistettua suojalasia. Ongelmana on kuitenkin se, että sokaisulaser voidaan käytännössä tehdä toimimaan lähes mille aallonpituudelle tahansa. Jos suojalasi heijastaa tai absorboi kaikki mahdolliset aallonpituudet, ei lasin läpi näe.
- 4) Itsefokusoivasta materiaalista valmistetuissa suojalaseissa voimakastehoisen lasersäde fokusoidaan ennen silmää. Ongelmaksi muodostuu nykyisten materiaalien pitkä reagointiaika, minkä vuoksi lyhytkestoinen suurenerginen pulssi ehtii vaurioittaa silmän verkkokalvoa ennen kuin suojalasi reagoi.
- 5) Itsetuhoavasta materiaalista valmistetuista soluista koostuvissa suojalaseissa suurienerginen fotonivirta tuhoaa solun, joka muuttuu läpinäkyvämmäksi ja estää säteen pääsyn silmään. Ongelmana on menetelmän kerta-käyttöisyys.



Kuva 314: Optisen rajoittimen toimintaperiaate.



Kuva 315: Adaptiivisen optiikan suojaama sensori.

Vaikka pelkästään silmävaurioihin tarkoitettujen lasersokaisujärjestelmien käyttö taistelukentällä onkin kielletty kansainvälisin sopimuksin, on erityisesti optisten sensorijärjestelmien lamauttamiseen ja tuhoamiseen tarkoitettujen sokaisujärjestelmien käyttö tulevaisuudessa todennäköistä. Tämän vuoksi myös lasersuojaukseen tulee suhtautua vakavasti, sillä silmävauriot ovat hyvinkin mahdollisia oheisvaikutuksia.

Suurteholaser

Lasereiden voidaan ajatella olevan sekä toissijainen sensorit lamauttava ase että pääase, jolla tuhotaan panssarioimattomia ilmamaaleja tai ohjuksia. Suurteho- tai korkeaenergiolaserin määritelmä on varsin epäselvä. Jotkut asiantuntijat käyttävät numeerisia teho- ja energia-arvoja, kun taas toiset määrittelevät suurteholaseriksi kaikki sellaiset laserit, jotka kykenevät vaurioittamaan kohdetta fyysisesti. Suurteho- tai korkeaenergiolaserien sovellukset voidaan jakaa kolmeen laajaan kategoriaan teho vaatimuksen perusteella:

- Sensoreiden sokaisu- ja harhauttaminen: omasuojahäirintälaserit (jamming laser)
- Sensoreiden ja optiikan vaurioittaminen: antisensorilaserit (anti-sensor laser, ASL)
- Rakenteellinen vaurioittaminen: tuhoamislaserit (high-energy laser, HEL)

Suurteholaserilla tarkoitetaan tässä asejärjestelmää, joka pyrkii tuhoamaan kohteensa erittäin suuritehoisen laserpulssin avulla. Halutun vaikutuksen lisäksi maalin ominaisuudet sekä käyttöympäristö määrittävät vaaditut laserin ominaisuudet, kuten säteen energian, aallonpituuden, huipputehon sekä lähteen pulssimaisuuden tai jatkuvatoimisuuden. Vastaavasti sade, sumu ja pöly sekä savut määrittelevät kantaman. Maalin herkkyys ja asetettu kantama-vaatimus ovat kaksi päätekijää lasertyyppin valinnassa.

lasertyyppi	aallonpituusalue
eksimeeri	UV (laboratoriokäytössä)
happi-Jodi	1,315 μm
vetyfluoridi	2,6 – 3,3 μm
deuteriumfluoridi	3,6 – 4,4 μm , tavallisin 3,8 μm

Taulukko 23: Antisensori- ja tuhoamislaserissa käytettäviä lasertyyppejä. [Paavo Raerinne]

Seuraavassa tarkastellaan offensiivisten lasereiden toimintaa. Sensoreiden sokaisuun ja harhauttamiseen pyrkiviä lasereita käytetään pääasiassa omasuojajärjestelmissä, joten ne myös käsitellään myöhemmin *omasuojajärjestelmät* -luvussa, vaikka sokaisulasereita voidaan käyttää myös offensiivisesti laajojen alueiden sokaisuun.

Offensiivinen antisensorilaser sisältää lasertutkan (LIDAR), joka lähettää pulsseja valvomaansa sektoriin. Kun pulssi kohtaa sensorin, joka on suunnattu antisensorilaseria kohti, heijastuu hyvin suuri osa sensorin lähettämästä pulssista takaisin retroheijastusilmion vuoksi. Ilmiö on sama, joka aiheuttaa kissan silmien kiilumisen pimeässä valon tulosuuntaan tapahtuvan voimakkaan heijastuksen vuoksi. Retroheijastuksen vuoksi heijastus optiikan akselin suuntaan on satoja tuhansia kertoja suurempi kuin muualle. Tämän vuoksi antisensorilaser kykenee havaitsemaan optisia sensoreita – aallonpituudesta riippuen myös sitä kohti katsovia ihmisiä ja eläimiä – hyvin kaukaa. Yksi esimerkki antisensorilaserista on amerikkalainen Stingray joita käytettiin kymmenkunta Persianlahden sodassa asennettuina M2 Bradley-ajoneuvoihin. Järjestelmä valvoo maastoa lähettämällä eri suuntiin pienitehoisia laserpulseja. Kun säde heijastuu vihollisen optiikasta takaisin, järjestelmä lähettää tähän suuntaan suuritehoisen laserpulssin, joka sokaisee vaunua tarkastelevan optiikan käyttäjän ja sekoittaa etäisyysmittarin tai valonvahvistimen toiminnan.

Sensoreiden ilmaisimen ja optiikan vaurioittaminen

Ilmaisimen vaurioittamiseen riittää noin 1-10 J/cm² energia. Infrapuna-optiikassa yleisesti käytetty germanium vaurioituu noin 1 kW/cm² lasertehosta (sekunnin pituinen CW-lähete) tai 10 J/cm² pulssienergiasta (1 µs pulssi). Ainakaan tehosta ja pulssin energiasta ilmaisimen ja optiikan vaurioittaminen ei siten ole kiinni. Pyrittäessä vaurioittamaan optiikkaa on otettava huomioon se, että vaurioitava energia on saatava absorboitumaan optisiin komponentteihin. Siten näkyvän valon ja lähi-infrapunan alueilla toimivien sensoreiden optiikkaa on vaurioitettava energialla, jonka aallonpituusalueella optiikassa käytetty lasi absorboi sitä, eli aallonpituuksilla, joilla lasi ei ole läpinäkyvää. Käytännössä VIS- ja NIR-sensoreita vastaan on siis hyökättävä MIR- ja FIR-lasereilla ja vastaavasti MIR- ja FIR-alueilla toimivien lämpökameroiden optiikkaa vastaan on hyökättävä VIS- ja NIR-lasereilla. Optisilla lasimateriaaleilla on erittäin huono lämmönjohtavuus, minkä vuoksi suuritehoinen laserpulssi kuumentaa optiikan pinnan nopeasti. Kuumentunut materiaali laajenee ja optiikka säröytyy.

Kuvaa muodostavien hakupäiden vaurioitumisalttius riippuu niiden rakenteesta; pyyhkäisevä järjestelmä on helpommin vaurioituva kuin matriisi-ilmaisimeen perustuva, sillä ensin mainitussa on vain yksi lamautettava elementti, mutta matriisi-ilmaisimessa muutaman elementin vaurioituminen ei vielä tee koko ilmaisinta toimintakyvyttömäksi.

Sensorin optiikka voidaan suojata esimerkiksi suodattamalla kaikki muut aallonpituudet kuin se, jolla ilmaisimella toimii. Toisaalta, jos sensorin optiikka suodattaa sokaisusignaalin pois, se myös absorboi tulevan säteilyenergian. Jos tämä energia on riittävän suuri, saattaa se säröyttää optiikan, jolloin sensori ei enää näe oikeallakaan aallonpituudella.

Rakenteellinen vaurioittaminen

Suurteholasereilta edellytetty suorituskyky ja ominaisuudet riippuvat maalityypistä ja halutusta vaikutuksesta. Esimerkiksi sensorin voi lamauttaa tehokkuudella 10⁻⁴ – 1 J/cm², kun taas rakenteellisen termisen vaurion synnyttäminen vaatii 2 – 40 kJ/cm². Voidaan olettaa, että taktiselle maa-alustalle sijoitettu kemiallinen laser voisi tuottaa rakenteelliseen tuhoamiseen riittävän energian vuoteen 2020 mennessä. Vapaaelektronilasereiden käyttö rajoittuu kuitenkin kiinteään installaatioon. Sensoreiden sokaisu, harhauttaminen ja jopa rakenteellinen vaurioittaminen voidaan tehdä joko koherenteilla laserdiodirivistöillä tai laserdiodin pumpaamalla kiinteäainelasereilla.

Suuritehosen lasersäteen maalissa aiheuttama efekti on primäärisesti terminen. Suurilla energioilla mekanismi on lämpömekaaninen, koska nopea lämpötilan muutos aiheuttaa suurpaineaaltoja tai shokkiaaltoja, jotka saavat aikaan vaurioita kohteen rakenteessa. Tuhovaikutukseen tarvittava energia on olennaisesti sokaisulaserissa tarvittavaa energiaa suurempi; esimerkiksi reiän polttamiseksi millimetrin paksuiseen alumiinilevyyn tarvitaan noin 15 kJ/cm² energia. Saman paksuisen teräslevyn höyrystämiseen tarvitaan noin 17 kJ/cm² energia. Ohjusten hakupäiden ja valvonta- sekä seurantajärjestelmien sensoreiden tuhoamiseen riittää tuhannesosa tästä tehosta, noin 10 J/cm². Riittäviä pulssienergioita voidaan saavuttaa esimerkiksi 1,3 µm atomijodilaserilla ja 3,8 µm deuteriumfluoridilaserilla. Myös hiilidioksidilaserilla päästään lähes samoihin tehoihin.

Lasersäteilyn höyrystäessä metalliatomeja levyn pinnasta höyrystyneet atomit muodostavat suojakerroksen levyn lähelle. Tämän vuoksi laserjärjestelmän on kyettävä seuraamaan maalia suhteellisen pitkän – millisekuntiluokkaa olevan – ajan. Tämä edellyttää adaptiivisen optiikan

käyttämistä laserissa. Adaptiivista optiikkaa tarvitaan suurteholasereissa myös ilman turbulenssien, säteen lämpölaajenemisen sekä muiden lasersädettä hajottavien tai taivuttavien häiriötekijöiden kompensoimiseen. Optiikka havaitsee esimerkiksi ilman turbulenssista johtuvat optiset poikkeamat aaltorintamassa, minkä perusteella peilipinnan muotoa säädetään, joka puolestaan säättää lasersädettä. Muokattavien peilien käyttö muodostaa perustan liikkuvien maalien automaattiselle seurannalle. Lasersäde voidaan fokusoida paikallaan pysyväksi pisteeksi maalissa. Tämä mahdollistaa riittävän suuren energian kohdentamisen maaliin.

Laseri	Ominaisuuksia
AURORA Tutkimuskäyttö, USA	KrF eksimeerilaseri, 0.25 μm , 1.3 kJ/pulssi, 380 ns
ABL (AirBorne Laser) / COIL (Chemical Oxygen-Iodine Laser) Taktisten, ballististen ohjusten (SCUD) tuhoamiseen, USA	Happi-jodi (atomijodi) -kemiallinen laser, 1.315 μm Lentokoneasennus B-747-400F, operatiivinen koe 2003, järjestelmä (7 yksikköä) valmis 2007 ?
MIRACL (Mid-InfraRed Advanced Chemical Laser) USA-Israel	Deuteriumfluoridi (DF) kemiallinen laseri, 3.8 μm , CW 2.2 MW, kokeiltu 122 mm rakettiin
Star Wars -ohjustentuhooja, USA, satelliittiasennus (2005?)	Vetyfluoridi (HF) kemiallinen laseri, 2.6 - 3.3 μm
HELEX, Saksa (kehitteillä?)	Hiilidioksidilaseri, 10.6 μm

Taulukko 24: Esimerkkejä kehitteillä olevista tuhoamislasersarjaprojekteista. [Paavo Raerinne]

Laserpulssin normaalin leviämisen lisäksi diffraktio, seurantajärjestelmän värinä ja ilman turbulenssit laskevat pulssin tehoa etäisyyden myötä. Lisäksi pitkään kestävä pulssi lämmittää ilmaa, jolloin ilman taitekerroin muuttuu ja säde leviää laajemmalle alalle.

Tässä luvussa käytiin läpi kolmas taistelukentän keskeinen elementti, asejärjestelmä. Tarkastelun painopiste oli kirjan painopisteen mukaisesti sähkömagneettisen spektrin hyödyntämisessä. Seuraavassa luvussa tutustutaan omatunnistusjärjestelmiin, jotka mahdollistavat asejärjestelmien käyttämisen niiden ja sensorijärjestelmien mahdollistamilta kantomilta.

OMATUNNISTUSJÄRJESTELMÄT

OMIEN TUNNISTUS TAISTELUKENTÄLLÄ

Tekninen kehitys on lisännyt sekä sensorijärjestelmien suurinta havaitsemisetaisyttä että asejärjestelmien tehokasta kantamaa. Tämän vuoksi maaleja voidaan havaita, paikantaa ja tulittaa entistä kauempaa. Taistelun temmon kiihtyminen sekä itsenäisemmän ja aloitteellisemmän taisteludoktriinin korostuminen on johtanut siihen, ettei havaittuja maaleja voida enää tunnistaa omiksi tai vihollisiksi niiden sijainnin tai kulkusuunnan perusteella, niin kuin toisen maailmansodan linjataisteluissa. Asejärjestelmien tarkkuuden ja tuhovoiman kasvu puolestaan merkitsee sitä, että ensin ampuvalla on huomattava etu toiseksi jäävään nähden: yksi laukaus – yksi osuma – yksi tuhoutunut maali -tilanteessa vain tulenavauksen nopeudella on merkitystä. Kun nopeasti liikkuvat taistelevat joukot ovat lomittuneet toisensa sekaan, on päätös siitä ammutaanko havaittua kohdetta tehtävä hyvin nopeasti. Tällöin omien ja vihollisen tunnistaminen toisistaan muodostuu erittäin tärkeäksi taistelun lopputulokseen vaikuttavaksi tekijäksi. Mikäli omia ei kyetä erottamaan vihollisista, joudutaan tulen avaamista viivyttämään keinotekoisesti tai sitten tulta käytetään ennen kuin maali kyetään yksilöimään, mikä johtaa väistämättä omasta tulesta johtuviin tappioihin. Tällä vuosisadalla omasta tulesta johtuvien tappioiden osuus on ollut keskimäärin noin 15%, mutta Persianlahden sodassa jopa 25 % liittouman tappioista johtui omasta tulesta – esimerkiksi brittien maajoukkojen ainoat taistelutappiot syntyivät amerikkalaisten A-10-rynnäkkökoneiden hyökättyä brittien Warrior-taistelujoukkoja vastaan⁴⁶. Näin merkittävä omasta tulesta johtuva tappio-osuus johtaa väistämättä moraalin laskemiseen ja taistelun temmon hidastumiseen, millä kummallakin voi puolestaan olla kriittinen vaikutus taistelun lopputuloksen kannalta.

Maalin tunnistaminen voidaan perustaa maalin fyysisiin ominaisuuksiin (non-co-operative methods), maalin itsensä antamaan ilmoitukseen (co-operative methods) tai muualta saatavaan tietoon (situational awareness). Ensin mainitussa menetelmässä käytetään hyväksi esimerkiksi tietoa maalin koosta, tutkapoikkipinta-alasta, ulkomuodosta, lämpötilasta, lämmön jakaumasta tai liikerataan liittyvistä parametreista, kuten nopeus, kulkusuunta tai kiihtyvyys. Tällöin maalia on kyettävä seuraamaan suhteellisen pitkän aikaa, siitä on saatava riittävän suuri signaalitaso ja lisäksi sensorin erottelukyvyn on oltava riittävä maalin yksilöimiseen. Tämä viivästä tulen avaamista. Toisessa menetelmässä omat järjestelmät varustetaan erityisillä omatunnistuslaitteistoilla. Nämä laitteistot kykenevät vähentämään omasta tulesta johtuvia tappioita, ja yhdistettynä toimivaan taistelutilanhallintajärjestelmään (BMS, Battle Management System) ne voivat lisätä tulen avaamisen nopeutta. Omatunnistuslaitteiston yhtenä tukipylväänä onkin juuri tehokas taistelutilan hallintajärjestelmä. Sen perustana puolestaan on yleisimmin satelliittipaikannusjärjestelmä sekä tila- ja sijaintitiedonvälitysjärjestelmä. Näiden avulla voidaan muodostaa kattava ja reaaliaikainen tilannekuva, jolla omien sekä havaittujen vihollisen joukkojen sijainti saatetaan kaikkien omien joukkojen tietoon.

Perinteisesti maalit on tunnistettu niiden fyysisten ominaisuuksien perusteella kiikarin tai valonvahvistimen avustamana ihmissilmällä. Taistelukentällä leijuva savu, sumu ja pöly sekä lumi-, räntä- ja vesisade saattavat estää visuaalisen tunnistuksen. Tällöin päätös ampumisesta

⁴⁶ Darren Lake & Kim Burger: *UK, USA must do more to reduce "friendly fire" risk*. JDW 22 January 2003: 3

on tehtävä esimerkiksi lämpökameran tai tutkan antamien tietojen perusteella. Näiden resoluutio on kuitenkin olennaisesti pienempi kuin ihmissilmän eikä niiden erottelukyky useinkaan riitä maalin yksilöintiin niiltä etäisyyksiltä, joilta maali kyettäisiin sensori- ja asejärjestelmän puitteissa tuhoamaan. Erityisen vaikeata omien ja vihollisten erottaminen toisistaan on tilanteissa, joissa kumpikin osapuoli käyttää samanlaista tai jopa samaa kalustoa. Tällaisten tilanteiden määrän ennustetaan kasvavan tulevaisuudessa erilaisten kansainvälisten operaatioiden lisääntymisen myötä. Maalin fyysiset ominaisuudet eivät siten enää mahdollista riittävän nopeata ja luotettavaa omien ja vihollisten erottelua tarvittavilta etäisyyksiltä.

AKTIIVINEN OMATUNNISTUSJÄRJESTELMÄ

Elektronisia omatunnistuslaitteistoja on jo pitkään käytetty ilmasodankäynnissä estämään hävittäjiä ja omaa ilmatorjuntaa ampumasta omia koneita. Lentokoneisiin tarkoitettuista omatunnistusjärjestelmistä käytetään yleisesti nimitystä IFF-järjestelmä (IFF, Identification Friend or Foe). Persianlahden sotakokemusten perusteella todettiin yhdeksi tärkeimmäksi kehityskohteeksi vastaavanlaisten järjestelmien kehittäminen myös maasodankäynnin järjestelmiin ja nykyään ne ovat leviämässä myös maataisteluaajoneuvoihin⁴⁷.

Omatunnistus voi perustua maalin määrittävän järjestelmän ja maalin väliseen kaksisuuntaiseen kommunikointiin, jossa maalin määrittävä järjestelmä lähettää kyselypulssein, johon omien maalien edellytetään vastaavan. Kysely voidaan toteuttaa laseretäisyysmittarilla tai erillisellä radiotaajuisella laitteistolla. Kyselypulsseista maali tietää, että sitä mittaava ase tai tulenjohtojärjestelmä on oma eikä maalin siten tarvitse ryhtyä vastatoimenpiteisiin. Maali vastaa kyselyyn ilmoittamalla salatulla yhteydellä oman tunnisteensa sekä sijaintinsa, mikäli se tietää paikkansa. Mittaava järjestelmä vertaa maalin antamaa sijaintitietoa oman tulenjohtojärjestelmänsä laskelmiin. Mikäli tiedot vastaavat toisiaan, hyväksytään mitattu maali omaksi. Jos taas maalin antama sijaintitieto poikkeaa tulenjohtojärjestelmän laskemasta sijainnista, on mahdollista, että ampumalinjalla on sekä oma että vihollisen kohde. Jos taas vastausta kyselypulsssiin ei saada lainkaan, on mahdollista, että kohde on vihollinen. On huomattava, että omatunnistusjärjestelmästä voidaan ainoastaan saada tieto siitä, onko kohde oma tai onko sen tunnistaminen mahdotonta. On mahdollista, että mitattava kyselyn kohde ei vastaa kyselyyn, koska sen omatunnistuslaitteiston vastaanotin, lähetin tai antenni on rikkoutunut, tai kohdetta ei ole varustettu lainkaan omatunnistuslaitteistolla. Siten päätös tulen avaamisesta on kuitenkin tehtävä perustuen tilanteen arvioimiseen: pitäisikö tulilinjalla olla omia vaiko vihollisia? Mikäli hypoteesi on se, että tarkasteltavassa sektorissa on omia, aselavetin johtaja tuskin avaa tulta sillä perusteella, ettei omatunnistejärjestelmän vastausta saada. Jos sen sijaan johtajan tilannetietoisuuden mukaan sektorissa pitäisikin olla vihollisia, tai sektorin pitäisi ainakin olla vapaa omista joukoista, tulenavaus tehtänee aina kun vastausta kyselypulsssiin ei saada. Tämän vuoksi kattavalla, oikealla ja reaaliaikaisella tilannetietoisuudella on hyvin suuri merkitys omatunnistusjärjestelmän käytännön toimivuuden kannalta.

Maavoimakäyttöön tarkoitettuja omatunnistusjärjestelmiä ei vielä ole laajamittaisessa palveluskäytössä. Kehityksen alla niitä sen sijaan on ainakin suurimmissa NATO-maissa.

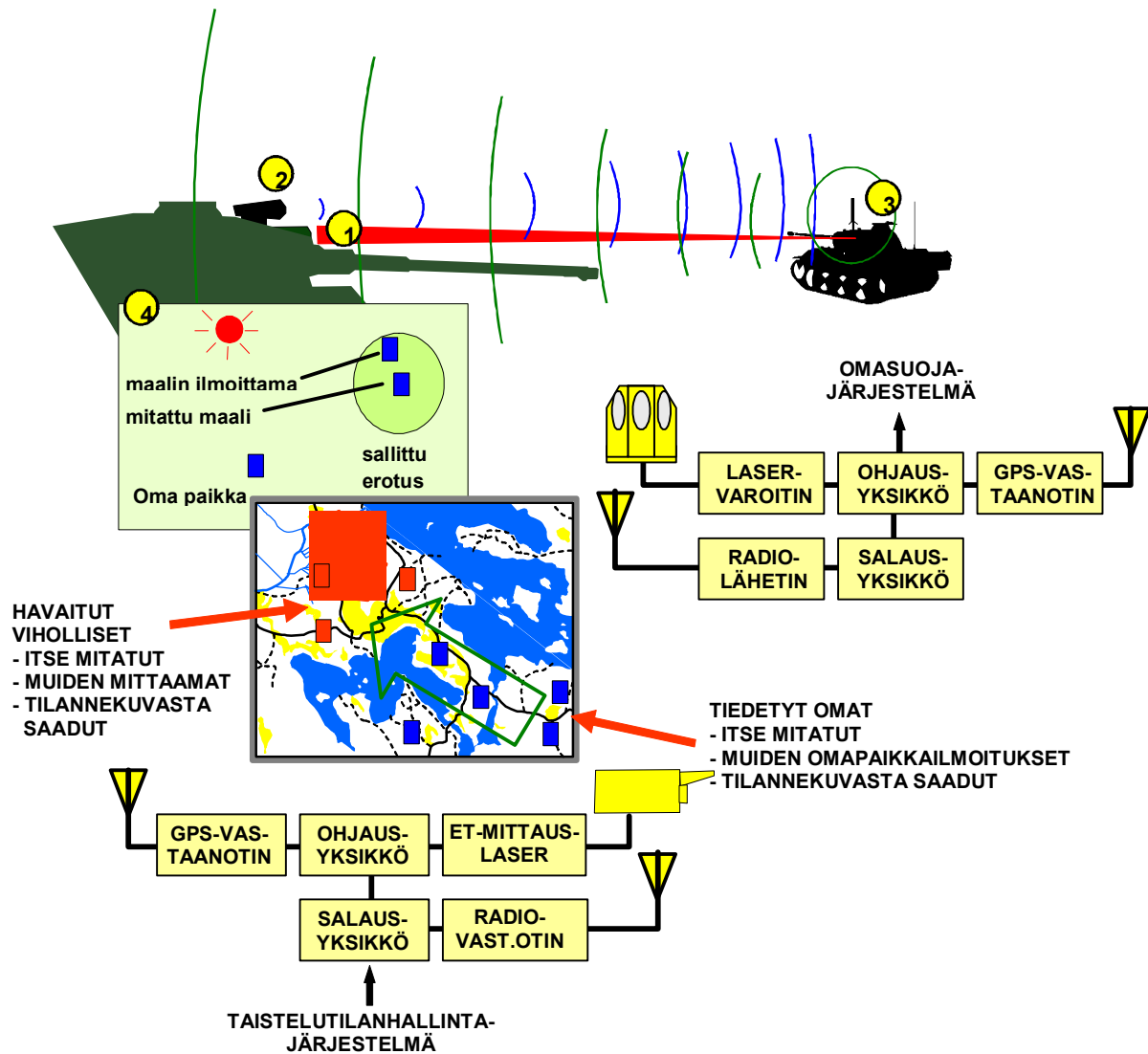
⁴⁷ Vaikka 24% kokonaistappioista syntyi omasta tulesta, oli maasta-maahan tilanteiden osuus 61% itselle aiheutetuista tappioista Darren Lake & Kim Burger: *UK, USA must do more to reduce "friendly fire" risk*. JDW 22 January 2003: 3

Esimerkkinä aktiivisesta järjestelmästä mainittakoon amerikkalainen BCIS-järjestelmä (Battlefield Combat Identification System), joka perustuu 38 GHz alueella välitettävään hyppivätaajuiseen hajaspektriläheteeseen. Järjestelmä käsittää kapeakeilaisen kyselyantennin sekä ympärisäteilevän vastausantennin. Kyselypulsseja lähetetään laseretäisyysmittauksen yhteydessä PIM-koodattuna (Pulse Interval Modulation). Mikäli mittauksen kohteena on oma BCIS-laitteistolla varustettu järjestelmä, se tietää PIM-koodista, että lasermittausta suorittava asejärjestelmä on oma ja lähettää koodatun hajaspektripulssin ympärisäteilevään antenniinsa. Jos lasermittauksen yhteydessä ei saada kyselyä, kohde voi esimerkiksi laukaista suojasavut automaattisesti, koska tällöin voidaan olettaa mittaaajan tai valaisijan olevan vihollinen. Kun kysyvä järjestelmä vastaanottaa koodatun lähetteen, tulee sen asejärjestelmän näytölle oman maalin tunniste. Muussa tapauksessa järjestelmä luokittelee maalin tunnistamattomaksi. Mikäli BCIS-järjestelmän ilmoittama etäisyystieto ei täsmää laseretäisyysmittarin antaman tiedon kanssa, järjestelmä ilmoittaa että kohde on tunnistamaton mutta että kyselysektorissa on omia.

Alustat, joissa ei ole ampuvaa asejärjestelmää voidaan varustaa pelkällä ympärisäteilevällä vastausantennilla. BCIS-järjestelmälle asetettujen toiminnallisten vaatimusten mukaan sen on kyettävä tunnistamaan oma kohde 90 % todennäköisyydellä alle sekunnissa. Toiminta-etäisyysvaatimus vaihtelee 3 kilometristä (sateella) 5,5 kilometriin (kirkkaalla säällä). BCIS-järjestelmää muistuttavia muita järjestelmiä ovat esimerkiksi ranskalainen DIC (Dispositif d-Identification au Combat) sekä saksalainen ZIFF (Zielerkennung Freund/Fiend).

Vaihtoehtona kyselypulssien avulla tehtävään tunnistamiseen on lähettää omatunnistetta jatkuvasti. Tällaisesta järjestelmästä esimerkkinä voidaan mainita englantilainen MAGPIE (MALvern General Purpose Identification Equipment). Millimetrialtoalueella toimiva järjestelmä on tarkoitus asentaa jokaiseen englantilaiseen taisteluajoneuvoon joka voi käyttää suoraa tai epäsuoraa tulta ja muut ajoneuvot varustetaan pelkillä lähettimillä.

Omatunnistusjärjestelmän suurimpina ongelmoina voidaan mainita järjestelmiltä vaadittava korkea luotettavuus sekä pelko siitä, että aktiivisia lähettäjiä sisältävä järjestelmä paljastaa omat joukot vihollisen tiedustelulle. Luotettavuusvaatimusten vuoksi omatunnistuslaitteiston on oltava riittävän yksinkertainen ja suojattu esimerkiksi sirpalevaikutusta vastaan. Paljastumisen estämiseksi ja riittävän suuren kulmaresoluution saavuttamiseksi järjestelmissä voidaan käyttää kyselyläheteenä lasersignaalia tai millimetrialtoaluetta. Radiosignaalin taajuus voidaan valita niin, että ilmakehän vaimennus estää kohteen paikantamisen tehokasta ampumaetäisyyttä kauempaa. Lisäksi hajaspektrimenetelmiä voidaan käyttää lähetteen paljastumisen hidastamiseksi ja häiritävyyden vähentämiseksi. Mikäli useita IFF-laitteistolla varustettuja järjestelmiä toimii pienellä alueella, on mahdollista, että eri alustojen IFF-vasteet sotkevat toisensa jolloin niitä valaiseva järjestelmä ei kykene tunnistamaan niitä omiksi. Tämän vuoksi IFF-järjestelmissä on käytettävä CSMA-tyyppistä (Collision Detection Multiple Access) siirtoväylällä tapahtuvat yhteentörmäykset tunnistavaa järjestelmää, joka yhteentörmäyksen havaittuaan odottaa satunnaisen ajanhetken ja lähettää tunnisteiden uudelleen. Vastaavasti kyselyjärjestelmä lähettää useita kyselypulsseja ennen kuin päättelee valaistun kohteen omaksi tai viholliseksi.



Kuva 316: Esimerkki aktiivisen omasuojajärjestelmän toimintavaiheista: 1. vaunu mittaa laseretäisyydsmittarilla maalin etäisyyden. 2. samanaikaisesti lähetetään voimakkaasti suuntaavalla antennilla kapeakeilainen kyselypulsси mitattuun kohteeseen. 3. kohteessa oleva lähetinvastaanotin tunnistaa tulevasta kyselystä lasermittaajan omaksi ja lähettää vastauksena oman tunnisteensa ja sijaintinsa. 4. mittaava vaunu vertaa maalin ilmoittamaa sijaintia itse laskemaansa päätelläkseen tuliko vastaus mitatusta vaunusta vai muualta kyselypulssin sektorista. Mitattua maalia ja sen antamaa ilmoitusta verrataan tilannekuvaan, ja tarvittaessa tilannekuvaa päivitetään.

Radiotaajuista omatunnistusjärjestelmää halvempi vaihtoehto on varustaa suojattavat kohteet infrapunamajakoilla (thermal beacon), jotka lähettävät joko valovahvistimilla näkyvää lyhytaaltoista säteilyä tai lämpötähtäimillä havaittavaa pitkäaaltoista infrapuna-säteilyä. Vaihtoehdon ongelmana on luonnollisesti se, että majakka näkyy myös viholliselle, jos tällä on käytössään nykyaikaisia pimeätoimintavälineitä.

Tekniikan kehittyessä laseretäisyydsmittarit, lasertähtäimet ja laservaroittimet yleistyvät myös taistelijan varustuksessa, mikä toisaalta mahdollistaa ja toisaalta vaatii omatunnistusjärjestelmien ulottamisen koskemaan myös yksittäisiä taistelijoita. Tällaisen järjestelmän on oltava kevyt ja yksinkertainen. Järjestelmä voisi perustua esimerkiksi lasertähtäimestä lähtevään

koodattuun infrapuna-alueella olevaan pulssiin, jonka taistelijan kypärään sijoitettu laser-varoitin ilmaisisi ja johon vastattaisiin automaattisesti taistelijan lähiradion välityksellä.

Omatunnistuslaitteistoilla kyetään vähentämään omasta tulesta johtuvia tappioita, mutta tulen avaamisen nopeuttamiseksi ne on liitettävä taistelutilanhallintajärjestelmään, jossa tiedot omista ja tunnistamattomista tai vihollisiksi tunnistetuista kohteista välitetään automaattisesti kaikille tarvitsijoille. Joidenkin NATO:n arvioiden mukaan kaikki liittouman järjestelmät tullaan varustamaan millimetrialtoalueella toimivin kysely-vastaus-omatunnistusta järjestelmin. Maasijoitteisten omatunnistusjärjestelmien ongelmana on sekä standardoinnin puute, että eri maiden asevoimien erilaiset prioriteetit niiden kehittämisessä ja varustamisessa. Muuttunut sodan kuva korostaa liittoumaoperaatioita ja siten tarvetta standardoituun ja liittouman yhtenäiseen omatunnistuskäyttöön. Tämä oli yksi USAn perusteista keskeyttää BCIS-järjestelmän kehittäminen. Toinen syy oli kehittäminen ja varustamisen vaatima hyötyjä suuremmaksi arvioitu kustannus. Kehittämistä jatketaan kokonaisuutena, jonka muodostaa omatunnistuskäyttö, tilannetietoisuus ja taktiikka sekä taistelutekniikka.

PASSIIVINEN OMATUNNISTUS

Tässä passiivisella omatunnistuksella tarkoitetaan sitä, ettei kohde osallistu aktiivisesti tunnistusprosessiin (non-co-operative IFF), vaan tunnistuksen tekee maalia valaiseva sensori maalin ominaisuuksien perusteella. Passiivinen omatunnistus edellyttää sensorijärjestelmältä riittävää erottelukykä. Näkyvän valon aallonpituuksilla tämä ei ole ongelma, eikä kaikissa tilanteissa infrapuna-alueellakaan. Maali voidaan tunnistaa esimerkiksi ääriviivojensa perusteella, tai se voidaan varustaa näkyvän valon alueella tai infrapuna-alueella näkyvin merkinnöin. Esimerkiksi lämpökameroita varten voidaan käyttää infrapunasäteilyä heijastavaa teippiä, jolla tehtävä merkintä sijoitetaan vinoon pystypintaan siten, että se heijastaa kylmän taivaan sensoriin päin. Passiivisten menetelmien heikkoutena on se, että ne väistämättä lisäävät kohteen paljastuvuutta. Ongelmaksi muodostuu se, että ollakseen tehokkaita, niiden on näytävä, jotta kohde voidaan tunnistaa omaksi, mutta toisaalta ne eivät saisi heikentää häivesuojaa, minkä vuoksi ne eivät saisi näkyä kovin kauas.

Persianlahden sodassa käytettiin ajoneuvojen ja panssarivaunujen omatunnistusvälineenä ajoneuvoon kiinnitettyä ▲ -muotoista teippausta. Teippi oli väriltään mustaa ja siinä oli erittäin alhainen infrapunaemissiivisyys, minkä vuoksi se näkyy sekä visuaalisella tähytyksellä että lämpötähtäimissä selvästi erottuvana tummana kohteena. Teippien ongelmana on se, että ne ovat myös vastapuolelle selvästi näkyviä tunnistaita, joten todennäköisesti paras hyöty niistä on vahvemmalle osapuolelle. Teippien hyvänä puolena on se, että ne ovat huomattavasti edullisempia kuin aktiiviset järjestelmät käyttö on helposti laajennettavissa kaikenlaisiin kohteisiin (ml ottoajoneuvot).

Myös laserprismojen käyttöä passiiviseen omasuojaan on tutkittu. Menetelmä on puoliaktiivinen, eli kohdetta valaiseva järjestelmä lähettää laserpulssin, joka heijastuu prismasta takaisin kyselijään. Prisma voi olla toteutettu esimerkiksi MEMS-tekniikalla (Micro Electrical Mechanical System), jossa sähkövirtaa käytetään mikroskooppisten peilien kääntämiseen prismassa. Moduloimalla virtapulsseja yhteisesti sovitulla valesatunnaisella koodilla saadaan prismasta heijastavuutta katkottua siten, että kyselijä kykenee tunnistamaan valaisemansa kohteen omaksi ja – mikäli tämä ominaisuus on toteutettu – myös yksilöimään sen.

Tutkajärjestelmien kulma- ja pituuserottelukyky ei yleensä riitä passiiviseen omatunnistukseen. Esimerkiksi 94 GHz taajuudella 40 cm levyinen antennin keulanleveys on noin 0,5 astetta, mikä 3 km etäisyydellä vastaa poikittaissuunnassa 27 metriä. Tällaisella erottelukyvyllä ei voida tunnistaa maalia sen rakenteen perusteella. Tutkajärjestelmillä voidaan kuitenkin saavuttaa hyvä etäisyys- ja dopplerresoluutio. Riittävän suuri etäisyysresoluutio mahdollistaa maalin pituussuuntaisten heijastusominaisuuksien arvioimisen. Tällöin voidaan pyrkiä erottamaan esimerkiksi lentokoneen nokan, ohjaamon, siipien, moottoreiden sekä sivu- ja korkeusvakaajien sijainti toisiinsa nähden. Kullakin lentokonetyypillä on oma tietokantaan tallennettu 'sormenjälkensä', jonka perusteella tutkajärjestelmän tietokone pyrkii luokittelemaan maalin automaattisesti. Hyvä etäisyysresoluutio edellyttää lyhyttä pulssia tai suuren pulssikompression käyttämistä. Näitä on käsitelty matemaattisesti *tutkajärjestelmät*-luvussa. SAR-tutkan mahdollistama suuri pitkittäis- ja poikittäisresoluutio mahdollistaa varsin hyvän maalien erottelukyvyn, mutta vaatii vastaavasti tehokkaan signaalin prosessoinnin. UHF/VHF-alueen SAR:n resoluutio on 0,5 – 2 metriä ja korkeammilla taajuuksilla SAR:lla päästään tätäkin parempaan erottelukyvyn, mikäli prosessointikapasiteetti tämän mahdollistaa.

Hyvä dopplerresoluutio mahdollistaa maalin liikkuvien osien, kuten potkurilapojen, suojaamattomien turbiininsiipien, pyörivän tutka-antennin, tai liikkuvien telojen ja pyörien erottamisen taajuustasossa. Tällöin luokittelussa voidaan käyttää etäisyysresoluution lisäksi tietoa potkurilapojen tai turbiinin siipien lukumäärästä, antennin pyörimisnopeudesta yms. Dopplerresoluutio riippuu tutkan toimintataajuudesta sekä maalin valaisujasta, kuten *tutkajärjestelmät*-luvussa esitettiin. Mitä pidempään tutka valaisee maalia ja mitä suuremmalla taajuudella se toimii, sitä parempi erottelukyky taajuustasossa saavutetaan. Siten 34 - 94 GHz taajuuksilla toimivilla millimetriaaltotutkilla voidaan saavuttaa samassa valaisujassa huomattavasti suurempi taajuusresoluutio kuin noin 3 GHz alueella toimivilla valvonta- tai noin 10 GHz alueella toimivilla seurantatutkilla.

Tässä luvussa käytiin lyhyesti läpi omatunnistusjärjestelmän merkitys taistelun temmon ylläpitämisessä sekä erilaisia vaihtoehtoja tunnistaa maali omaksi tai viholliseksi. Hyvällä tilannetietoisuudella on keskeinen merkitys omatunnistusjärjestelmien hyödyntämiselle. Seuraavassa luvussa perehdytään jo aiemmin mainittuihin omasuojajärjestelmiin, joiden tehtävänä on estää ammusta osumasta maaliinsa.

OMASUOJAJÄRJESTELMÄT

Omasuojajärjestelmä on ennen nähty lähinnä kalliiden ilma-alusten sekä isoimpien laivaston alusten suojajärjestelmänä ilma- ja merimaali-ohjuksia vastaan. Taistelukentän järjestelmien kallistumisen sekä korkeateknologisen uhan kasvun myötä omasuojajärjestelmät ovat tulossa myös taistelukentän keskeisiin lavetteihin. Omasuojajärjestelmän välittömänä tavoitteena on saada vastustajan ase harhautumaan maalista (ns. soft kill) tai tuhota se ennen kuin se ehtii vaikuttamaan suojattavaan kohteeseen (ns. hard kill). Varusteluprosessin kannalta tavoitteena on luonnollisesti suojata korkeateknologiset kohteet järjestelmällä, joka pakottaa vastustajan käyttämään niitä vastaan yhä kalliimpia aseita.

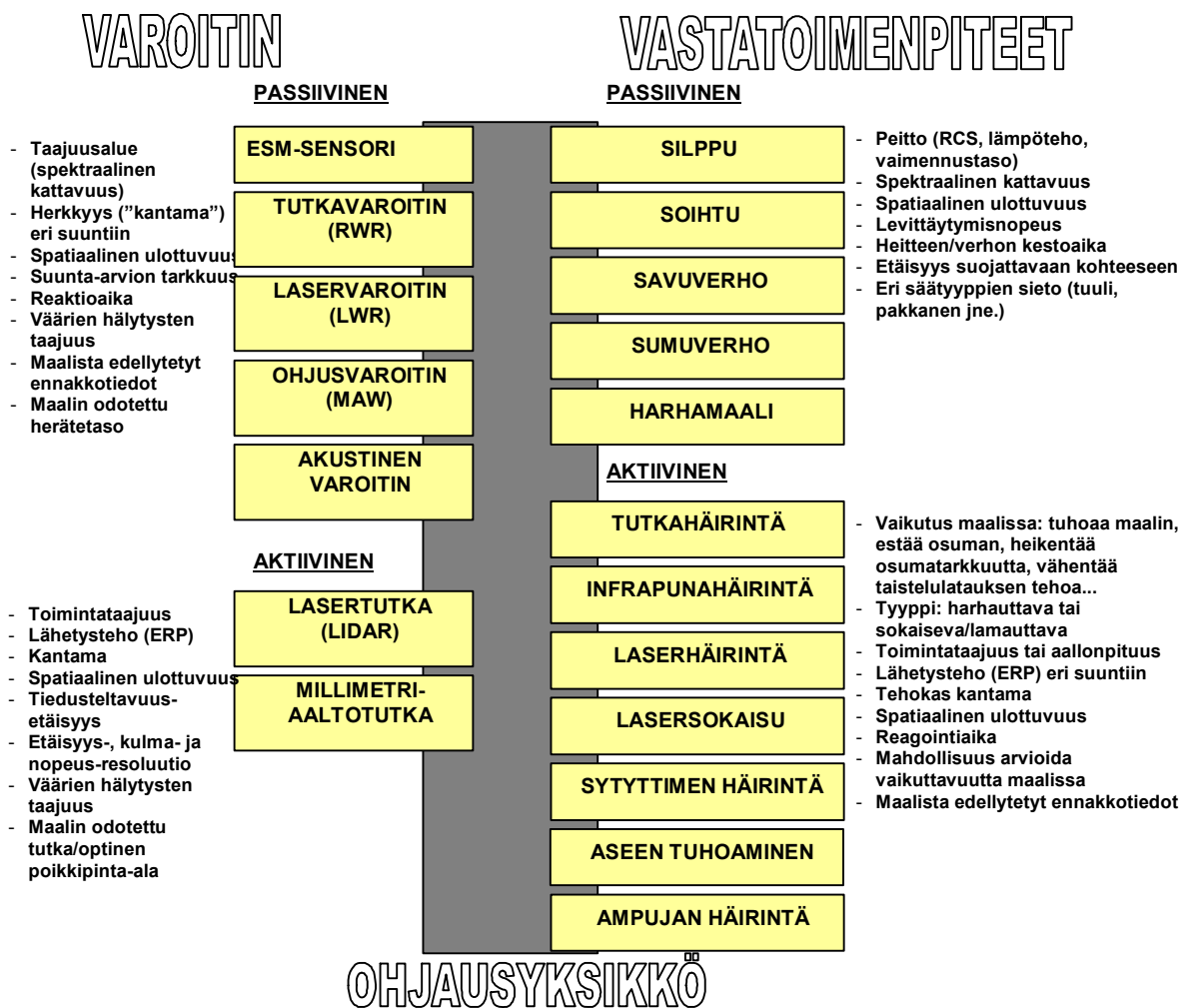
Omasuojajärjestelmät ovat osa kohteen kokonaissuojaa ja ne liittyvät kiinteästi sekä tilannetietoisuuteen että lavetin herätteen minimointiin. Häivetekniikan avulla saadaan vähennettyä kohteen herätettä, mikä puolestaan lyhentää sensoreiden havaitsemis- ja tunnistamisetäisyyksiä. Käyttämällä kohdetta siten, etteivät uhkaavat sensorijärjestelmät pääse havaitsemis- tai yleisemmin tunnistamisetäisyydelle, kohde on suojassa. Yleensä pelkkä kohteeseen integroitu häivetekniikka ei tuo riittävää suojaa, vaan kohde on maastoutettava. Kohteen lähtiessä liikkeelle maastouttamisen mukanaan tuoma lisäsuoja katoaa. Lisäksi kohteen herätetaso nousee ja kohde on havaittavissa myös jättämistään jäljistä. Moderneilta verkottuneilta spektrin eri alueilla toimivilta sensoreilta on käytännössä lähes mahdotonta suojata liikkuvaa maalia. Tällöin on keskityttävä osuman välttämiseen.



Kuva 317: Omasuojajärjestelmän primäärisenä tehtävänä on osuman välttäminen ja sekundäärisenä tehtävänä aseiden toiminnan häiritseminen siinä määrin, ettei sen taistelulataus kykene läpäisemään kohteen suojapanssaria.

OMASUOJAJÄRJESTELMÄN RAKENNE

Omasuojajärjestelmä koostuu sensoreista, sulautettuun tietokonejärjestelmään perustuvasta ohjauksijärjestelmästä sekä aktiivista ja passiivisista vastatoimenpidelaitteistoista. Omasuojajärjestelmissä käytettävät sensorit ja vastatoimenpidelaitteistot riippuvat suojattavan kohteen tyypistä, uhan luonteesta sekä varustamiseen käytettävissä olevista varoista.



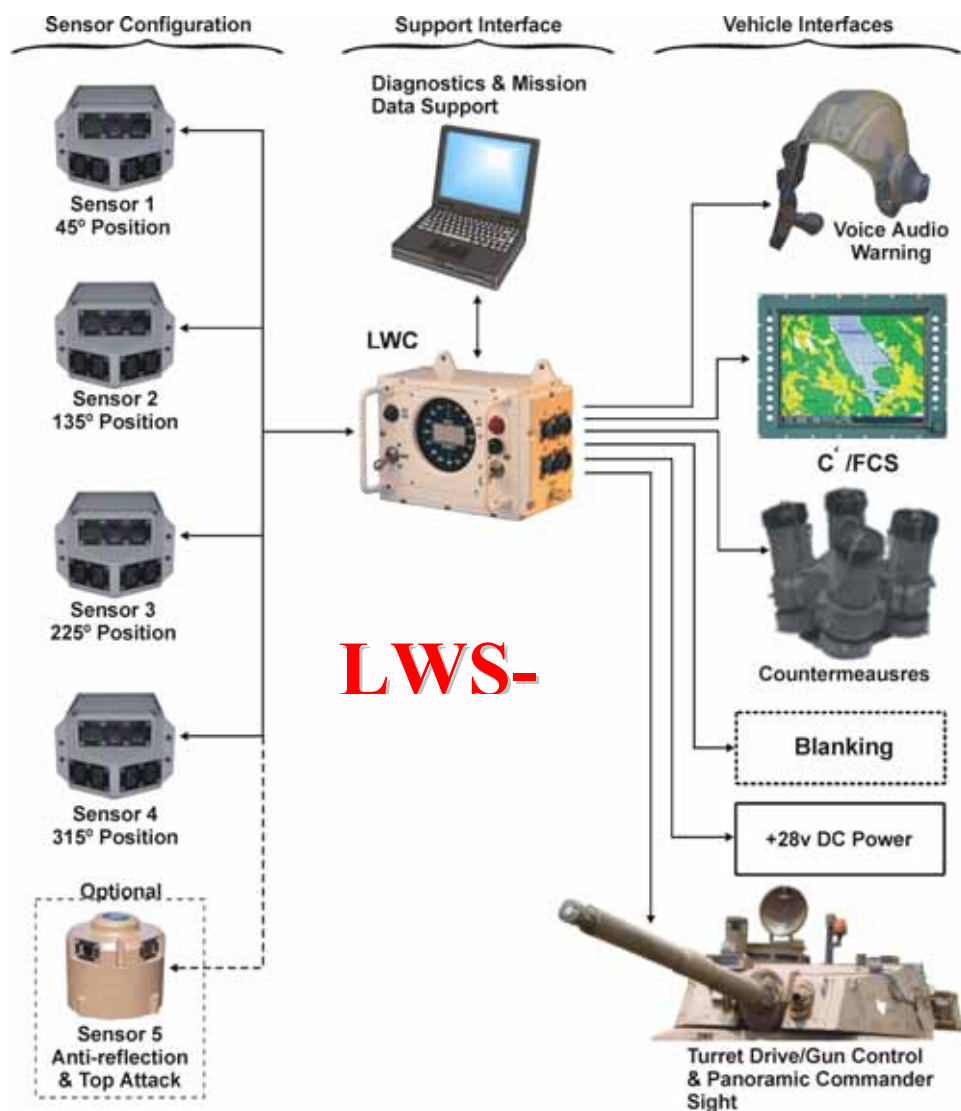
Kuva 318: Omasuojajärjestelmän mahdolliset osat ja niiden keskeiset toiminnalliset parametrit.

Tässä luvussa käsitellään omasuojajärjestelmien toimintaa ja tarkemmin niitä osajärjestelmiä, joihin ei ole jo aiemmissa luvuissa tutustuttu. Sensorijärjestelmät luku sisältää lisätietoja useista tässä luvussa käytetyistä sensori- ja vastatoimenpidejärjestelmistä.

Suojajärjestelmän rakenne riippuu suojattavan kohteen tyypistä ja kriittisyydestä sekä siihen kohdistuvan uhan luonteesta (ennen kaikkea uhan edellyttämä reagointiaika). Näiden tietojen perusteella voidaan rakentaa varoittimista sekä aktiivisista ja passiivisista vastatoimenpide-laitteistoista koostuva kokonaisuus. Tällaisesta esimerkkinä mainittakoon venäläinen SHTORA-1-järjestelmä, joka käsittää neljä laservaroitinta, IP-häirintälähettimen ja maksimis- saan 12 suojakranaattia. Varoittimet kattavat vaakatasossa 360 ja pystysuunnassa -5..+25 as- teen sektorin ja havaitsevat 0,6 – 1,1 µm laserlähetteet. Järjestelmän ohjausyksikkö laukaisee automaattisesti uhkasektorin suuntaan suojakranaatit, jotka kykenevät muodostamaan suojaavan aerosolipilven alle kolmessa sekunnissa.

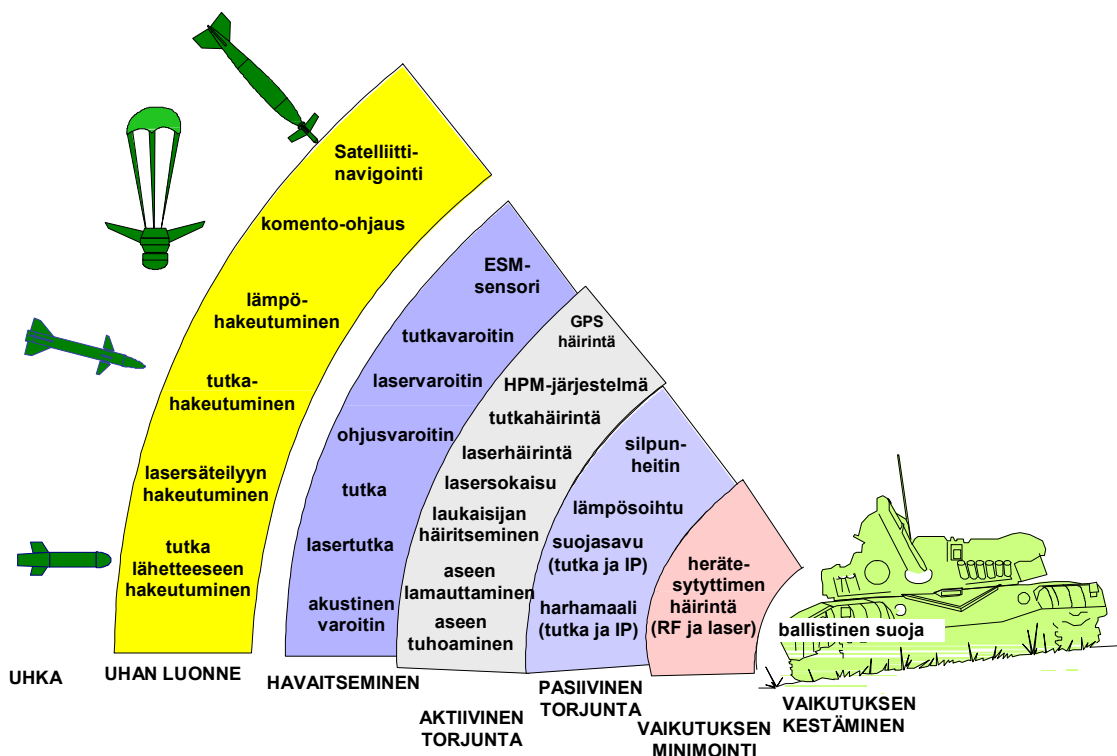
Lavettikohtaisten omasuojajärjestelmien lisäksi voidaan toteuttaa myös laajempia kokonai- suuksia, kuten teollisuusalueita tai taistelevaa yhtymää suojaavia omasuojajärjestelmiä, joiden tarkoituksena on torjua täsmäaseita. Tällaisten järjestelmien ero ilmatorjuntajärjestel- miin on varsin pieni; ilmatorjuntaohjuksellakin kyetään torjumaan risteilyohjuksia. Oma- suojajärjestelmällä tarkoitetaan tässä kirjassa kuitenkin nimenomaisesti taktisen asevaikutuk-

sen torjuntaan tarkoitettuja järjestelmiä. Siten lavettien (lentokoneiden, helikoptereiden ja lennokeiden) torjuntaan tarkoitettuja järjestelmiä käsitellään asejärjestelmien yhteydessä.



Kuva 319: Kuvan omasuojajärjestelmän kokoonpanoon kuuluu laservaroitinyksiköt, ohjaus- ja näyttölaite sekä vaunun sisäpuhelinjärjestelmään liitetty audiovaroitus, johtamisjärjestelmään liitetty visuaalinen uhkan ilmaisu ja omasuojaheiteyksiköt. Omasuojajärjestelmä on lisäksi liitetty tornin ohjausyksikköön ja komentajan tähtäimeen. Tämä mahdollistaa pääaseen automaattisen suuntaamisen ja uhkan osoittamisen suoraan komentajan tai ampujan tähtäimeen. [Avitronics]

Omasuojajärjestelmän on muodostettava integroitu kokonaisuus, jossa uhan arvioimiseen käytetään kaikilta eri varoittimilta saatavaa tietoa. Tällöin vastatoimenpiteet osataan valita, kohdentaa ja ajoittaa oikein. Nykyaikaisen omasuojajärjestelmän on oltava modulaarinen, eli siihen on voitava lisätä ja vaihtaa sensoreita ja vastatoimenpidelaitteistoja *plug-and-play*-periaatteella jopa tehtäväkohtaisesti. Tilannetietoisuudella on todettu olevan hyvin suuri merkitys omasuojajärjestelmän toimivuudelle; toisaalta optimaalinen vastatoimenpide voi riippua esimerkiksi muiden omien lavettien sijainnista ja toisaalta tietty vastatoimenpide voi edellyttää ohjaajalta oikeata väistöliikettä.



Kuva 320: Uhan havaitsemis- ja torjuntakeinot riippuvat uhan luonteesta. Torjunnassa voidaan käyttää aktiivisia ja passiivisia keinoja. Jos ammuksen osumista ei kyetä estämään, voidaan vielä pyrkiä asevaikutuksen minimoimiseen mm. syyttimen häirinnällä sekä ballistisella suojalla. Suurtehomikroaaltopulssia (HPM) voidaan lisäksi käyttää varsinkin isompien kohteiden, kuten laivojen, suojaamiseen.

VAROITTIMET

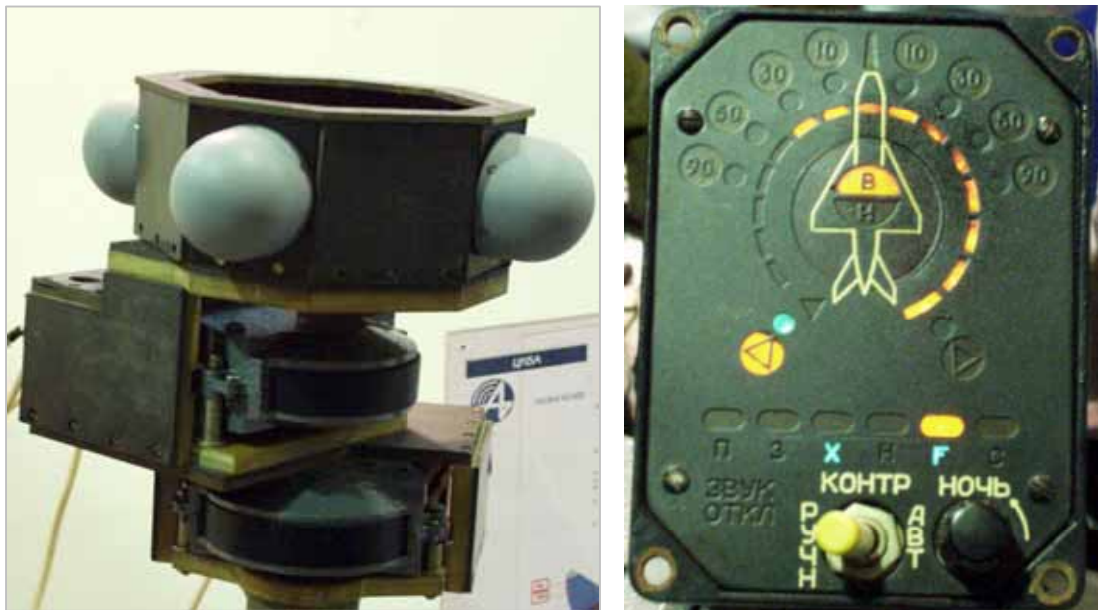
Osa *sensorijärjestelmät*-luvussa esitellyistä sensoreista voidaan käyttää omasuojajärjestelmän varoittimina sellaisenaan. Toisaalta varoittimena toimivalta järjestelmä ei edellytetä niin suurta tarkkuutta kuin tiedustelu-, valvonta- tai maalinosoitussensorilta, minkä vuoksi varoitinkäyttöön voidaan soveltaa yksinkertaisempia, pienempiä ja halvempia sensoreita. Uhan havaitsemiseen käytettävän sensorin soveltuvuus käyttötarkoitukseensa riippuu uhan luonteesta sekä halutusta ennakkovaroitusaikasta. Tarvittava ennakkovaroitusaika puolestaan riippuu suunnitellusta vastatoimenpiteestä.

UHKA	VASTATOIMENPIDEAIKA	VAROITIN
HELIKOPTERI	[Large diagonal line indicating long response time]	AKUSTINEN TUTKAVAROITIN, TUTKA
PANSSARIVAUNU		LASERTUTKA, MILLIMETRI- AALTOTUTKA
LASERETÄISYYSMITTARI		LASERVAROITIN
VALAISULASERI		LASERVAROITIN
PST-OHJUS		AKTIIVINEN

Kuva 321: Vastatoimenpideaika ja käyttöön soveltuva varoitintyyppi riippuvat uhasta. Aktiiviset varoittimet, kuten tutka ja lasertutka, antavat pisimmän varoitusaajan, mutta saattavat paljastaa suojattavan kohteen.

Tutkavaroitin

Tutkavaroittimen (RWR, Radar Warning Receiver) tehtävänä on siepata kohteeseen tuleva tutkasäteily, mitata sen ominaisuudet, luokitella uhka säteilyn ominaisuuksien perusteella ja hälyttää operaattori sekä antaa omasuojajärjestelmälle uhasta vastatoimenpiteiden suunnittelemiseksi ja käynnistämiseksi riittävät tiedot. Tutkavaroittimen taajuusalue on suppeimmillaan tyypillisesti 0,5 - 18 GHz, mutta millimetriaaltotutkajärjestelmien ja -aseiden kehitys on johtanut siihen, että varoitinjärjestelmät kattavat lähes poikkeuksetta 0,5 ja 40 GHz välisen taajuusalueen. Tutkavaroittimen on kyettävä ilmaisemaan hyvin suuria pulssitiheyksiä; lentokoneisiin ja helikoptereihin asennettujen varoitinten pulssitiheys saattaa olla yli miljoona pulssia sekunnissa. Taistelujoneuvoissa pulssitiheys on pienempi, sillä maaston aiheuttama suuri vaimennus estää kaukaa tulevat pulssit.



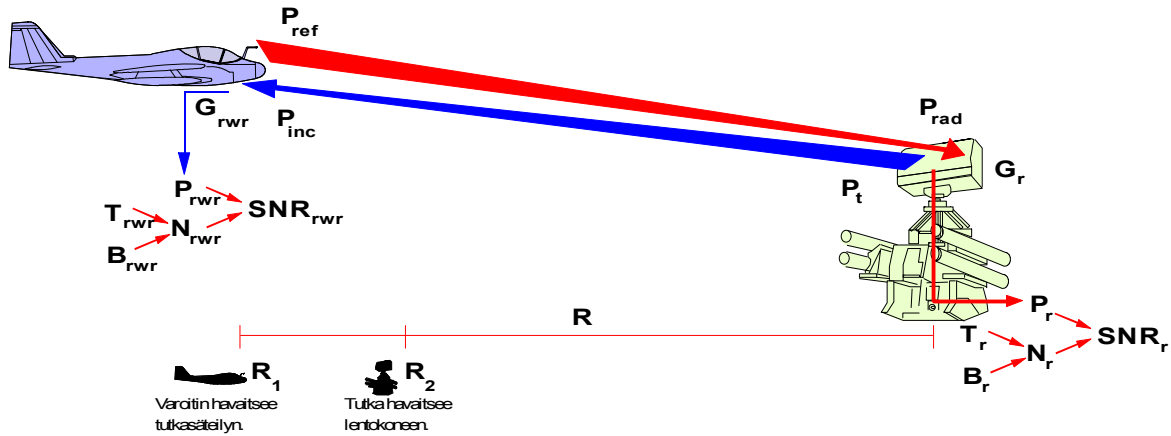
Kuva 322: Vasemmalla venäläinen Sukhoi tutkavaroittimen antenni ja oikealla näyttölaite, joka kertoo uhkan suunnan ja tyypin. [J. Kosola]

Tutkavaroittimen etuna tutkaan verrattuna on etäisyyden neliöön verrannollinen etenemisvaimennus ja haittana suuresta tiedusteltavasta taajuusalueesta johtuva leveä kohinakaista, laajakaistaisten ja pienikokoisten antennien heikko vahvistus sekä se, ettei vastaanotinta voida sovittaa tulevalle pulssille. Tutkan suurimpana haittana on kahteen suuntaan etenevän signaalin etäisyyden neljänneen potenssiin verrannollinen etenemisvaimennus, mutta etuina se, että tutka tietää lähettämänsä signaalin ominaisuudet, kuten taajuuden, kaistanleveyden ja modulaation. Siten tutka kykenee sovittamaan kohinakaistanleveyden vastaanamaan signaalin kaistanleveyttä, optimoimaan ilmaisimensa heijastuneelle pulssille ja integroimaan useita pulsseja signaalikohinasuhteen parantamiseksi. Lisäksi tutkajärjestelmän antennivahvistus voidaan tehdä olennaisesti suuremmaksi kuin varoittimen antennivahvistus.

Jos oletetaan, että tutkan lähetysteho on P_t ja antennivahvistus G_r (suhteena, ei desibeleinä) ja etäisyys mitattavaan kohteeseen on R , saadaan tutkavaroittimen vastaanottamaksi signaalitehoksi:

$$S_{rwr}(R) = 10 \cdot \log \left[P_t \cdot G_r \cdot G_{rwr} \cdot \frac{\lambda^2}{(4\pi)^2 \cdot R^2} \right] \text{ [W]}$$

jossa G_{rwr} on varoittimen antennin vahvistus ja λ säteilyn aallonpituus.



Kuva 323: Varoittimen tavoitteena on havaita tutkasäteily ennen kuin tutka havaitsee maalin.

Vastaavasti tutkan vastaanottama signaaliteho saadaan tutkayhtälöstä:

$$S_r(R) = 10 \cdot \log \left[\frac{P_t \cdot G_r^2 \cdot \sigma \lambda^2 \cdot IF}{(4\pi)^3 \cdot R^4} \right] \text{ [W]}$$

jossa σ on kohteen tutkakoikkipinta-ala ja IF tutkan integrointihyöty, mikäli tutka integroi useampia pulseja. Omasuojajärjestelmässä käytettävän tutkavaroittimen kannalta on tärkeätä, että varoitin kykenee havaitsemaan tutkan ennen kuin tutka kykenee havaitsemaan maalin. Tällöin merkittävintä on varoittimen ja tutkan havaintoetäisyyden suhde, joka saadaan kaavasta:

$$\frac{R_{rwr}}{R_r} = R_r \cdot \sqrt{4\pi \cdot \frac{S_{min,r}}{S_{min,rwr}} \cdot \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{G_{rwr}}{G_r} \cdot \frac{L_{rwr}}{L_r}}$$

- jossa $R_{r,max}$ on tutkan maksimikantama
- $S_{min,r}$ ja $S_{min,rwr}$ ovat tutkan ja varoittimen herkkyudet
- σ on kohteen tutkakoikkipinta-ala
- G_{rwr} ja G_r ovat varoittimen ja tutkan antennivahvistukset
- L_{rwr} ja L_r ovat varoittimen ja tutkan vastaanotinhäviöt

Tutkajärjestelmän suunnittelun tavoitteeksi voidaan antaa tutkan havaitsemisen tekeminen mahdolliseksi ennen kuin tutka kykenee havaitsemaan maalinsa. Tutkavaroittimen suunnittelun tavoitteena puolestaan on taata, että varoitin havaitsee tutkan aina ennen kuin tutka kykenee havaitsemaan maalin. Jos LPI-tutkan rajana pidetään sitä, että $R_r = R_{rwr}$, niin tutkan maksimi havaintoetäisyys voi olla:

$$R_r = \sqrt{\frac{1}{4\pi} \frac{S_{\min.rwr}}{S_{\min.r}} \cdot \sigma \frac{G_r}{G_{rwr}} \cdot \frac{L_r}{L_{rwr}}} \quad [\text{m}]$$

Jos esimerkiksi tutkajärjestelmän herkkyys on 36 dB parempi kuin varoittimen, tutkan antennivahvistus on 30 dB ja varoittimen 0 dB, maalin tutkapoikkipinta-ala on 1 m² eikä häviötä oteta huomioon⁴⁸, saadaan silti hiljaisen tutkan havaintoetäisyydeksi vain 586 metriä. On siis selvää, ettei tutka voi käytännössä havaita maalia ennen kuin maalin tutkavaroitin ilmoittaa tutkasta. Hiljaiset LPI-tutkat, jotka käyttävät hyvin pitkiä pulsseja ja pientä lähetystehoä voivat lisätä hiljaista havaitsemisetaisyyttään jonkin verran, mutta on kuitenkin selvää, että pitkän kantaman tutka ei voi olla LPI-tyyppinen.



Kuva 324: Esimerkki erikoisjoukkojen käyttöön tarkoitetusta kannettavasta tutkavaroittimesta, jonka avulla kyetään suojaumaan maastonvalvontatutkalta. [J. Kosola]

Tärkeimmät varoittimen uhasta antamat parametrit ovat signaalin keskitaajuus ja mahdollinen taajuushypintä, pulssien tulosuunta sekä pulssintoistotaajuus ja sen vaihtelu. Signaalin tulosuunta mitataan interferometrimenetelmällä tai monopulssitekniikalla. Interferometritekniikalla päästään parhaimmillaan 0,1 – 0,5 asteen suuntimistarkkuuteen. Kuten interferometrisuuntimoiden yhteydessä *sensorijärjestelmät*-luvussa todettiin, suuntimistarkkuus riippuu säteilyn tulosuunnasta ja signaalikohinasuhteesta. Käytännössä suuntimistarkkuus on alustasta ja tilanteesta riippuen 1-10 asteen luokkaa.

Tutkavaroitin luokittelee vastaanotetun tutkasignaalin muun muassa sen keskitaajuuden, pulssintoistotaajuuden lähetystaajuuden muuttumisen ja tulosuunnan mukaan vertaamalla lähetettä varoittimen signaalikirjastossa oleviin tietoihin eri järjestelmistä. Mikäli lähetetyyppeä ei löydy signaalikirjastosta, varoitin pyrkii luokittelemaan lähetteen yleisiin luokkiin⁴⁹ ja tallentaa signaalin myöhempää analysointia ja signaalikirjastojen päivittämistä varten. Modernit tutkat käyttävät taajuushypytystä ja pulssiväliharitusta sekä pieniä signaalitasoja. Nämä vaikeuttavat tutkavaroittimen toimintaa aiheuttaen useita varoituksia samasta maalista tilanteissa, joissa varoitin luokittelee eritaajuiset ja eri PRF-lähteet eri uhkajärjestelmiksi.

⁴⁸ Tutkavaroittimissa käytetään yleensä laajakaistaisia spiraaliantenneja, joiden vahvistus vaihtelee välillä 0 – 3 dBi. Varoittimen on katettava koko uhkakaista, tai useampien rinnakkaisten varoitinten tapauksessa vain osa siitä. Tutka puolestaan voi käyttää huomattavasti kapeampaa kaistaa, joka on yleensä pulssin pituuden käänteisluvun luokkaa.

⁴⁹ Tutkajärjestelmän taajuusalueen perusteella voidaan päätellä, onko kyseessä kauko- tai keskivalvontatutka, seurantatutka, hävittäjäutka yms. Pulssintoistotaajuus ja sen vaihtelu kertoo tutkan suurimman havaintoetaisyyden ja dopplerresoluution ja antaa viitteitä siitä, minkä tyyppiseen käyttöön se on tarkoitettu. Tutkaparametrien analysointia on selvitetty laajemmin *sensorijärjestelmät* -luvussa.



Kuva 325: Esimerkki venäläisestä ilmatorjuntapanssarivaunun tutkavaroitinjärjestelmästä. [J. Kosola]

Laservaroitin

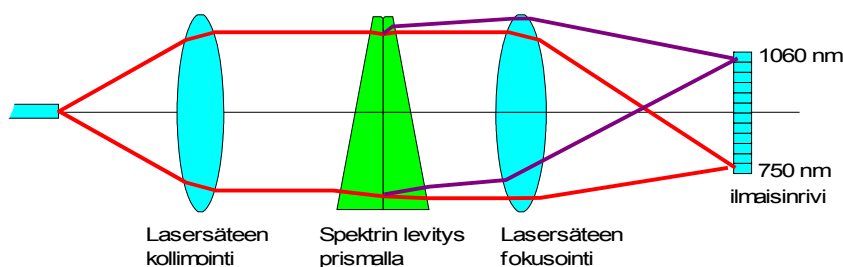
Laservaroitin (LWR, Laser Warning Receiver) on järjestelmä, joka ilmaisee laseretäisyysmittarista, laservalaisujärjestelmästä, lasersäteenseurantaohjuksen laserkujasta tai lasertutkasta tulevan lasersäteilyn tulosuunnan, aallonpituuden ja pulssintoistotaajuuden. Tulosuunnan perusteella tiedetään uhkasuunta sekä voidaan päätellä, onko kyseessä maasta vai ilmasta tuleva uhka. Tulosuunta voidaan selvittää karkeasti käyttämällä useita vastaanotinprismoja tai tarkasti – noin asteen tarkkuudella – interferometrisellä ilmaisimella. Jälkimmäiset kykenevät ilmaisemaan tulosuunnan lisäksi säteilyn aallonpituuden.

Pulssintoistotaajuus kertoo varoittimelle, onko kyseessä etäisyysmittari, jotka lähettävät yksittäisiä tai harvoin toistuvia pulsseja, vai maalinvalaisu tai lasertutka, jotka voi tunnistaa useista perättäisistä pulsseista. Säteilylähteen tyypin ja säteilyn tulosuunnan perusteella voidaan tehdä päätös vastatoimenpiteistä.

Laservaroittimen on kyettävä ilmaisemaan lasersäteilyä hyvin laajalla aallonpituusalueella; periaatteessa kaukoinfrapuna-alueelta näkyvän valon alueelle, teoriassa jopa ultraviolettialueelle saakka. Vaikka nykyaikaisten laserlähetinten aallonpituutta voidaan muuttaa, suuri osa taistelukentällä käytettävistä lasereista toimii verraten kapealla aallonpituusalueella. Varoitinjärjestelmän aallonpituusalue voi olla 0,4 – 12 μm luokkaa, mihin päästään käyttämällä useita (esimerkiksi kolmea) eri aallonpituusalueille tarkoitettua varoitinta. Pienin havaittavan pulssin pituus on vain noin kymmenen nanosekuntia. Laservaroittimen herkkyys, eli tehotiheys, jolla varoitin kykenee ilmaisemaan uhan, on nykyisin alle 1 mW/cm^2 . Varoittimet kykenevät ilmaisemaan säteilyn tulosuunnan muutaman asteen ja aallonpituuden muutaman kymmenen nanometrin tarkkuudella. Esimerkiksi Racalin Saviour-järjestelmässä käytetään kahdeksaa horisontaalista (45° erottelutarkkuus) ja yhtä ylöspäin suunnattua prismaa. Järjestelmä ilmaisee pulssintoistotaajuuden perusteella, onko kyseessä laseretäisyysmittari vai maalinvalaisulaser.

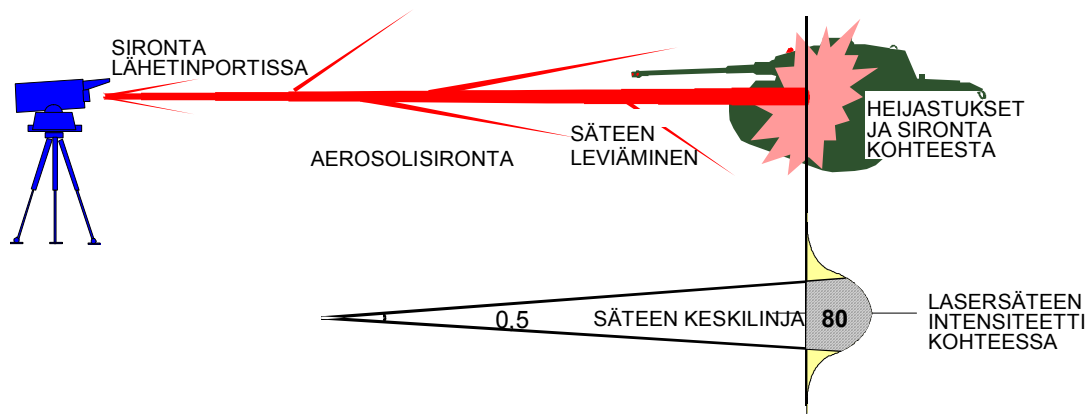
Mahdollisia vääriä hälytyksiä voivat aiheuttaa muun muassa laukausten suuliekit, räjähdykset, tulipalot, suora ja heijastunut auringon valo ja salamointi. Nämä ovat kuitenkin epäkoherentteja säteilylähteitä, joten ne ovat erotettavissa lasersäteilystä, mikäli varoitin kykenee erottelemaan koherentin säteilyn epäkoherentista. Lisäksi vääriä hälytyksiä voivat aiheuttaa

heijastukset muista laserilla valaistavista kohteista ja lasersäteilyn sironta maastosta ja muista maaleista.



Kuva 326: Lasersäteily voidaan erottaa epäkoherentista valosta hajottamalla tuleva säde prisman avulla spektrikomponentteihin; monokromaattisessa lasersäteilyssä on vain yhtä aallonpituutta, minkä vuoksi lasersäde muodostaa ilmaisimatriisille selvästi havaittavan interferenssikuvion, jonka maksimien sijainnista voidaan päätellä laservalon aallonpituus. Tällaisesta ilmaisimesta käytetään myös nimitystä spektrografia ilmaisun.

Lasersäteen luonnollinen divergenssi (leviämiskulma) on 0,5 milliradiaanin luokkaa, joten 5 km etäisyydellä säde on periaatteessa vain 2,5 metrin läpimittainen. Osa tulevasta säteestä siroaa jo lähettimellä ja osa ilman aerosoleista. Lähettimeltä siroava komponentti on merkittävin säteen ulkopuolinen lähde pitkillä aallonpituuksilla (esim. 10,6 μm CO₂-laserissa) ja aerosolisirota lyhyillä aallonpituuksilla (kuten 1,064 μm Nd:YAG-laserissa). Lisäksi osa maaliin osuneesta säteilystä heijastuu ja päättyy lopulta varoittimeen. Heijastumien hyväksikäyttö on kuitenkin epäluotettavaa, koska ne saattavat sekoittaa tulosuunnan oikean ilmaisun.



Kuva 327: Noin 80 % lasersäteilystä voidaan olettaa olevan 0,5 mrad säteen sisällä. Osa säteilystä siroaa jo laserlähettimellä ja osa siroaa ilman aerosoleista. Lisäksi säteilyä siroaa ja heijastuu valaistusta kohteesta. Laservaroittimen on oltava riittävän herkkä, jotta se kykenee ilmaisemaan myös varsinaisen säteen ulkopuolelta tulevan säteilyn.

Laservaroittimessa tarvittava signaalikohinasuhde riippuu varoitimelta haluttavasta ilmaistodennäköisyydestä P_d ja siedettävästä väriin hälytysten todennäköisyydestä P_{fa} . Mikäli laserlähde lähettää useita pulsseja, se voidaan havaita helpommin kuin yksittäisiä pulsseja lähettävät laitteet, sillä varoitin kykenee integroimaan osan kohinasta ja kasvattamaan vastaanotettua signaalikohinasuhdetta.



Kuva 328: Kaksi esimerkkiä laservaroittimen sensoriyksiköstä. Vasemmanpuoleinen laite perustuu konseptiin, jossa suojattavaan kohteeseen sijoitetaan useita halpoja detektoreita, ja oikeanpuoleinen ratkaisuun, jossa muutamalla suorituskykyisemmällä vastaanottimella kyetään kattamaan koko suojattava kohde. Kummallakin konseptilla on omat hyvät ja huonot puolensa – optimaalinen ratkaisu riippuu aina tilanteesta. [J. Kosola]

Laservaroittimen dynaamisen alueen on oltava hyvin laaja, 60 dB luokkaa. Varoittimeen voi tulla suuritehoista säteilyä suoraan laseretäisyysmittarilta tai valaisujärjestelmältä, mutta toisaalta järjestelmän on kyettävä havaitsemaan myös erittäin pienitehoista sironnutta lasersäteilyä.

Passiivinen ohjusvaroitin

Passiivisia ohjusvaroittimia (MAW, Missile Approach Warner) käytetään pääsääntöisesti kuljetus- ja rynnäkkökoneiden sekä helikoptereiden suojaamiseen, mutta ne ovat yleistymässä muissakin laveteissa. Passiivinen ohjusvaroitin perustuu ohjuksen kuumen rakettimoottorin säteilemän infrapuna- tai ultraviolettisäteilyn ilmaisuun. Ohjuksesta saatava signaali riippuu palokaasujen lämpötilasta ja koostumuksesta. Rakettimoottorin lähettämä säteily on maksimissaan 3 - 5 μm ikkunassa ja suihkumoottorin 8 - 14 μm ikkunassa. Palamisreaktiossa muodostuvan hiilidioksidin spektriviivat ovat 1,96 - 15 μm alueella (huippu 4,3 μm kohdalla) ja veden spektriviivat 0,96 - 6,3 μm . Tällainen signaali saadaan luonnollisesti vain ohjuksen lyhyen kiihdytysvaiheen aikana. Kun rakettimoottori on polttanut loppuun polttoaineensa, siitä lähtevä lämpösäteily ja palokaasujen määrä on lähes olematon. Mikäli ohjus käyttää jotakin muuta työntövoimanlähdettä kuin rakettimoottoria, esimerkiksi patopainemoottoria (ramjet), heräte saattaa olla infrapuna-alueella liian pieni passiiviselle varoittimelle.

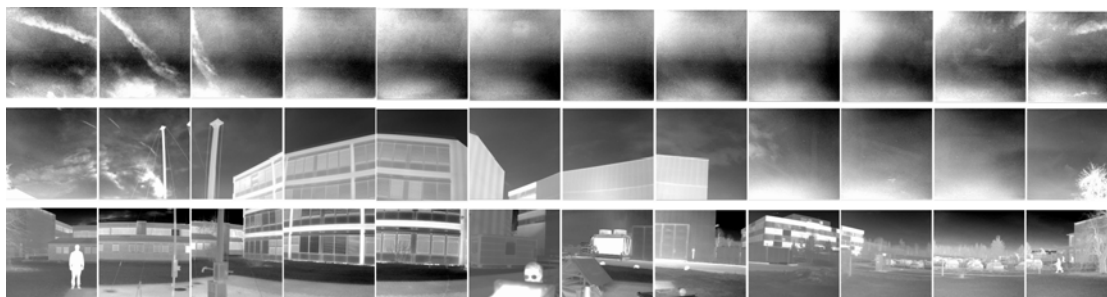
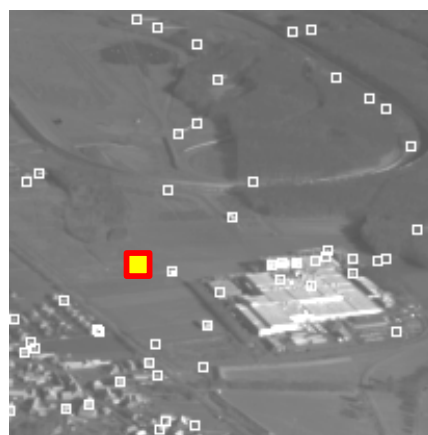
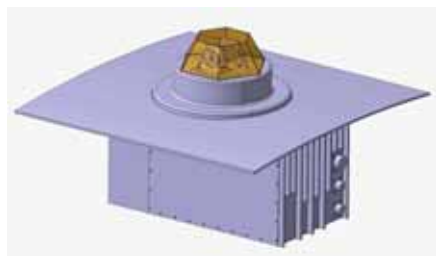
Ohjusjärjestelmä	kiihdytys- vaihe	matka- moottori	palamis- matka	kantama	maksimi- nopeus
SA-7 (IR)	2,2 s	6,1 s	3,5 km	4 km	1,5 Mach
SA-13 (IR)		4,5 s	3 km	10 km	2,4 Mach
SA-16 (IR)	bv	8 s	3,5 km	5 km	1,7 Mach

Taulukko 25: Esimerkkejä IR-ohjusten ominaisuuksista.

Infrapuna-alueella ohjuksen signaali on muutamia kilowatteja steradiaania kohti. Infrapuna-alueella ilmakehän läpäisy on hyvä; 80 – 90 %. Suuren säteilytehon ja hyvän ilmakehän

läpäisyn vuoksi passiiviset ohjusvaroittimet perustuvat yleensä ohjuksen moottorin kuumien palokaasujen ilmaisuun. Ohjuksen moottorista saatava signaali riippuu ohjuksen kulmasta varoittimeen nähden; kun ohjus tulee suoraan kohti, sen runko peittää peräosassa olevan moottorin ainakin osittain. Moottorin ja palokaasujen lisäksi voidaan pyrkiä havaitsemaan myös ilmakehän kitkan kuumentama ohjuksen kärkiosa. Tästä saatava signaali riippuu ohjuksen nopeudesta sekä kärkiosan muodosta ja materiaalin ominaislämpökapasiteetista. Nykyaikaisissa ohjusjärjestelmissä ohjuksen kärkikartion lämpenemistä vähennetään käyttämällä haihtuvia pinnoitteita. Haihtumisprosessi sitoo lämpöä ja kompensoi siten ilmakehän kitkan aiheuttaman lämmön nousun, jolloin ohjuksen kärki on taustansa lämpöinen.

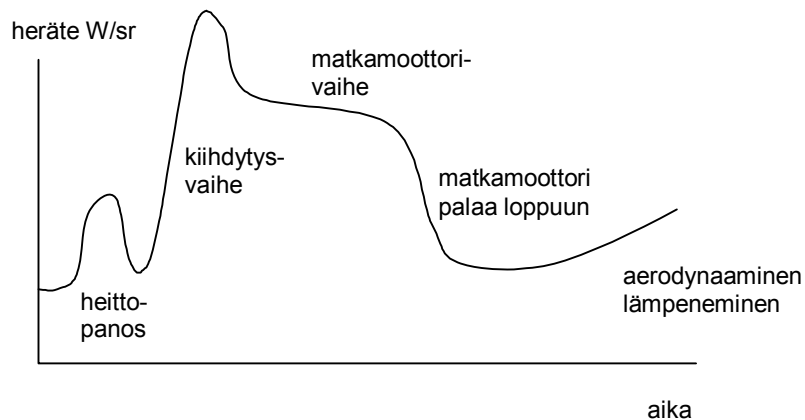
Infrapuna-alueen suurimpana ongelmana on se, että auringon heijastuksista johtuvien värienvärienvärien ilmaisuuden määrä on suuri. Tätä ongelmaa ei ole UV-alueella. Ultravioletialueella ohjuksesta saadaan huomattavasti pienempi signaali kuin IP-alueella; tyypillisesti alle 1 W/sterad.



Kuva 329: Saksalainen PIMAWS (Passive Infrared Missile Approach Warning System) perustuu 256x256 -elementtiseen CMT-ilmaisimatriisiin, joka pyyhkäisee sähkömekaanisesti 360 x +/- 105 asteen sektorin. Järjestelmän pyyhkäisytaajuus on 11 Hz, jolla se muodostaa kuvaa valvomastaan alueesta (alla). Järjestelmän sensori (yllä) vasemmalla kykenee valmistajan mukaan havaitsemaan ohjuksen kiihdytysvaiheessa yli 25 km ja loppulähestymisvaiheessa yli 6 km etäisyydeltä. Värienvärien ilmaisuuden hylkäys perustuu siihen, että maastosta tulevien ilmaisuuden liikerata on erilainen kuin hyökkäävän ohjuksen (yllä oikealla). [BGT]

Passiivisen UV-varoitimen ongelmana on lisäksi se, että UV-alueella ilmakehän läpäisy on vain noin 60 %, joten ohjuksesta saadaan varoitus vasta kun se on varsin lähellä. UV-alueen käyttö ohjusvaroittimissa perustuu siihen, että 230 – 280 nm aallonpituuksilla ei ole lainkaan auringosta johtuvia heijastuksia. Tämä johtuu siitä, että ilmakehän ylimmät osat absorboivat tällä aallonpituudella kaiken auringosta tulevan säteilyn. Toisaalta ilmakehän alaosissa absorptio näillä aallonpituuksilla on pienehkö. Ultravioletialue on optimaalinen lyhyen

kantaman ohjusvaroittimen kannalta. Sen käyttö edellyttää kuitenkin ohjuksen säteilevän riittävän suurella teholla, mikä käytännössä rajaa varoituksen ohjuksen kiihdytysvaiheeseen. Ohjuksen laukaisutapahtuma voidaan käytännössä havaita muutaman kilometrin etäisyydeltä. Infrapuna-alueella voidaan saavuttaa pidempiä havaintoetäisyyksiä, mutta väärin hälytysten määrä on huomattavasti suurempi kuin UV:lla. Vääriä hälytyksiä UV-alueella voivat auringon heijastusten lisäksi aiheuttaa lämpösoihdut sekä läheltä lentävät jälkipoltinta käyttävät lentokoneet. Väärin hälytysten vähentämiseksi uusimmissa varoittimissa käytetään kuvaavia sensoreita, jotka kykenevät tunnistamaan säteilylähteen sen kuvan ja liikeradan perusteella. Lisäksi voidaan käyttää kahdella eri aallonpituusalueella toimivia infrapunasensoreita, jotka kykenevät erottamaan kuumen auringon heijastukset todellisista uhista. UV-varoittimelta saatava kulmatarkkuus on tällä hetkellä (2003) käytännössä +/- 2-3 astetta.



Kuva 330: Esimerkki heittopanosella ja matkamootorilla varustetun ohjuksen herätteestä ajan funktiona.

Elektro-optisten ja infrapunakomponenttien halventuessa tultaneen – ainakin lentokoneissa ja helikoptereissa – siirtymään konformisten⁵⁰ ilmaisimatriisien käyttöön. Tällaisilla järjestelmillä voidaan toteuttaa 360 asteen sektorin kattava näkökenttä sensorin aallonpituusalueella. Sen päätarkoituksena on toteuttaa virtuaalinen kypäränäyttöön integroitu näkökyky operaattoreille, mutta sitä voidaan käyttää myös automaattisena ohjusvaroittimena. Tällöin omasuojatietokone seuraa lämpöjälkien muotoa ja liikerataa sekä tekee niiden perusteella uhka-arvion, käynnistää automaattisesti vastatoimenpiteet ja ehdottaa ohjaajalle optimaalisen väistöliikkeen.

Akustinen varoitin

Akustinen varoitin reagoi ohjuksen tai ammuksen lähtölaukaukseen. Äänen suhteellisen hitaan etenemisnopeuden vuoksi järjestelmän mahdollistama ennakkovaroitusaika on pienempi kuin sähkömagneettisilla sensoreilla. Lisäksi kohteen edellytetään lentävän alle äänen nopeuden.

⁵⁰ Konformisella tarkoitetaan runkoon tms. rakenteeseen integroitua laitetta tai laitteen osaa: esimerkiksi konforminen antenni on osa rungon rakennetta, konforminen piirilevy on osa laitteen koteloa, johon komponentit kiinnitetään suoraan jne. Esimerkiksi F-22 on suunniteltu siten, että eri puolille koneen runkoon on sijoitettu apertuureja, joihin voidaan sijoittaa radio-, tutka- tai ESM-antenneja tai elektro-optisia sensoreita.

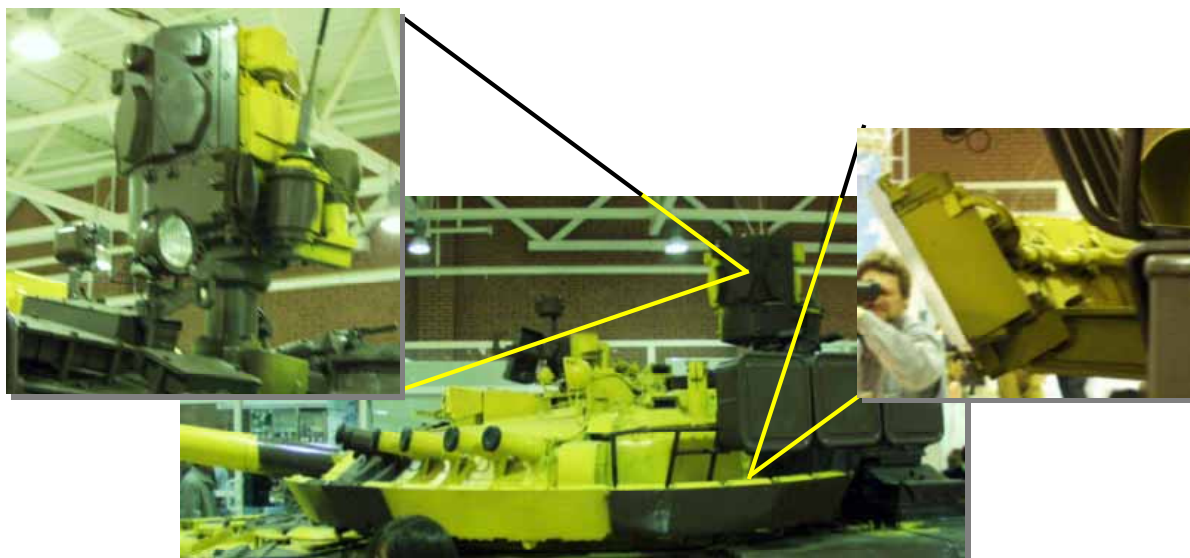
Aktiivinen lasertutka

Passiivisen ohjusvaroittimen ongelmana on se, ettei siltä saada etäisyystietoa ja kiihdytysvaiheen jälkeen ohjuksesta saatava signaali on pieni. Tällaisia ongelmia ei ole laserilla, jonka hyvä suunta- ja etäisyystarkkuus mahdollistaa uhkasuunnan ja vastantoimenpiteiden kannalta optimaalisen hetken tarkan määrittämisen. Aktiivisen lasertutkan perusongelma on sama kuin kaikkien aktiivisten sensoreiden; aktiivinen säteily paljastaa suojattavan kohteen. Tätä haittaa voidaan vähentää käyttämällä omasuojalaseritutkaa

Uhan luonteen tarkempaan määrittämiseen sen jälkeen kun ennakkovaroitus on saatu joltakin passiiviselta järjestelmältä. Toinen vaihtoehto on hyödyntää ilmakehän vaimennuspiikkejä. Mikäli lasertutka toimii voimakkaasti vaimentuvalla aallonpituudella, se voidaan suunnitella sellaiseksi, ettei sitä voida tiedustella.

Millimetriaaltotutka

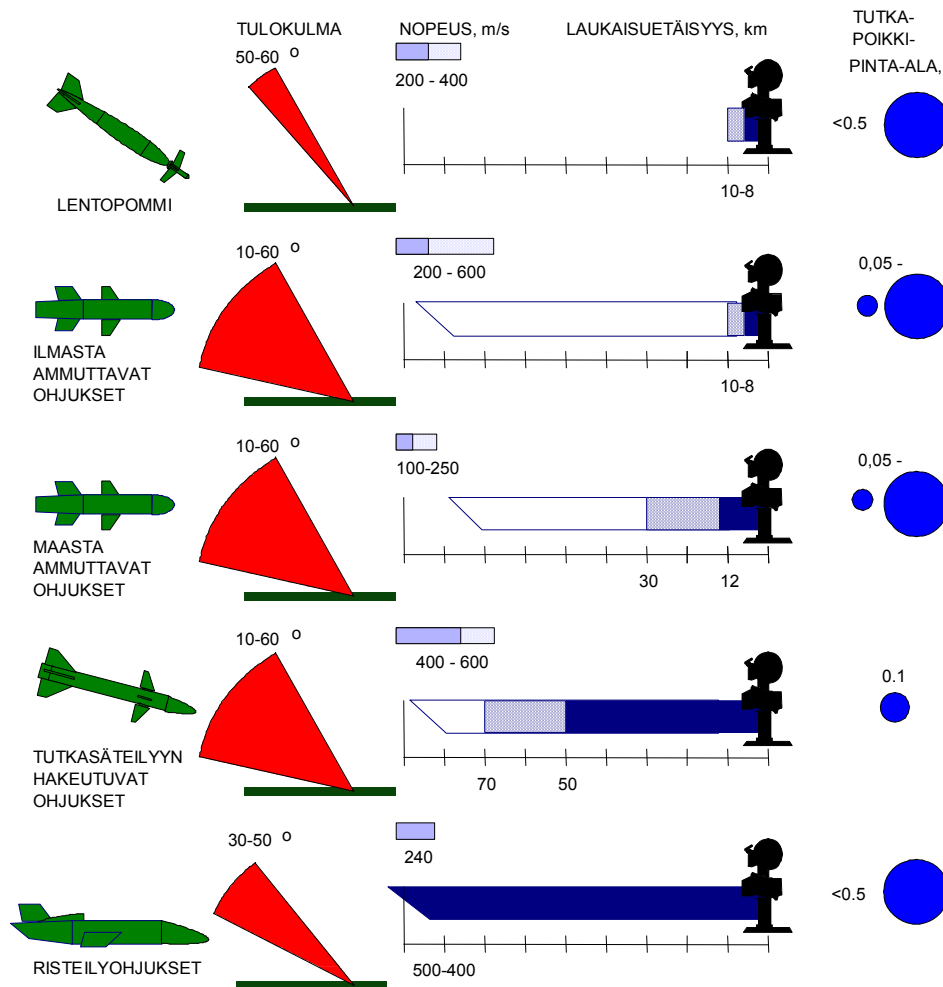
Millimetriaaltoja voidaan käyttää varoittimessa, koska niiden lyhyen aallonpituuden antama suuntatarkkuus on riittävä useimpiin sovelluksiin. Käytettäessä jotakin ilmakehän vaimennuspiikkiä vastaavaa taajuutta, kuten hapen 60 GHz resonanssitaajuus, tutkasignaali etenee vain lyhyen matkaa. Tällöin järjestelmä ei paljastu kaukaa tarkasteltaessa. Uhan luonteen (esimerkiksi tulokulma 0 – 60 astetta, nopeus jopa 600 m/s, ase lentää matalalla peitteisessä maastossa) vuoksi tutkajärjestelmää voi olla erittäin hankala toteuttaa muuten kuin elektronisesti keilaavalla vaiheohjatulla antennilla.



Kuva 331: Venäläinen Arena-omasuojajärjestelmä. Vasemmanpuoleisessa pikku-kuvassa oleva tutka havaitsee ohjuksen n. 50 m ja lukittuu siihen 8-10 m etäisyydellä. Järjestelmä laukaisee oikeanpuoleisessa kuvassa olevan räjähdepanoksen tornia kiertävästä suoja-panoskehästä ohjuksen ollessa 1,5-4 metrin etäisyydellä. [J. Kosola]

AKTIIVISET VASTATOIMENPITEET

Aktiivisilla vastatoimenpiteillä tarkoitetaan aseiden tai sitä ohjaavan aselavetin häirintää aseiden osumisen estämiseksi (soft kill) tai aseiden tuhoamista ennen niiden iskeytymistä maaliinsa (hard kill). Näiden välimuodoksi voidaan lukea sytyttimen häirintä, jolla pyritään asevaikutuksen minimoimiseen, muttei vältetä aseiden osumista. Kuvassa 199 on esitetty erilaisten aseiden tyypillisiä tulokulmia ja nopeuksia loppulähestymisvaiheessa sekä aseille tyypillisiä kantamien ja tutkapaikkipinta-aloja.



Kuva 332: Erilaisten aseiden tyypillisiä hyökkäyskulmia, lentonopeuksia ja laukaisuetäisyyksiä sekä tutkapaikkipinta-aloja. Viimeksi mainittu tarkoittaa tyypillistä tutkapaikkipinta-alaa etusektorista tarkasteltuna.

Tutkahäirintä

Tutkahäirintä voidaan kohdistaa aktiivisen tai puoliaktiivisen ammuksen vastaanottimeen tai komento-ohjatun järjestelmän aselavetin maalinseurantatutkaan. Tutkahäirinnän periaatteita on käsitelty *sensorijärjestelmät* -luvussa. Omasuojalaitteistoissa tutkahäirinnän ongelmana on se, että nykyaikaiset ohjukset kykenevät tarvittaessa hakeutumaan häirintäsignaalin lähteeseen, mikäli sensorin normaali mittaustoiminta estyy. Tämän vuoksi lentokoneissa käytetään

vedettäviä harhamaaleja, joihin häirintälähetin on sijoitettu, ja johon ohjus *home on jamming*-tilassa hakeutuu. Maajärjestelmissä tämä on luonnollisesti olennaisesti hankalampaa.

Infrapunahäirintä

Infrapunahäirintäjärjestelmä (IRCM, Infra-red Counter Measures) pyrkii joko harhauttamaan sensorin maalin sijainnin suhteen tai tukkimaan sensorin etupään niin, ettei maalista saada signaalia. Pyyhkäisevien sensoreiden häirintä voidaan toteuttaa moduloimalla infrapunälähdettä sopivan taajuisella ohjaussignaalilla, jolloin sensori laskee maalin paikan väärin. Tuijottaviin sensoreihin moduloitu lähete ei tehoa, vaan on turvaututtava maalin signaalin peittämiseen. Myös yksinkertaisten SACLOS-ohjattujen PST-ohjusten häirintä infrapunälähtetimestä on mahdollista, jos tähtäimen ohjaustietokone saadaan uskomaan häirintälähetintä ohjuksen lähettimiksi. Tällöin se ohjaa ohjuksen sivuun tähtäysviivasta ja ohjus poistuu lopulta kokonaan tähtäimen näkökentästä. Tämän estämiseksi nykyaikaisissa ohjuksissa käytetään koodattua pulssilähetettä ja tähtäin reagoi vain oikealla koodilla vastaanottamaansa läheteeseen. Alun perin lentokoneisiin kehitettyjä laserhäirintäjärjestelmiä ollaan kehittämässä myös maa-ajoneuvoihin soveltuviksi⁵¹.



Kuva 333: Venäläisen Shtora -järjestelmän infrapunahäirintälähetin.

Jotta infrapunahäirintä olisi tehokasta, häirintäsignaalin avulla on kyettävä pienentämään sensorin maalista saamaa signaalikohinasuhdetta. Jos sekä maalin heräte että häirintäsignaali ovat voimakkaita, voidaan kohina jättää huomioimatta, jolloin kaavat yksinkertaistuvat. Hyöty-häirintäsignaalisuhte (SJR, Signal-to-Jamming Ratio) sensorilla saadaan kaavasta:

$$SJR = \frac{\Delta E_t}{E_l} \cdot OAR(\phi)$$

jossa $\langle E_t \rangle$ on maalin ja taustan välinen säteilyvoimakkuuskontrasti, E_l laserin säteilyvoimakkuus ja $OAR(\phi)$ on sensorin optisen akselin sivusta tulevan säteilyn vaimennus akselin suunnassa tulevaan säteilyyn verrattuna (Off-Axis Rejection Ratio). Vastaavasti maalin ja omasuojalaserin säteilyvoimakkuus hakupään kohdalla saadaan kaavoista:

$$\Delta E_t = \frac{\Delta I_t \cdot t_a(\lambda_t, R) \cdot t_o(\lambda_t)}{R^2} \quad E_l = \frac{P_l \cdot t_a(\lambda_l, R) \cdot t_o(\lambda_l)}{\Omega_l \cdot R^2}$$

⁵¹ Christopher Foss: *Future Combat Systems need hiig-tech protection*, JDW 12.3.2003: 16.

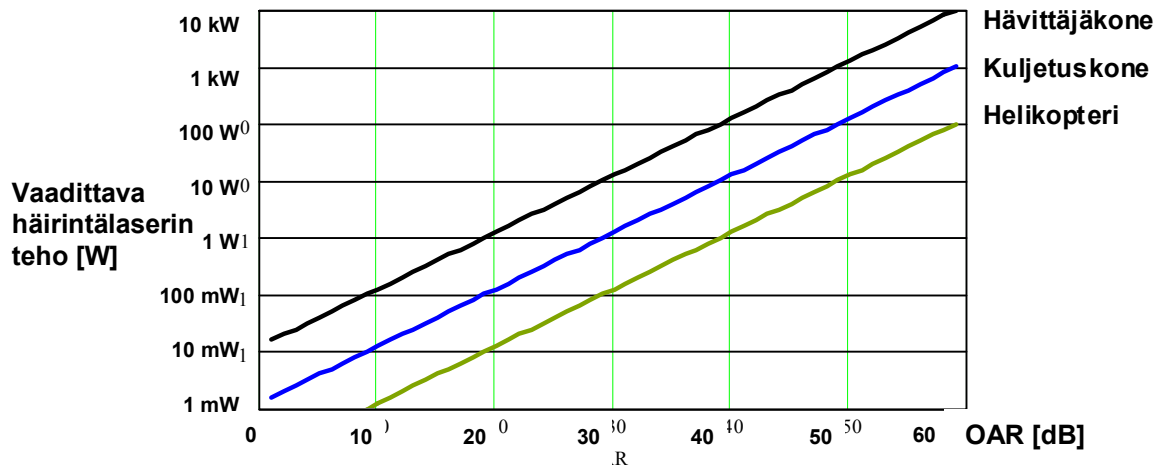
jossa $\langle I_t \rangle$ on maalin ja sen taustan säteilyvoimakkuuden välinen kontrasti maalin kohdalla, $t_a(\lambda_t, R)$ ilmakehän läpäisy sensorin toiminta-aallonpituudella ja maalin etäisyydellä, $t_o(\lambda_t)$ sensorin optiikan läpäisy ja R etäisyys maaliin. Vastaavasti P_l on laserin teho, $t_l(\lambda_l, R)$ ilmakehän läpäisy laserin toiminta-aallonpituudella ja -täisyydellä, $t_o(\lambda_l)$ sensorin optiikan läpäisy laserin aallonpituudella ja Ω_l laserin säteen aukeamiskulma steradiaaneina. Optimitilanteessa laser toimii samalla aallonpituudella kuin sensorikin, jolloin omasuojajärjestelmässä em. yhtälöt supistuvat muotoon:

$$SJR = \frac{\Delta I_t}{P_l} \cdot \Omega_l \cdot OAR(\phi)$$

Koska sekä sensorin havaitsema heräte, että omasuojalaserin lähete kulkevat matkan maalista sensorille vain yhteen suuntaan, supistuu etäisyys pois. Tilanne on siis toisenlainen kuin tutkan omasuojahäirinnässä, jossa tutkasäde kulkee matkan kahteen suuntaan. Omasuojajärjestelmän kannalta keskeinen kysymys on, mikä laserteho vaaditaan ohjuksen hakupään häiritsemiseksi. Tämä saadaan kaavasta:

$$P_{l.req} = \frac{\Delta I_t}{SJR_{min}} \cdot \Omega_l \cdot OAR(\phi)$$

Jos esimerkiksi ajatellaan vaadittavaksi SJR:si -7 dB (häirintälähteen teho ilmaisimella on viisinkertainen maalin herätteeseen nähden), ja häirintälähtetimen keilan divergenssiksi 0,5 mrad, saadaan kuvan 200 mukainen kuvaaja. Kuvasta havaitaan, että jos häirintälähtetin kykenee toimimaan sensorin näkökentässä, jo muutaman milliwatin teho riittää harhauttamaan ohjuksen.



Kuva 334: Häirintälaserilta vaadittu teho OAR:n funktiona, kun SJR on -7 dB ja säteen divergenssi 0,5 mrad.

Häirintälähtettimenä käytetään Xenon-lamppuja tai infrapunalaseria. Laserlähetin mahdollistaa häirintäsignaalin suuntaamisen kapeassa keilassa (säteen divergenssi on 1 mrad luokkaa) kohti maalia. Tällaisista häirintäjärjestelmistä käytetään lyhennettä DIRCM (Directed IR CounterMeasures) Pienikokoisilla laserjärjestelmillä tällä hetkellä (2001) saavutettavissa oleva tehotaso on luokkaa 100 W/sr ja suurikokoisilla alle 1000 W/sr. Tällaisen suuri-

kokoisen häirintäjärjestelmän paino on noin 50 kg ja tehontarve 1,5 kW luokkaa, joten aivan pieneen lavettiin tehokkaita laserhäirintäjärjestelmiä ei vielä lähitulevaisuudessa voida asentaa. Infrapunahäirinnän etuina on sen laajakaistaisuus ja energian leviäminen laajaan avaruuskulmaan. Ensin mainitun ominaisuuden vuoksi kohdejärjestelmän toiminta-aallonpituutta ei ole välttämätöntä tuntea tarkasti ja jälkimmäisen ominaisuuden vuoksi häirit্তävää sensoria ei tarvitse seurata kovin suurella tarkkuudella. Toisaalta nämä samat ominaisuudet ovat myös lamppuihin perustuvan infrapunahäirinnän heikkouksia ja vastaavasti laserhäirinnän vahvuuksia: lasersäteen kapea keila pitää energian pienellä alueella, joten säteen intensiteetti ja siten myös vaikutus kohteessa on suurempi. Lisäksi kaikki laserin energia on yhdellä aallonpituudella, ja jos tämä vastaa sensorin aallonpituutta, kaikki lähetetty energia vaikuttaa kohteeseen.



Kuva 335: Vasemmalla isokokoiisiin lavetteihin, kuten kuljetuskoneisiin ja oikealla pienempiin lavetteihin, kuten helikoptereihin asennettavissa oleva laserinfrapunahäirintäjärjestelmä. [Northrop Grumman]

Kuvassa 338 on esitetty kaksi esimerkkiä suunnatun infrapunahäirinnän toteuttamisesta vakautetun ja suunnattavan häirintäpään ”gimbaalin” avulla. Tällainen gimbaali painaa 50 - 100 kg, joten sen asentaminen kevyisiin lavetteihin muodostuu usein ongelmaksi. Tämä ja vakautetun tornin kustannukset ovat motivoineet kehittämään uusia ratkaisuja. Yksi mahdollinen ratkaisuvaihtoehto on hyödyntää MEMS-tekniikkaa (Microelectromechanical System), jolla arvioidaan olevan mahdollista kehittää 2-3 kg painava laserhäirintäjärjestelmä, jonka suuntausnopeus on 90 asteen sektorissa alle millisekunnin. Nopea suuntaus perustuu luonnollisesti liikkuvan massan pienuuteen – konventionaalisessa gimbaalissa muutamia isokokoisia hyrrävakautettuja ja MEMS-tekniikalla satoja mikroskooppisen pieniä peilejä. MEMS-tekniikan etuna on lisäksi se, että häirintäapertuuri voidaan toteuttaa lavetin pinnan muotoisena konformisena rakenteena, jolloin se ei lisää ilmanvastusta.

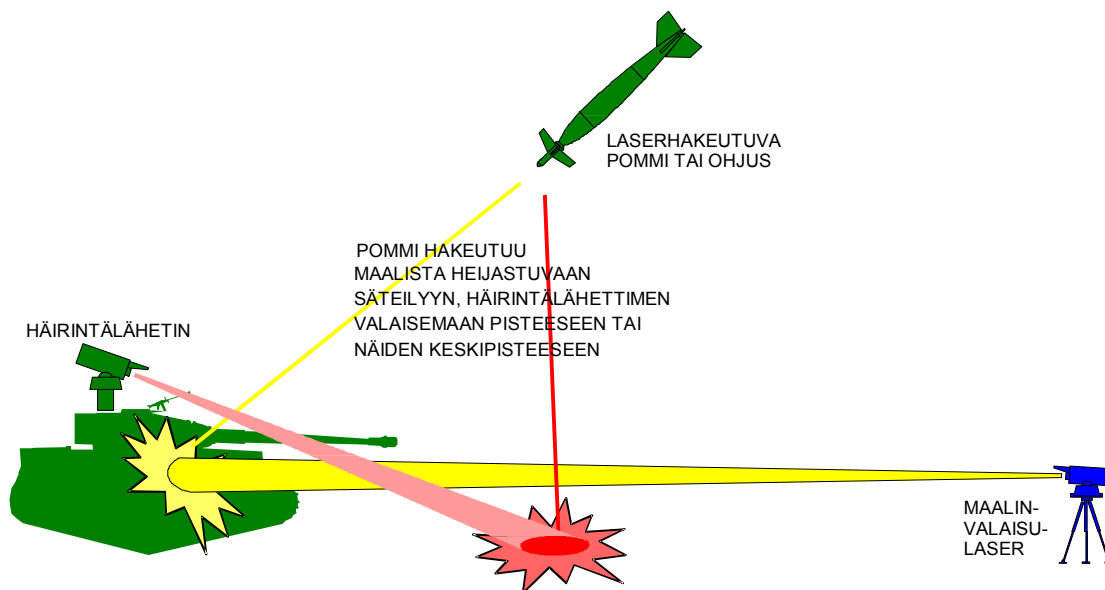
Yksinkertaisella pulssihäirinnällä voidaan vaikuttaa varsin helposti yksielementtisiin spin scan ja con scan-ohjjuksiin. Kuten hakupäiden yhteydessä todettiin, ongelmana on löytää oikea modulointitaajuus, joka riippuu hakupään sektorilevyn rakenteesta ja pyörintänopeudesta. Yksi mahdollisuus on mitata hakupäästä retroheijastuvan ja sektorilevyssä moduloituneen häirintäsignaalin modulointitaajuus ja säätää sen perusteella häirintälähteen modulointitaajuutta (suljetun säätösilmukan menetelmä). Toinen tapa on kokeilla sokkona useita erilaisia ennalta ohjelmoituja häirintämoodeja (avoimen säätösilmukan menetelmä). Häirintälähteen voi myös pyrkiä hyökkäämään sensorin automaattivahvistuksen säätösilmukkaa (AGC, Automatic Gain Control) vastaan lähettämällä lyhyitä, mutta suuritehoisia pulsseja. Nämä

saturoivat ilmaisimen ja saavat hakupään AGC-piirin laskemaan vahvistusta, jolloin maali erottuu heikommin taastaansa vasten.

Nykyaikaisiin tuijottaviin kuvaaviin (staring array) sensoreihin harhauttava häirintä ei tehoa. Päinvastoin; häirintälähetin vain lisää maaliin lukkiutumistodennäköisyyttä toimimalla majakkana. Tuijottavan kuvaavan sensorin harhauttamista tutkitaan, mutta todennäköisintä lienee, että parhaimmaksi häirintämenetelmäksi jää sensorelementtien tuhoaminen tai sensorin koko vastaanotinmatriisin tukkiminen suuritehoisella infrapunalaserilla.

Laservalaisun häirintä

Laservalaisun häirinnällä voidaan pyrkiä harhauttamaan laservalaisuun hakeutuvaa ohjusta hakeutumaan voimakkaaseen häirintälasersignaaliin. Häirintäjärjestelmä heijastaa lasersäteen jonkin matkan päähän maahan, josta säteily heijastuu ja siroaa aseensa vastaanottimeen. Vastahäirintätoimenpiteinä laservalaisujärjestelmissä käytetään kuitenkin usein koodattuja laserlähetteitä, joiden matkiminen häirintäjärjestelmällä on vaikeata, vaikka tietoja onnistuneista kokeista onkin levinnyt julkisuuteen. Teknisesti korkeatasoinen valaisuun hakeutuva ammus kykenee erottamaan häirintäsignaalin oikein koodatusta valaisusignaalista.



Kuva 336: Lasersäteilyyn hakeutuvan aseensa harhauttaminen edellyttää eri aallonpituuksille viritettävissä olevaa ja suunnattavaa laserhäirintälähetintä.

Lasersokaisu

Ohjuksen hakupäässä olevan lämpösensorin sokaisu on keskeisin omasuojalaserin tehtävä. Kuten lämpöhakupäiden käsittelyn yhteydessä todettiin, hakupään saama signaalikohinasuhde riippuu kohteen ja taustan säteilytehon erotuksen suhteesta sensorin omaan kohinasuhteeseen. Sensorin sokaisemiseksi on siis kyettävä peittämään sensorin kohteesta saama signaali, tai niin suuri signaali, että ilmaisimen dynaaminen alue ylittyy ja ilmaisin tukkiutuu. Tuijottavan sensorin tapauksessa tämä tarkoittaa sitä, että hakupäätä on valaistava niin suurella valoteholla, että myös optikasta siroava säteily riittää sokaisuun. Tällöin hakupää ei kykene hakeutumaan häirintäsignaaliin, sillä se näyttää tulevan joka suunnasta. Northrop

Grummanin DIRCM (Directed Infra-Red Counter Measures) on esimerkki tällaisesta järjestelmästä. Se käsittää lentokoneeseen, helikopteriin tai laivaan asennettavan vakautetun tornin sekä suurteholaserin, jonka tehtävänä on estää ohjuksen infrapunavastaanottimen toiminta. Järjestelmän varoittimena käytetään neljää UV-sensoria, jotka havaitsevat ohjuksen kiihtytysvaiheessa syntyvät UV-alueen emissiot. Suurempitehoisella laserpulsilla hyökkäävä ase voidaan lamauttaa myös vaurioittamalla sen ilmaisinta tai optiikkaa. Tällaisia myös oma-suojakäyttöön sopivia laserjärjestelmiä on käsitelty *asejärjestelmät* -luvussa.

Laserhäirinnän minimitavoitteena on estää etäisyyden mittaaminen peittämällä mittauspulsin kohinaan. Tällöin asejärjestelmä ei kykene määrittämään maalin paikkaa, mikä vaikeuttaa ballistisen laskennan suorittamista.

Lasersokaisulla pyritään suuritehoisen lasersignaalin avulla infrapuna- tai TV-sensorin vastaanottimen tukkimiseen tai vaurioittamiseen siten, ettei se kykene saamaan maalista signaalia. InSb-detektorin vaurioittamiseen tarvitaan noin 1 J/cm² energiatiheys ilmaisimella, mikä vaatii noin 50 - 100 mJ energian 1 km etäisyydellä (samaa luokkaa kuin etäisyysmittareissa⁵²). Sensoreissa ja aseiden hakupäissä käytetään yleensä suodattimia, jotka päästävät vain järjestelmän sensorelementtien tunnistaman säteilyn lävitse. Ongelma ei siten ole vaadittava tehotaso, vaan oikean aallonpituuden löytäminen. Sensorijärjestelmät ovat helpoiten lamauttavissa samoissa aallonpituusalueilla, joilla ne itse toimivat, eli jollakin ilmakehän ikkunoista: näkyvä (0,4 – 0,7 µm), lähi-infrapuna (0,7 – 1,4 µm), keski-infrapuna (1,5 – 5,5 µm) ja kaukoinfrapuna (8 – 14 µm). Kuitenkin etukäteistieto kaikkien mahdollisten maalien toimintataajuuksista on mahdoton olettaa samoin kuin se, ettei sensorijärjestelmiä suojattaisi antisensorilasereilta suodattimin.

Sokaisulaserin ei tarvitse olla monimutkainen ja kallis: jopa yksinkertaisilla lasersoihduilla voidaan lamauttaa hyökkäävän aselavetin lämpö- ja valovahvistinsensori. Esimerkiksi yhden watin luokkaa olevan lasersoihdun valoteho riittää joidenkin kokeiden mukaan helikopterin valovahvistimen sokaisuun sekä valonvahvistimen näkökentässä että sen ulkopuolella.

Näkyvän valon hakupään häirintä

Näkyvän valon alueella voidaan käyttää erilaisia purkauslamppuja tai laseria häirintäsignaalin tuottamiseen. Näkyvän valon alueella käytetään CCD-kennoja ja pii-ilmaisimia, joiden dynamiikka on suuri: esimerkiksi TV-sensoreita käytetään erittäin kirkkaissa olosuhteissa (esimerkiksi aurinkoiset talvipäivät lumisella aukealla) sekä hyvin pimeässä. Häirintäsignaalin vaikutus riippuu olennaisesti taustan valaistuksesta: pimeällä, jolloin ilmaisimen vahvistus on maksimissaan häirintä tehoa huomattavasti paremmin kuin valoisalla, jolloin vahvistus on minimissään. Sama pätee myös häirintään: pimeällä pienikin silmään kohdistettu valo saa aikaan häikäistymisen, mutta kirkkaassa auringossa silmä ei kovin helpolla häikäisty.

Sytyttimen häirintä

Herätesytyttimet toimivat joko millimetritaajuuksilla tai infrapuna-alueella. Yleensä niissä käytetään taajuutta, joka vaimenee voimakkaasti ilmakehässä. Tällöin myös häirintäsignaali vaimenee nopeasti etäisyyden kasvaessa. Oikein suunniteltujen herätesytyttinten häirintä on

⁵² Ove Steinvall: Laser countermeasures capabilities. FOA report 2000.

mahdollista vain räjähdysetaisyyden luokkaa olevilta etäisyyksiltä, mikä johtaa tarpeeseen varustaa kaikki suojattavat kohteet häirintäjärjestelmillä. Häirintäjärjestelmän ei voida olettaa kykenevän harhauttamaan modernilla digitaalitekniikalla toteutettua valesatunnaista pulssin-toistotaajuutta käyttävää herätesytytintä, joten sytyttimen tukkiminen kohinahäirinnällä jää toimivimmaksi vaihtoehdoksi. Tällä menetelmällä voidaan estää räjähtäminen ennalta asetetulla tai ammuksen itsensä maalin tyypin mukaan päättelemällä etäisyydellä. Ammuksessa varajärjestelmänä olevan iskusytyttimen toimintaa häirintä ei kuitenkaan estä.

Aseen laukaisijan häiritseminen

Mikäli asejärjestelmä perustuu laservalaisuun tai siihen, että ase laukaisseen järjestelmän operaattori seuraa maalia (SACLOS) tai ohjaa ammusta tai ohjusta (MACLOS), voidaan häirintä kohdistaa myös ampuneeseen tai maalia valaisevaan lavettiin. Menetelmänä voidaan käyttää lasersokaisua tai konventionaalisia aseita; esimerkiksi israelilaiset ovat varustaneet taisteluvaununsa lukuisilla konekivääreillä panssarintorjunta-ohjuksen ampujan häiritsemiseksi. Menetelmää on käytetty menestyksellisesti ja se osoittaa, että elektronisen uhan vastatoimenpiteen ei välttämättä tarvitse olla elektroninen. Laservaroittimen antama parhaimmillaan alle asteen oleva suuntatarkkuus mahdollistaa esimerkiksi taistelu- tai rynnäkövaunun tornin automaattisen suuntaamisen varsin tarkasti kohti laserlähdettä. Vaunun omilla tähtäimillä ja etäisyyssmittarilla voidaan suorittaa tarkka maalin paikantaminen muutamassa sekunnissa, minkä jälkeen valaisijaa tai ohjuslavettia vastaan voidaan käyttää vaunukanuunaa tai koaksiaalista konekivääriä. Tämänkaltaisen aktiivinen omasuoja-järjestelmä on varsin yksinkertainen toteuttaa, mikäli vaunun eri osajärjestelmät on integroitu keskenään.

Ammuksen tai ohjuksen tuhoaminen

Ammuksen tai ohjuksen tuhoaminen voidaan toteuttaa automaattisesti toimivalla tutka- tai laserohjatulla konetykillä tai konekiväärillä, suunnatulla räjähdewaikutuksella (EFP, Explosively Formed Penetrator, räjähtämällä muodostettu sula metallisuihku), esisirpaloidulla räjähteellä, ilmaräjähteellä⁵³, maalin suojaksi laukaistulla verkolla, muulla suojarakenteella, ilmaräjähteellä tai suunnatun energian aseella (erityisesti HPM:llä). Joissakin tapauksissa on harkittu taistelupanssarivaunun pääaseen käyttämistä ohjuksen lennon vaikeuttamiseen ampumalla sirpalekранаatti joko ohjuksen eteen sen lentoreitille tai ohjuksen taakse ohjausjohtimien tai optisen komentolinkin näköyhteyden katkaisemiseksi. Menetelmä on kuitenkin varsin epävarma ja edellyttää ohjuksen lentoreitin tarkan arvioimisen lisäksi sitä, että putkessa on sirpalekранаatti eikä nuoliammus.

PASSIIVISET VASTATOIMENPITEET

Passiivisten vastatoimenpiteiden tavoitteena on joko peittää maali laaja-alaiseen suojaverhoon, jonka läpi ase- tai sensorijärjestelmä ei näe, tai haitata maalin valintaa luomalla lähi-alueelle useita samankaltaisen signaalien antavia valemaaleja. Vastatoimenpiteiden mitoitaminen riippuu kohteesta saatavasta signaalista; jos kohteesta saadaan luonnostaankin pieni signaali, myös suojaverhon absorptio- tai emissiotasot voivat olla pieniä. Samoin harhamaali

⁵³ Ilmaräjähteellä tarkoitetaan ilmaan levitettävää palavista nesteistä tai hiukkasista koostuvaa aerosolipilveä, joka sytytetään ulkoisesti tai joka syttyy itsestään hiukkasten reagoidessa ilman hapen kanssa.

voi olla yksinkertainen. Siten häivemenetelmien soveltaminen edesauttaa olennaisesti passiivisten vastatoimenpiteiden suunnittelussa ja toteuttamisessa. Passiivisten vastatoimenpiteiden oikea ajoitus on tärkeää; liian aikaisin laukaistun vastatoimenpiteen vaikutus ehtii lakata ennen kuin uhkaava asejärjestelmä kykenee siihen reagoimaan ja liian myöhään laukaistu vastatoimenpide ei ehdi enää vaikuttamaan aseeseen. Vastatoimenpiteeseen on myös kyettävä liittämään omaan taistelutekniikkaan; kohteen peittävästä verhosta tai aseiden harhauttavasta heitteestä ei ole hyötyä mikäli asejärjestelmä kykenee tunnistamaan vastatoimenpiteen ja olettamaan maalin löytyvän samasta pisteestä jossa se oli ennen katoamistaan, tai jatkavan samaa liikerataa kuin ennen heitteen laukaisua. Tällöin ase kykenee lentämään sokkona siihen pisteeseen, jossa se laskee maalin olevan sen edellisen sijaintipaikan ja liikeradan perusteella. Esimerkiksi ilmatorjuntaohjus saattaa infrapuna- tai tutkaheitteen havaittuaan käynnistää ns. push-ahead-toiminnon, jonka avulla se pyrkii lentämään heitteen edelle ja etsimään maalia uudelleen sieltä.

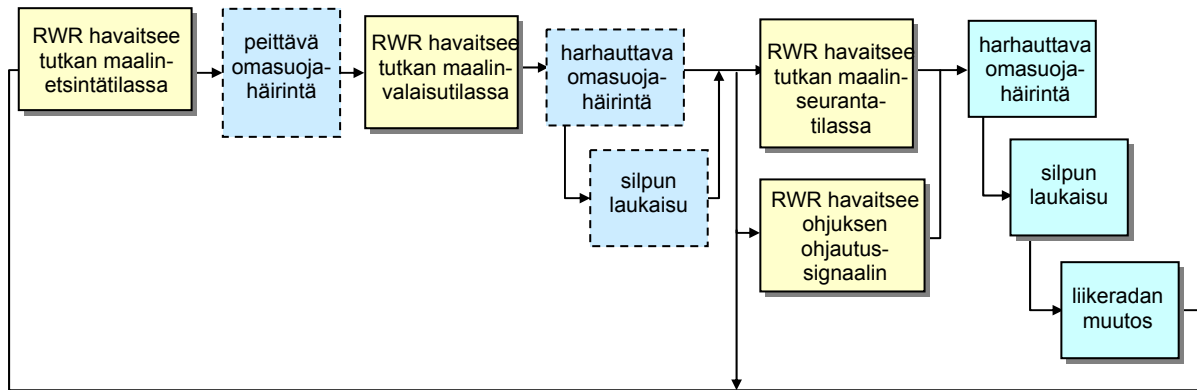
Silppuheitin

Tutkasilppumateriaalina käytetään yleisimmin noin 20 µm paksua lasikuitua, jossa on 2-3 µm paksu aluminointi. Silppusäikeet on pilkottu puolen aallonpituuden mittaisiin pätkiin. Tällöin ne toimivat puolialtodipolin tavoin ja heijastavat voimakkaasti tulevaa tutkasäteilyä. Silppu on pakattu säiliöön – esimerkiksi muovikelmuun – josta se levitetään joko lentokoneen ilmapirran tai suojaheitteen räjähdyspanoksen avulla. Räjähdyspanoksen avulla levitettävä silppu muodostaa suojan muutaman kymmenen millisekunnin kuluessa levityspanoksen räjähtämisestä. Kussakin silppupakkauksessa on satoja tuhansia eri aallonpituuksille mitoitettuja kuituja, jotka levitessään peittävät maalin tutkasäteilyä läpäisemättömään pilveen.

Silppu laskeutuu noin 0.3 m/s, joten jos verho levitetään 10-20 metrin korkeudelle, se kestää vain muutamia sekunteja – maksimissaan noin 10 s. Siten heitteen laukaisuaika on kriittinen; mikäli heite laukaistaan ennen ajoaikaansa, sen suoja ehtii lakata ennen kuin ohjus ehtii niin lähelle, että heitteellä olisi merkitystä. Jos heite toisaalta laukaistaan liian myöhään, ei suoja-verho ehdi muodostua ajoissa.

Heitteen reagointiajan muodostuu varoittimen reagointiajasta, heitteen lentoajasta ja levittäytymisajasta. Jos oletetaan, että varoittimen reagointiaika on häviävän pieni, voidaan varoitinmelta edellytettävä ennakkovaroitusajaksi arvioida seuraavasti: Mikäli heitteen oletetaan lentävän 150 m/s ja heite halutaan 50 metrin etäisyydelle maalista, kuluu heitteen lentoon aikaa $50 \text{ m} / 150 \text{ m/s} = 333 \text{ ms}$. Jos räjähdyspanos levittää heitteen 100 ms:ssa suojattavan kohteen peittämiseen riittävän laajalle alueelle, on varoittimen annettava varoitus tulevasta ohjuksesta tai ammuksista 433 ms ennen sen tuloa niin lähelle kohdetta, ettei se enää voi muuttua hakeutumispistettä.

Asejärjestelmä voi pyrkiä erottamaan silpun maalista käyttämällä erotteluperusteena dopplersiirtymää tai polarisaatiota. Ilma-aluksesta pudotettavan silpun nopeus on pienempi kuin aluksen, joten siitä saatava dopplersiirtymä on suurempi takaa ajavan ohjuksen tapauksessa. Suurin osa lasikuitusilpusta asettuu vaakatasoon tai lähelle sitä, jolloin silppu voidaan pyrkiä erottamaan käyttämällä läheteessä pystypolarisaatiota. Vastaavasti suojajärjestelmässä voidaan siirtyä käyttämään alumiinifoliosilppua, joka heijastaa runsaasti myös pystypolarisaatiota. Alumiinifoliosilpun huonona puolena on se, että se laskeutuu nopeammin kuin lasikuitu. Sen vajoamisnopeus on luokkaa 0,4 - 0,6 m/s.



Kuva 338: Esimerkki tutkasilpun käytöstä lentokoneen omasuojajärjestelmän tutkavoittimen (RWR) ohjaamana. Silpusta saadaan paras hyöty kun sitä käytetään koordinoitusti harhauttavan häirinnän ja ohjausliikkeiden kanssa.

Lämpösoihtu

Lämpösoihduja (flare) käytetään nykyisin lähinnä ilma-aluksissa ja laivoissa harhauttamaan lämpöhakeutuvia ohjuksia sekä rikkomaan IP-maalinseurantajärjestelmän lukittuminen maaliin. Ensimmäisillä soihtuilla pyrittiin imitoimaan lentokoneen tai helikopterin kuuman moottorin emissioita. Myöhemmin soihdut ovat kehittyneet ohjusten havaintokyvyn ja älykkyyden lisääntymisen myötä jäljittelemään suojattavan kohteen lämpöjakaamaa. Uusimmissa maasta maahan ja ilmasta maahan -asejärjestelmissä hakeutuminen perustuu yleensä kuvaaviin lämpötähtäimiin ja hakupäihin sekä tutka- tai laservalaisuun, minkä vuoksi soihtujen käyttö ei ole niissä yleistä.

Pyroteknisen lämpösoihdun säteilyteho ilmatorjuntaohjusten toiminta-aallonpituuksilla on luokkaa 25 – 50 kW/sterad, kun lentokoneen heräte saattaa vaihdella 10 – 10.000 W/sterad välillä. Näin suuri heräte saadaan aikaiseksi korkealla soihdun lämpötilalla. Tällaiset magnesium-pohjaiset soihdut ovat ongelmallisia maavoimien sovelluksissa, sillä ne sytyttävät helposti maastopaloja kuivan sään aikana.

Soihtu voidaan pyrkiä erottamaan maalista sen mahdollisesti erilaisen spektrikoostumuksen, liikeradan tai signaalin nousujan perusteella. Nykyaikaisissa ohjuksissa käytetään kaksiväri-erottelua, jolla pyritään erottamaan yksinkertaisen soihdun ja lentokoneen erilainen emissiospektri. Spektrin erilaisuus johtuu sekä soihdun ja maalin erilaisista lämpötiloista että soihdussa käytetyn materiaalin ja pakokaasujen erilaisesta kemiallisesta koostumuksesta, joka johtaa erilaiseen emissiospektriin: koneen peräliekissä esimerkiksi on absorptioalue 4,2 μm alueella, jota tavallisissa fosforisoihduissa ei ole. Vastaavasti tämän estämiseksi nykyaikaisissa soihtuissa käytetään spektrin kemiallista sovitusta sekoittamalla soihtuun erilaisia palavia aineita, joiden emissiospektri jäljittelee mahdollisimman tarkasti lentokoneen todellista emissiospektriä. Tällaisista soihtuista käytetään nimitystä pyroforinen soihtu. Ne ovat tyypillisesti suurempikokoisia kuin pyrotekniset soihdut, ja niiden ongelmana vielä nykyisin on paloprosessin epätasaisuus, minkä vuoksi niiden heräte vaihtelee merkittävästi. Tällä hetkellä pyroforisia soihtuja tiedetään käytettävän vain amerikkalaisessa B-52 Stratofortressissa. Niin suuren kohteen suojaaminen pistesoihtuilla on lähes mahdoton tehtävä.

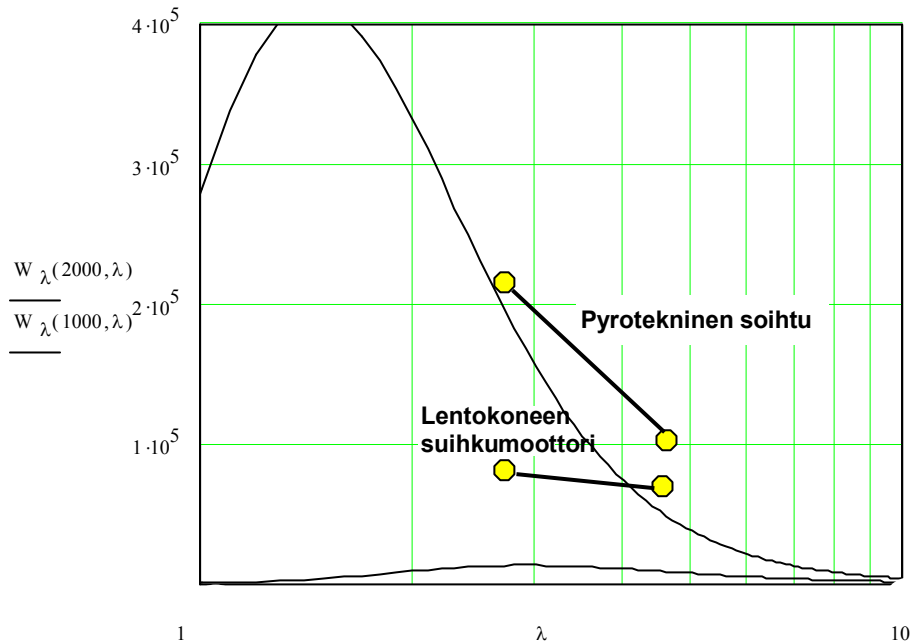


Kuva 339: Suuren lentokoneen lämpöheräte on niin iso, että koneen suojaaminen edellyttää suuren soihtumäärän käyttämistä, mitä kuvassa demonstroi erikoisjoukkojen AC-130H. [USAF]

Soihtujen spektrivasteen kehittymisen kompensoimiseksi hakupäissä yleistyneenä kolmiväritekniikka sekä polarisaatiodiskriminointi. Kolmantena aallonpituusalueena sopivina on ultravioletti, sillä se mahdollistaisi soihtujen erottamisen lisäksi aurinkoheijastusten ja suuliekkien erottamisen. Soihtujen säteilyn polarisaation sovittaminen metallirakenteisen kohteen mukaisesti on hyvin hankalaa.

Lentokoneesta pudotettava soihtu voidaan erottaa myös sen liikeradan perusteella, soihtu kun yleensä hidastuu ilmapinnan vaikutuksesta ja putoaa alaspäin. Tämän erottelun estämiseksi on kehitetty vapaasti lentäviä ja rakettiavusteisia aerodynaamisia soihtuja⁵⁴. Soihtujen suurimmaksi ongelmaksi jää sen pieni koko. Kuvaava lämpösensori kykenee suhteellisen helposti erottamaan pienessä avaruuskulmassa näkyvän soihtun verrattain suurikokoisesta lentokoneesta. Hakupäiden prosessointikapasiteetin lisääntyessä ne kykenevät myös tarkkailemaan kaikkia näkökentässään olevia kohteita ja päättämään niiden liikeratojen ja intensiteetin muutoksista mikä on oikea maali. Tämä tietysti lisää ohjuksen hintaa, muttei todennäköisesti kovin merkittävästi, sillä lisäominaisuudet saavutetaan elektroniikalla.

⁵⁴ Esimerkiksi Lockheed Martinin kehittämä Lorelei-infrapunaharhamaali lentää rakettimoottorin turvin jäljitellen lentokoneen liikerataa ja lämpösäteily-spektriä.



Kuva 340: 2000 K ja 1000 K lämpimän kohteen suhteellinen säteilyteho. Kaksivärihakupää pyrkii diskriminoimaan soihtun, jonka emissiospektrissä kahden eri aallonpituuden suhteellinen intensiteetti ei vastaa koneen intensiteettisuhdetta.

Soihtun yksi merkittävä heikkous on se, että sen käyttö näkyy kauas. Omasuojaheitteiden väärään aikaan tapahtuva laukaisu saattaa paljastaa suojattavan lavetin. Tämän ongelman pienentämiseksi pyritään kehittämään niin sanottuja pimeitä soihtuja, jotka säteilevät mahdollisimman vähän näkyvän valon aallonpituuksilla, mutta joiden heräte on kuitenkin riittävä ohjusten hakupäiden toiminta-aallonpituuksilla lähi- ja kaukoainfrapuna-alueella.



Kuva 341: Sveitsiläisen F-18 Hornetin omasuojaheittimet näkyvissä AMRAAM-ohjuksen kärkikartion takana. [J. Kosola]

Kaiken kaikkiaan näyttäisi siltä, että soihtujen ja hakupäiden keskinäisessä kaksintaistelussa hakupäät näyttävät pääsevän – ja myös jäävän ainakin joksikin aikaa – voitolle. Tämän vuoksi länsimaissa ollaan kehittämässä laserhäirintää ja -sokaisua täydentämään soihtuja ilma-alusten suojana. Soihtut ovat kuitenkin käyttökelpoisia myös tulevaisuudessa vielä

pitkään käytössä olevien vanhojen, halpojen ja yksinkertaisten infrapunaohjusten torjumisessa, mutta ne eivät kuitenkaan yksinään tule riittämään.

Suojasavuheitin

Suojasavu voidaan levittää vastaavanlaisella heitteellä kuin tutkasilppukin. Suojattavat kohteet varustetaan useita yksittäisiä savuammuksisia sisältävin heitinalustoin. Heitteet voidaan laukaista automaattisesti tai manuaalisesti. Automaattisessa järjestelmässä omasuojajärjestelmän ohjausyksikkö laukaisee varoittimen antamaan uhkasuuntaan suunnatut heitteet. Savujen on kyettävä suojaamaan vaunua sekä näkyvän valon aallonpituuksilla että infrapuna-alueella, joten niiden partikkelikoon on ainakin teoriassa katettava 0,4 – 14 µm alue. Ongelmaksi infrapuna-alueella muodostuu vaadittavien savuhiukkasten suhteellisen suuri koko, joka lisää hiukkasten vajoamisnopeutta ja siten lyhentää savuverhon kestoa.

Teknisen kehityksen myötä kasvavat mahdollisuudet toteuttaa monispektriheitteitä, eli sekä tutkaa että lämpökameraa ja näkyvän valon alueella toimivia sensoreita vastaan suojaavia heitteitä. Esimerkiksi niin sanotuilla pyroteknisillä heitteillä pyritään tuomaan suoja sekä infrapuna-alueella että tutkataajuuksilla toimivia sensoreita ja aseita vastaan.

Soihdun ja suojasavun risteytys heikentää IR-säteilyn läpäisyä absorboimalla, sirottamalla ja heijastamalla sitä ja sen lisäksi heikentää kohteen kontrastia säteilemällä itse laajalla aallonpituusalueella. Esim. Galix 13 suojasavukranaatilla säteilyspektri on 350 nm – 14 µm.

Vesisumu

Ajoneuvo tai rakennus voidaan suojata vesisumulla, jonka partikkelit ovat sopivan kokoisia. Lämpökamera ei näe tiheän sumupilven läpi sen paremmin kuin valonvahvistin tai kiikarikaan. Vesisumu tarjoaa myös jonkinlaisen suojan 94 GHz millimetri-aaltotutkia ja -hakupäitä vastaan. Tällainen sumupilvi voidaan levittää parissa sekunnissa, jonka jälkeen siirtämällä ajoneuvoa pilven suojassa voidaan estää täsmäaseen osuminen maaliinsa. Keskeinen tekijä sumupilven muodostamisessa on kyetä pilkkomaan vesipisarat oikean kokoisiksi. Ongelmana vesisumun tuottamisessa on suurehko veden määrän tarve, joka on lähes mahdoton kuljettaa maalla liikkuvassa taisteluaajoneuvossa polttoaineen ja asejärjestelmän tarvitsemien ampumatarvikkeiden lisäksi. Tämän vuoksi vesisumua voidaankin käyttää tehokkaasti vain vesillä liikkuvissa aluksissa tai esimerkiksi siltojen suojaamisessa.



Kuva 342: Ruotsalainen CV90-120 vaunu vesisumupilven suojassa. [FOI/Christer Wigren]



Kuva 343: Kohdesuojaukseen tarkoitettu savutusajoneuvo. Vasemmanpuoleisessa pienoiskuvassa ajoneuvon savutuksen vaikutusta tarkasteltuna paljaalla silmällä ja oikeanpuoleisessa lämpökameralla katsottuna. Kuvasta nähdään selvästi, kuinka lämpökamera näkee suhteellisen vaivattomasti tavallisen savun läpi. [J. Kosola]

Valemaalit

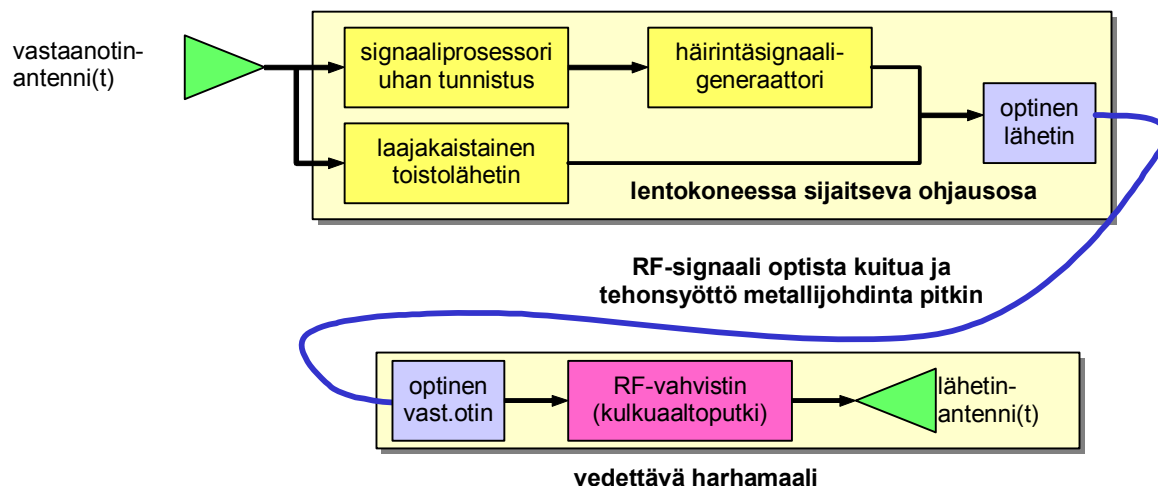
Winston Churchill totesi 1941: ”Sota-aikana totuus on niin arvokas, että sitä on suojattava aina nipuilla valheita”. Tämä pätee edelleenkin paitsi strategisella ja operatiivisella tasolla, myös taistelukentällä. Todelliset ryhmytykset, joukkojen liikkeet ja järjestelmien käyttötavat on aina suojattava riittävällä määrällä viholliselle syötettävää harhauttavaa informaatiota. Vaikka kyseessä on pikemminkin doktriini-, taktiikka- ja koulutussidonnainen asia, käsitellään tässä lyhyesti harhauttamista ja harhauttavia järjestelmiä sekä laitteita, jotta lukijalle syntyisi käsitys niiden käytöstä yhdessä muiden suojatekijöiden kanssa. Lisäksi kyseessä on jatkuva taistelu hyökkäävän sensorin ja harhauttavien keinojen välillä. Kumpikin pyrkii mitätöimään toisen vaikutuksen uusilla teknisillä ratkaisuilla ja älykkäillä soveltamisperiaatteilla.

Valemaalin tavoitteena on pidentää sitä aikaa joka uhkaavalta järjestelmältä kuluu oikean maalin valitsemiseen ja lyhentää etäisyyttä, jolta se kykenee tämän valinnan tekemään. Siten harhamaalien ei tarvitse olla täysin samanlaisia esikuvansa kanssa. Häivemenetelmien käyttö järjestelmien suunnittelussa ja toteutuksessa sekä oikea maastouttaminen helpottaa harhamaalien suunnittelua. Lentokoneiden valemaaleja voidaan suojauksen lisäksi käyttää myös hyökkäyksessä, esimerkiksi houkuttelemaan vihollinen aktivoimaan ilmatorjuntatutkansa ja käyttämään ohjuksiaan harhamaaleihin, jotta perässä seuraavat rynnäkkökoneet voivat toimia vapaammin.



Kuva 344: Perässä vedettävät valemaalit ovat tehokas tapa suojata lentokoneita ja laivoja. Isossa kuvassa Raytheonin ja pienessä DASAn häirintälähtettimet [Raytheon ja Sanders].

Tutkajärjestelmiä vastaan tarkoitetut valemaalit voivat olla suhteellisen yksinkertaisia tutkan heikon erottelukyvyn vuoksi. Yksinkertaisemmillaan pelkkien kulmaheijastinten käyttö voi riittää. Tutkien erottelukyvyn paraneminen ja millimetriaaltotutkien yleistymisen sekä esimerkiksi dopplererottelun käyttö edellyttää kuitenkin valemaalien teknisen kehitystason vastaavanlaista nostamista. Monispektriuhka pakottaa suunnittelemaan valemaalit siten, että ne antavat mahdollisimman paljon maalia vastaavan signaalin paitsi näkyvän valon alueella, myös tutkataajuuksilla ja infrapuna-alueella.



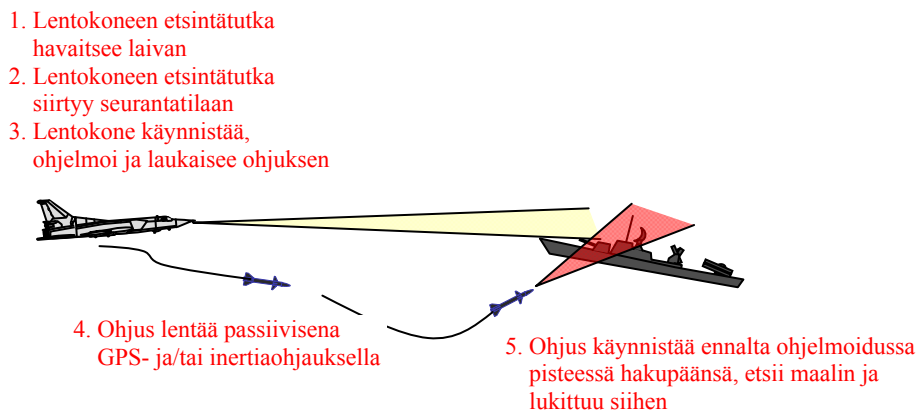
Kuva 345: Perässä vedettävän harhamaalin keskeiset toiminnalliset osat.

Monopulssitutkan kulmaseuraimen vaikean harhauttavuuden vuoksi lentokoneiden ja laivojen omasuojajärjestelmissä käytetään perässä vedettäviä valemaaleja, joiden tehtävänä on houkuttaa ohjuksen hakupää lukittumaan harhamaaliin ja pakottaa ohjus hakeutumaan siihen. Häirintä voi perustua harhauttavaan häirintäsignaaliin, jossa lentokoneeseen tai laivaan sijoitettu vastaanotin vastaanottaa tutkasignaalin, joka sitten prosessoidaan ja välite-

tään valokuitua pitkin valemaaliin, jossa sijaitsee vain RF-lähetin ja antenni. Häirintälähetin voi pyrkiä myös peittämään maalikaiun ja pakottamaan ohjuksen häirintälähettimeen hakeutuvaan moodiin. Vastaanotinantennit sijaitsevat yleensä lentokoneessa sivuvakaajan ja siipien päissä. Häirintäsignaali voidaan generoida yksinkertaisesti tallentamalla tutkapulssi DRFM-muistiin tai luomalla se synteettisesti erikseen kutakin tunnistettua uhkaa vastaan.

Esimerkki omasuojajärjestelmästä

Kuvassa 334 on esitetty esimerkki ASM-meritorjuntaohjuksen laukaisusta. Ohjus lentää lentokoneen tietokoneen määrittämään ja ohjuksen lennon aikana päivittämään ennakkopisteeseen, jossa se käynnistää oman terminaalivaiheen maaliin hakeutumisen. Tämä riippuu ohjuksen hakupään tyypistä. Aktiivisella tutkahakupäällä varustettu ohjus aktivoi tutkansa, mutta puoliaktiivisella tai lämpöhakupäällä varustettu ohjus jatkaa passiivista hakeutumistaan.

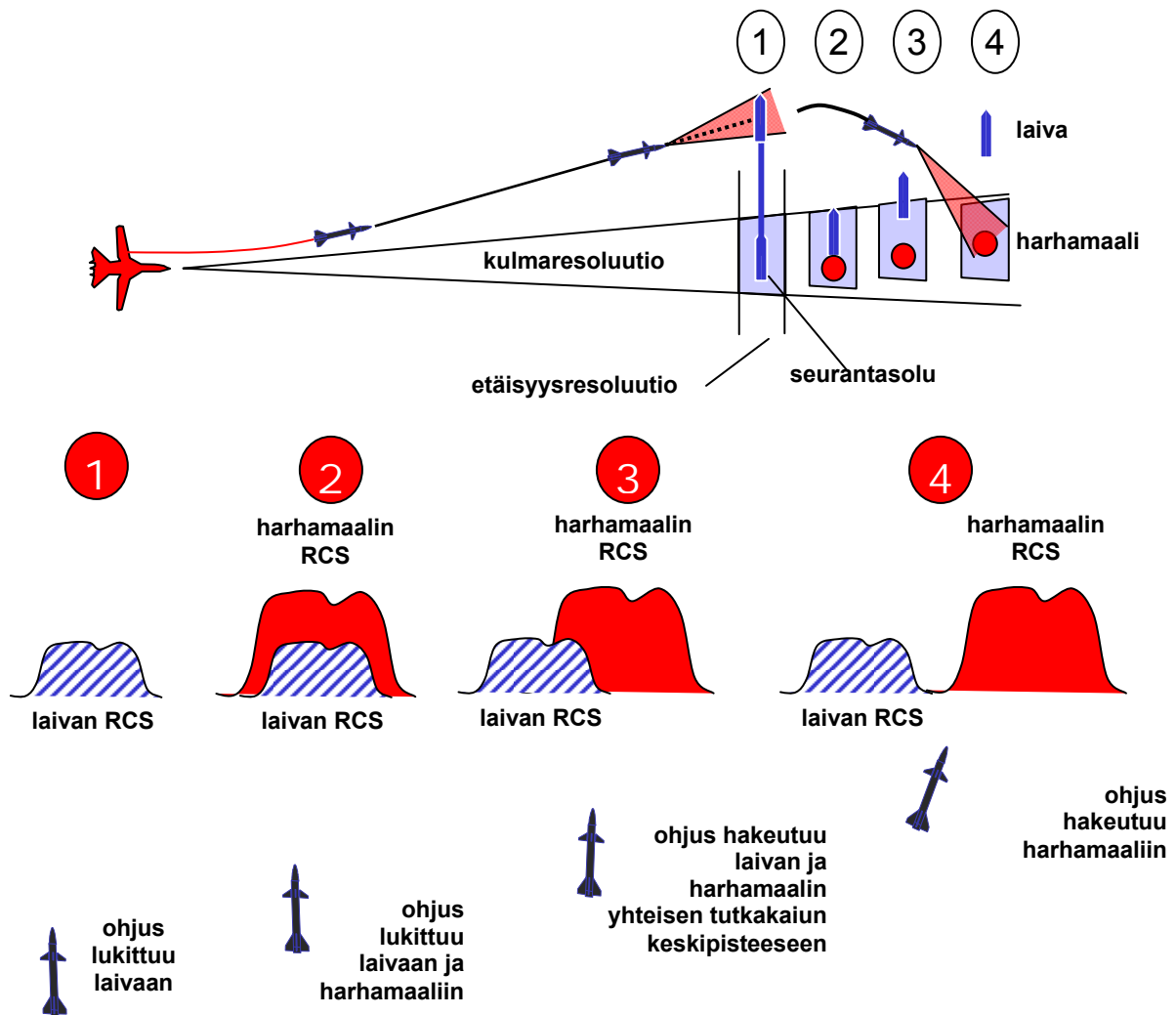


Kuva 346: Esimerkki ASM-hyökkäyksen vaiheista.

Laivan ESM-järjestelmä voi kuitenkin havaita lentokoneen tutkan siirtymisen maalinetsintätilasta maalinseurantatilaan. Tämä indikoi todennäköistä ohjuslaukaisua, joten laiva aktivoi harhamaalinsa – jos laiva ei olekaan paljastunut vaan lentokone siirtyi seuraamaan jotakin muuta maalia, lentokone havaitsee laivan viimeistään tässä vaiheessa. Laivan harhamaalin on oltava samassa seurantasolussa kuin laivakin on, joten harhamaalin on oltava sekä tutkan antennikeilassa että etäisyysportin sisäpuolella. Lisäksi harhamaalin herätettä (tutkapoikkipinta-alaa tai infrapunaherätettä) on lisättävä riittävän hitaasti, jottei maalinseurain havaitse harhamaalin käyttöönottoa. Kuvassa 335 on havainnollistettu harhamaalin toimintaa.

- 1) Laiva havaitsee tutkan siirtymisen seurantaan ja päättelee ohjuksen laukaisun. Tutkan seurantaportissa on vain laivan tutkakaiun energiaa.
- 2) Harhamaali käynnistetään, jolloin tutkan seurantaportissa on sekä laivan että harhamaalin energiaa. Moderneja koherentteja hakupäitä ja seurantatutkia vastaan on käytettävä koherenttia harhalähetettä.
- 3) Harhamaalin etäisyyttä laivasta kasvatetaan, jolloin tutkakaiku jakautuu laajemmalle seurantasoluun. Tutka hakeutuu tutkapoikkipinta-alan keskipisteeseen, joka liikkuu koko ajan kauemmas laivasta harhamaalin siirtyessä kauemmas. Mitä suurempi harhamaalin tutkapoikkipinta-ala laivaan nähden on, sitä lähempänä harhamaalia tutka kuvittelee laivan olevan.

- 4) Harhamaalin etäisyyden kasvettua riittävästi laiva katoaa tutkan seurantasolusta ja tutka ryhtyy seuraamaan harhamaalia.



Kuva 347: Esimerkki harhamaalin käyttämisestä ohjuksen harhauttamiseen.

Mikäli harhamaalilla on rajallinen toiminta-aika, kuten silpulla, soihduilla ja aktiivisilla autonomisilla heitteillä, harhamaali saattaa lakata toimimasta kun ohjus on vielä matkalla kohti maalia. Tällöin ohjus ryhtyy etsimään maalia uudelleen. Uuden maalin lukituksen hidastamiseksi tai sopivassa tilanteessa jopa estämiseksi on tärkeätä, että laivan omasuojajärjestelmä suorittaa myös tutkan etäisyysportin varastamisen (seurantatutkan yhteydessä esite-tyillä RGPO-menetelmillä). Tällöin tutka ei voi tietää miltä suunnalta ja miltä etäisyydeltä sen pitäisi maali löytää ja siltä kuluu enemmän aikaa etsintään. Lisäksi se saattaa lukittua johonkin toiseen heitteeseen. Myös laivan nopeusvektorin muuttaminen on tärkeätä, jotta laiva on uuden etsintäjakson käynnistyessä mahdollisimman kaukana siitä pisteestä, missä sen voisi olettaa olevan päätellen liikevektorista ennen häirinnän alkamista.

Tässä luvussa käytiin läpi taistelukentän omasuojajärjestelmien rakennetta ja toimintaa. Seuraavassa luvussa esitetään digitaalisen taistelukentän viimeinen osakomponentti, johtamisjärjestelmä. Kirjan aihepiirirajauksen vuoksi luvussa käsitellään vain spektrin hyödyntämiseen liittyviä johtamisjärjestelmän osakomponentteja.

PAIKANTAMISJÄRJESTELMÄT

Taistelukentällä voidaan käyttää paikantamiseen inertianavigoinnin (IN) ja korrelaatiopaikannuksen (TERCOM) lisäksi tai niihin yhdistettynä satelliittipaikannusta. Sen etuna on sekä pitkäaikainen tarkkuus että tekniikan edullisuus. Massamaisesti valmistettavat GPS-mikropiirit laskevat satelliittipaikannuksen hintaa niin paljon, että sitä voidaan hyödyntää kaikissa järjestelmissä tietokoneista ja tietoliikennelaitteista ammuksiin. Satelliittinavigoinnin ja –paikannuksen heikkoutena on kuitenkin sen riippuvuus sähkömagneettisesta spektristä, minkä vuoksi se on lamautettavissa elektronisella häirinnällä.

Satelliittipaikannus perustuu kaarimittaukseen ja satelliitin ja paikannusvastaanottimen pseudoetäisyyden laskemiseen. Pseudoetäisyys, eli radiosignaalin etenemisviipeen mukaisesti laskettu näennäinen etäisyys lähettävään satelliittiin, lasketaan lähetteen koodivaiheesta ja signaalin vaiheesta. Pseudoetäisyys yhdestä satelliitista antaa vastaanottimen mahdolliseksi paikaksi pallopinnan, kahdella satelliitilla muodostuu kahden pallopinnan leikkauksena ympyrän kehä, ja kolmella satelliitilla leikkauksena kaksi vaihtoehtoista pistettä avaruudessa. Periaatteessa tämä riittää paikantamiseen, sillä toinen piste on maanpinnalla ja toinen kaukana avaruudessa. Yleensä paikanmääritykseen käytetään kuitenkin neljää satelliittia, millä parannetaan paikannusgeometriaa (ja siten myös tarkkuutta) sekä poistetaan vastaanotinten kellovirheestä johtuva epätarkkuus.

Amerikkalainen GPS (Global Positioning System) on NAVSTAR-satelliitteihin perustuva erittäin laajalle levinnyt satelliittipaikannusjärjestelmä. Järjestelmä koostuu pääasemasta Colorado Springs:ssä, viidestä tarkkailuasemasta, kolmesta lähetinasemasta ja satelliiteista. Satelliittikonstellaation muodostaa 24 satelliittia, joista 21 on kulloinkin aktiivisia loppujen kolmen ollessa varalla. Satelliittien suunnittelullinen elinikä on 15 vuotta ja tehtäväikä vajaan 13 vuotta, minkä vuoksi tällä hetkellä on käytössä jo kolmas satelliittisukupolvi. Satelliittien inkliinaatiokulma on 55 astetta ja lentokorkeus 20.182 kilometriä, mikä antaa kiertoaikaksi 11 h 57 min 57 s ($\frac{1}{2}$ sidereal day). Käytössä on 6 eri rataa, joilla taataan yli 4-5 satelliitin olevan näkyvissä yli 5 asteen kulmassa missä tahansa maapallolla. Satelliittien keilat kattavat maapallon sen pinnalta aina 200 kilometrin korkeuteen saakka.

GPS-järjestelmä perustuu siihen, että vastaanotin laskee etäisyytensä satelliitista saamansa signaalin perusteella mittaamalla signaalin aikaleiman perusteella etäisyytensä satelliittiin. Paikkatiedon virhelähteitä ovat satelliitin ja vastaanottimen kellovirhe (jälkimmäinen voidaan laskea pois kun saadaan yhteys neljään satelliittiin), ilmakehän aiheuttama refraktiovirhe, ionosfääri- ja troposfääri- viive, vastaanottimen kohina ja kanavalla olevat häiriöt sekä monitie-etenemisen aiheuttama virhe.

GPS-signaalin perustaajuus on $f_0=10,23$ MHz, josta muodostetaan kertomalla satelliittien lähetystaajuudet $L1=154 \cdot f_0$ ja $L2=120 \cdot f_0$. $L1$ -taajuudella lähetetään chippinopeudella 1,023 Mbps DS-levitettyä C/A-koodia (Coarse Acquisition) sekä 10,23 Mbps nopeudella levitettyä P(Y)-koodia (Precision code). Taajuudella $L2$ lähetetään vain sotilaskäyttöön tarkoitettua P-koodia. C/A-koodi on ns. gold code -tyyppinen 1 ms pituinen koodi. P-koodi on valesatunnainen koodi, jonka pituus on 1 viikko.

Suorasekvenssijohdotuksessa chippinopeudella 1,023 Mbps levitettävä C/A-koodi leviää 2,046 MHz kaistalle ja vastaavasti P(Y)-koodi 20,46 MHz kaistalle. Levitys laskee lähetteen teho-

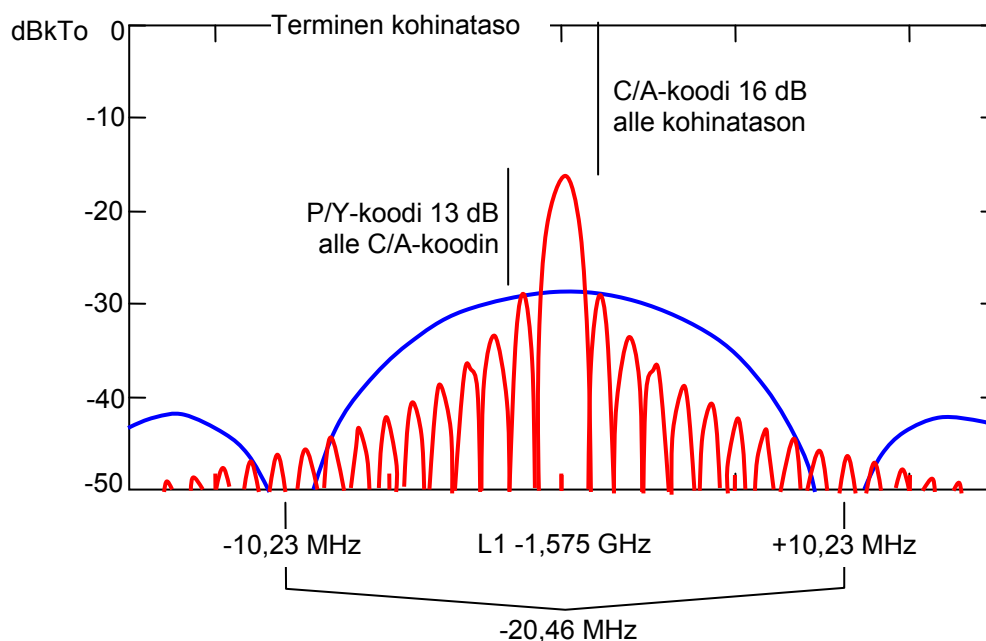
tiheyttä spektrissä niin paljon, että yli 20.000 km satelliitista maanpinnalle edettyään signaalin tehtiheys on laskenut alle termisen kohinatason, mikä tekee signaalista käytännössä erittäin vaikeasti havaittavan.

taajuus	koodi	chippinopeus	datanopeus*	isotrooppinen teho**
L1 1,575 GHz	C/A	1,023 MHz	50 bps	-130 dBm (-160 dBW)
L1 1,575 GHz	P(Y)	10,23 MHz	50 bps	-133 dBm (-163 dBW)
L2 1,227 GHz	P(Y)	10,23 MHz	50 bps	-136 dBm (-166 dBW)
L3 1,381 GHz	C/A	1,023 MHz	5500/11000	

* 50 bps datavirta muodostuu 30 sekunnin mittaisesta 1500 bitin peruskehuksesta.
 ** Taattu signaalin isotrooppinen teho maanpinnalla LOS-olosuhteissa. Teho vaihtelee elevaatiokulman mukaisesti 2 dB rajoissa (eli 0,8 – 1,3 –kertaisesti).

Taulukko 23: GPS-järjestelmän toimintataajuudet ja niiden parametrit. Taajuutta L3 käytetään GPS-satelliittien välisessä kommunikaatiossa.

Vastaanottimen on kyettävä etsimään oikeat satelliitit, eli valittava oikeat C/A- ja sotilasjärjestelmän osalta myös P(Y)-koodit. Tähän hyödynnetään ns. GPS-almanakan antamia tietoja siitä mikä satelliitti missäkin paikassa on milloinkin näkyvissä. Tämän jälkeen vastaanotin etsii C/A-koodista oikean kohdan, eli lukittuu koodiin ja ryhtyy seuraamaan koodin oikeata vaihetta.



Kuva 348: L1-taajuudella lähetettävän C/A-koodin tehtiheys maanpinnalla on noin 16 dB alle termisen pohjakohinan. Vastaavasti P(Y)-koodin tehtiheys on 29 dB alle kohinatason. Tehotasoltaan 6 dB:tä pienemmällä L2-taajuudella lähetetään vain P(Y)-koodia.

Järjestelmällä saavutettava tarkkuus on 10-200 metriä, jota Yhdysvallat voi heikentää SA-signaalilla (selective availability). Tästä käytetään yleisesti nimitystä häirintä (jamming), vaikka kyseessä on itse asiassa jo lähetettäessä signaalin sekoitettava satunnainen virhe, eikä

häirintä siinä mielessä kuin se elektronisessa sodankäynnissä ymmärretään. Heikennys ei vaikuta sotilasvastaanotinten suorituskykyyn, mutta kaupallisten vastaanotinten tarkkuus pienenee 50 - 200 metrin luokkaan. Häirintä voidaan poistaa ottamalla signaali vastaan paikassa jonka sijainti tiedetään tarkalleen. Tällöin häirintä ja virheet satelliittien lentoradoissa voidaan laskea ja tarvittavat korjaustermit voidaan lähettää muille vastaanottimille esimerkiksi yleisradiolähetyksissä. Tällaisella differentiaalisella GPS:llä (DGPS) voidaan päästä 1 – 5 metrin tarkkuuksiin. Jos vielä käytetään signaalien vaihetta hyväksi (interferometrinen GPS), päästään millimetriluokkaa oleviin tarkkuuksiin.

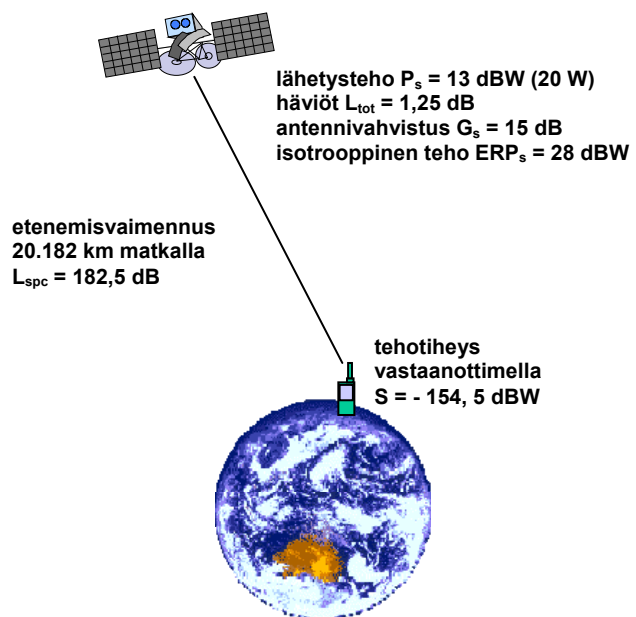
<u>Suorituskyky</u>	<u>P-koodi</u>	<u>C/A-koodi</u>
1. paikka *	37 m	156 m
2. korkeus	34 m	150 m
3. aika	100 ns	337 ns
4. nopeus	0,2 m/s	

* 95% CEP, eli 95% vastaanottimen antamista sijainneista on tämän kokoisen ympyrän kehän sisäpuolella.

Taulukko 24: GPS:n P- ja C/A-koodien laskennallinen suorituskyky.

Signaalin tehotiheydeksi maanpinnalla taataan -130..-136 dBm, mutta todellisuudessa signaali on tätä suurempi. Satelliitin lähetysteho L1-taajuudella on 14,25 dBW, ja jos tästä vähennetään kaapelointi- ja antennihäviöt 1 dB, antennin polarisaatiohäviöt 0,25 dB, ja lisätään satelliitin antennivahvistus 15 dBi, saadaan satelliitin ERP-tehoksi 28 dBW. Etenemisvaimennus 20.180 kilometrin matkalla on vapaassa tilassa (ilman ilmakehän lisävaimennusta) 182,5 dB, joten tehotiheydeksi GPS-vastaanottimella saadaan -154,5 dBW (eli -124,5 dBm). Tämä on 5,5 dB yli taatun minimitason.

GPS on suojattu harhauttamiselta salaamalla P-koodi, mutta järjestelmää ei ole tarkoitettu käytettäväksi häirintäolosuhteissa. Siten sitä ei myöskään ole suojattu häirinnältä. Nykyisin GPS:ää käytetään kuitenkin myös taktisissa järjestelmissä, kuten tässä luvussa samoin kuin *asejärjestelmät* -luvussa jo aiemmin on todettu. Seuraavassa tarkastellaan järjestelmän kykyä kestää elektronista häirintää.



Kuva 349: GPS-järjestelmän tehobudjetti

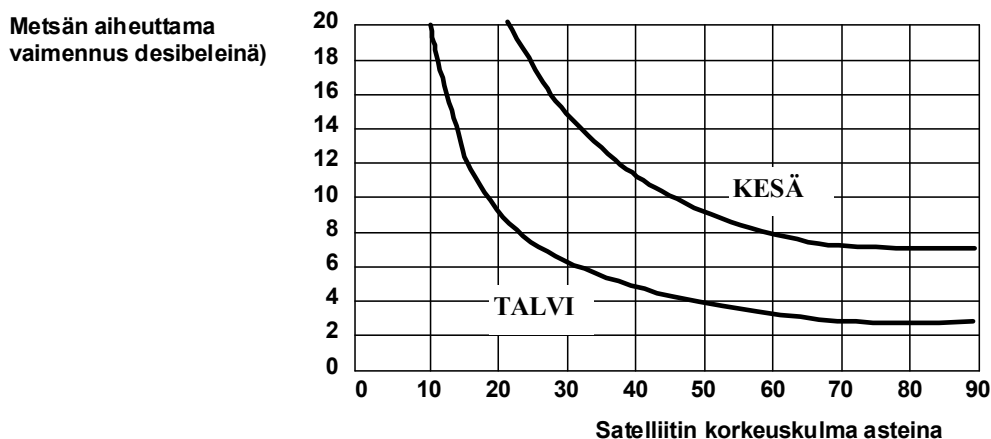
GPS-järjestelmän prosessointivahvistus voidaan laskea seuraavasti: C-koodi on levitetty 1,023 MHz kaistalle. Vastaavasti P-koodi leviää kymmenen kertaa laajemmalle kaistalle. Tällöin C-koodin prosessointivahvistus on

$$G_p := 10 \cdot \log \left(\frac{B_{ss}}{R_b} \right) = 43 \text{ dB.}$$

Prosessointivahvistus edellyttää kuitenkin vastaanottimen olevan lukittunut satelliittiin. Siten lukitusta etsivää vastaanotinta on huomattavasti helpompi (noin 10-kertaiselta etäisyydeltä) häiritä kuin jo lukittunutta. Jos oletetaan, että järjestelmän signaalikohinasuhdevaatimus olisi $SJR_{\min}=8$ dB luokkaa, ja että signaalin tehotaso maanpinnalla olisi $S=-154,5$ dBW niin pienimmäksi satelliittiin lukittuneen vastaanottimen häirintään tarvittavaksi tehottiheydeksi saadaan:

$$J_{\min} = S + G_p - SJR_{\min} \text{ dBW} = -119 \text{ dBW, kun on lukittu koodiin.}$$

Vastaanottimella oleva häirintäsignaali riippuu GPS-häirintäjärjestelmän etäisyydestä R , lähetystehosta P_j ja antennivahvistuksesta G_j . Antennivahvistus puolestaan riippuu häiritävästä tilasta. Jos häirintälähetin pyrkii lamauttamaan esimerkiksi 90-asteen sektorissa olevat GPS-vastaanottimet, sen antennivahvistuksen voidaan olettaa olevan 15 dB luokkaa. Tällöin 8 W häirintäjärjestelmän ERP-tehoksi saadaan 21 dBW. Vapaassa tilassa tämä pienenee arvoon -119 dBW noin sadan kilometrin päässä lähettimestä. Näyttäisi siis siltä, että GPS-vastaanotinta voidaan häiritä sadan kilometrin etäisyydeltä laajassa sektorissa ja suhteellisen vaatimattomalla häirintäteholla.

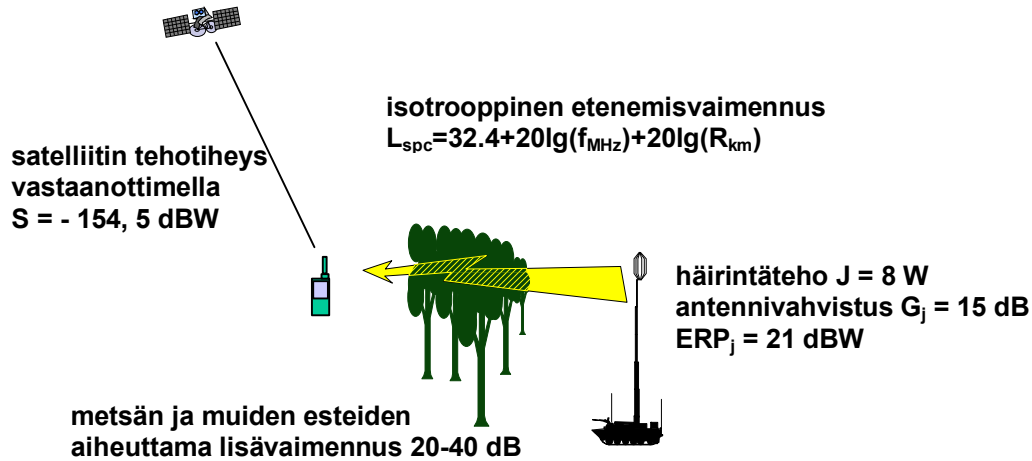


Kuva 350: Esimerkki 10 metrin korkuisen metsän aiheuttamasta lisävaimennuksesta GPS-signaaliin.

Todellisuudessa asia ei kuitenkaan ole aivan näin yksinkertainen, sillä häirintälähtimellä on harvoin näköyhteysreitti vastaanottimeen, ja oikein sijoitettuun vastaanottimeen ei koskaan. Kuvassa 350 on esitetty erään mittauksen tuloksena laskettu 10 metrin korkuisen puuston aiheuttama lisävaimennus GPS-signaaliin satelliitin korkeuskulman funktiona⁵⁵. Häirintäjärjestelmä joutuu toimimaan täysin metsän varjostamana alle 10 asteen korkeuskulmilla, joten häirintäsignaalin vaimennus on 20–30 dB luokkaa, tai jopa ylikin. 30 dB lisävaimennuksella

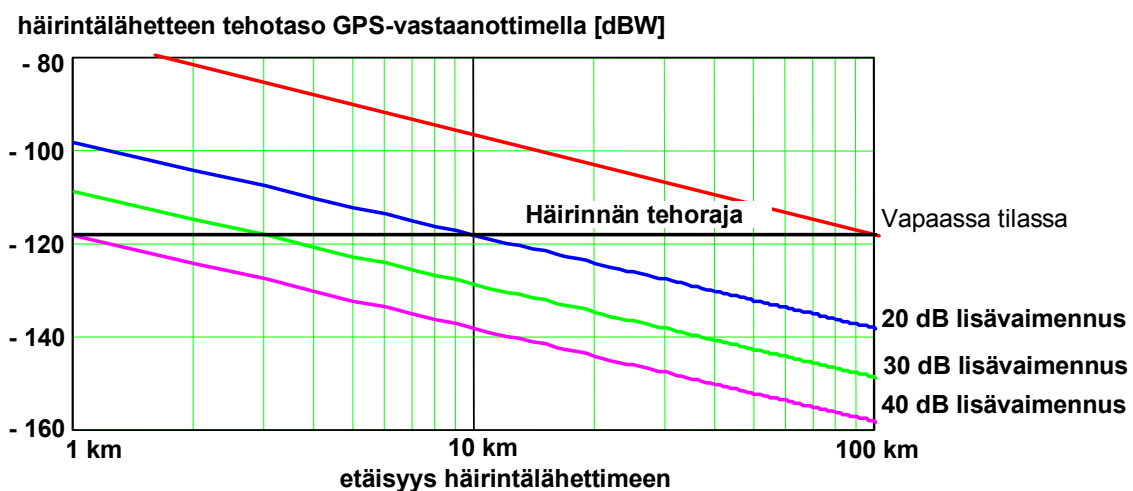
⁵⁵ Kalevi Kalliomaa ja Jari Mannermaa: Tutkimus ja skenaario GPS-navigointijärjestelmän käytettävyydestä Suomen olosuhteissa. MATINEn tutkimuksia 1996. 101 s.

häirintälähtetimen olisi toimittava maksimissaan noin viiden kilometrin etäisyydellä GPS-vastaanottimesta. Jos vastaanotin lisäksi kykenee suuntaamaan antenninsa siten, että antennivahvistus satelliittiin on 10 dB suurempi kuin häirintälähtetimen suuntaan, niin häirintäjärjestelmän kantama putoaa alle kilometriin. Yksinkertaisimmillaan tämän voi tehdä sijoittamalla vastaanottimen antenni peltiämpäriin. Aktiiviryhmäantenneilla häirintämarginaalia voidaan kasvattaa 15 - 20 dB lisää, jolloin häirintälähtetimen tehollinen kantama jäisi aivan liian lyhyeksi.



Kuva 351: Esimerkki maasta suoritettavasta GPS-häirintäskenaariosta.

Esimerkin perusteella vaikuttaisikin siltä, että GPS-häirintä on tehokasta vain joko offensiivisena lähihäirintänä tai defensiivisenä omasuojahäirintänä. Ilmaan, esimerkiksi lennokkiin, sijoitettu GPS-omasuojahäirintälähtetin kykenisi lamauttamaan alapuolellaan olevat vihollisen GPS-vastaanottimet, mutta älykkäästi tehtävällä häirinnällä omista järjestelmissä voitaisiin häirintäsignaali poistaa laskennallisesti. Tällöin vihollisen satelliittinavigointijärjestelmät eivät toimisi, mutta omassa käytössä olevat järjestelmät toimisivat normaalisti. Lähihäirinnan merkitystä vähentää se, että integroitu inertia- ja GPS-navigointi takaa suunnistuksen myös silloin, kun GPS-järjestelmä on häirittynä. Miniatyyrisillä laserhyrrään perustuvilla inertiapaikantimilla voidaan ylläpitää alle 20 metrin tarkkuutta vielä neljä minuuttia GPS-signaalin lakkaamisen jälkeen. Tämä riittää hyvin ammusten ja ohjusten loppulähestymiseen, kun lähellä kohdetta oleva GPS-häirintälähtetin on tukkinut GPS-vastaanottimen.



Kuva 352: Esimerkin 8 W häirintälähtetimen lähtetien teho vastaanottimella.

Yhdysvaltain puolustusministeriö suunnittelee uusien Block II F GPS-satelliittien varustamista antennein, joiden keila olisi kapeampi ja antennivahvistus siten suurempi. Näitä kapeita keiloja on tarkoitus kohdistaa kulloinkin kriittisille alueille häirintäsignaalien ylittämiseksi. Lisäksi lähetystehon nostaminen saattaa tulla kyseeseen. Yhdessä nämä molemmat lisääisivät satelliitin ERP-tehoa. Järjestelmään suunnitellaan myös uuden CS-koodin (Civil Signal) käyttöönottoa L2-taajuudella. CS-koodin käyttö rajattaisiin kriittisiin (amerikkalaisiin) siviili-ilmailujärjestelmiin. Järjestelmän päivitykseen on suunniteltu kuuluvaksi myös uusi 5,115 Mbps sotilaskoodi (M code) L1 ja L2-taajuuksilla sekä 10,23 Mbps I,Q-koodi L5-taajuudella 1176,45 MHz. Block II F -satelliitteja tullaan laukaisemaan 6-12 vuodesta 2005 alkaen.

Osana NAVWAR-kehittämiskokonaisuutta (Navigation Warfare) amerikkalaiset suunnittelevat parantavansa GPS:n häirinnänsieto-ominaisuuksia useita desibeleitä

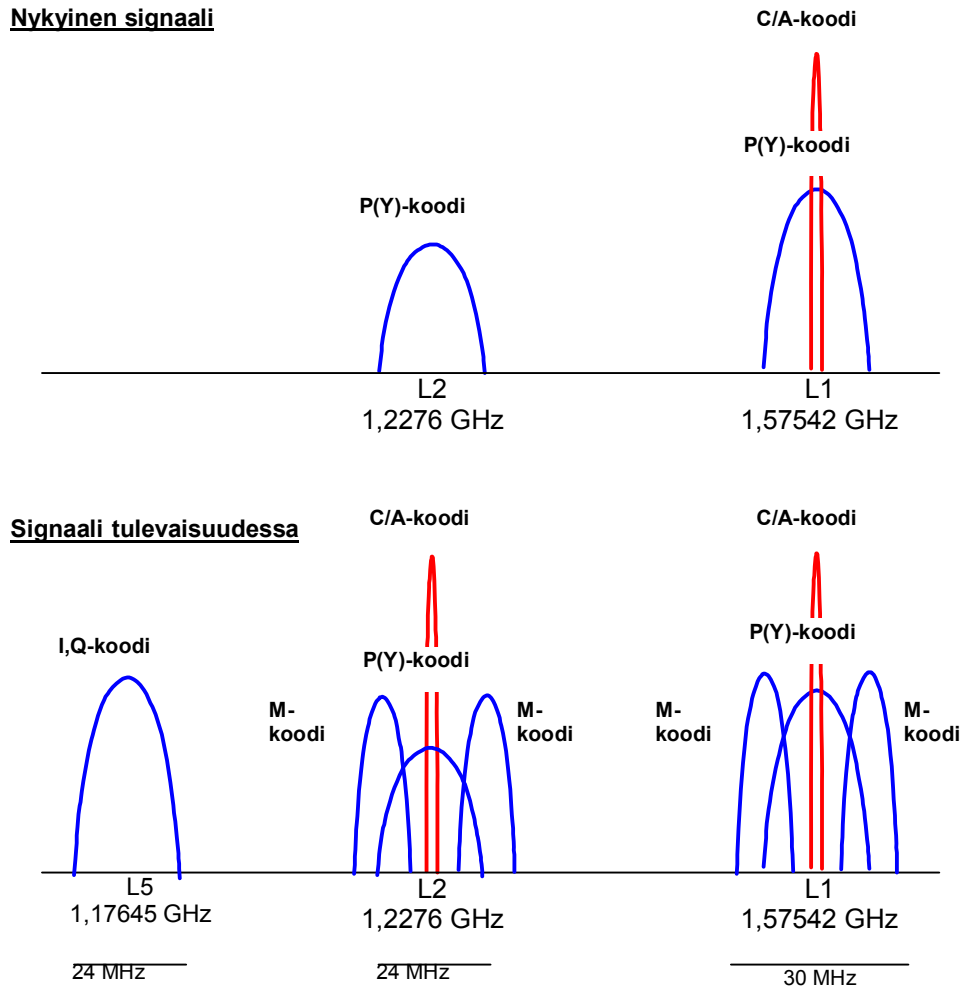
- lisäämällä satelliitin lähetystehoa
- lisäämällä DS-signaalien prosessointivahvistusta
- lisäämällä GPS-vastaanottimen antennivahvistusta (aktiivinen keilanmuodostus)
- vähentämällä vastaanottimen antennivahvistusta häirintäjärjestelmän suuntaan (peittämällä häirintälähetin saavutettavissa noin 20 dB parannus ja aktiivisella antennikeilan nollakohdan suuntaamisella saavutettavissa oleva parannus on yli 30 dB ja joidenkin amerikkalaisten väitteiden mukaan jopa lähes 60 dB)

Käytännössä tämä merkitsisi häirintälähetin pakottamista toimimaan lähempää tai suuremmalla teholla.

Venäläinen Glonass on vastaavanlainen satelliittipaikannusjärjestelmä kuin GPS. Järjestelmä koostuu 24 satelliitista, jota lentävät kolmella ympyrän muotoisella radalla noin 19.100 km korkeudessa (mikä antaa kiertoajaksi 11 tuntia 15 minuuttia) inkliinaatiokulman ollessa 64,8 astetta. Kullakin radalla on siten kahdeksan satelliittia 45 asteen erolla. Satelliittigeometria takaa sen, että kulloinkin näkyvissä on vähintään viisi satelliittia. Vastaanotin seuraa vähintään neljää satelliittia ja mittaa niiden pseudoetäisyyden sekä lähetteen dopplersiirtymän avulla nopeuden ja laskee niistä oman paikkansa, nopeutensa ja aikareferenssinsä.

Järjestelmässä on sekä siviili- (SP, standard precision) että sotilasnavigointisignaalit (HP, high precision). Kaikille avoimen siviilikoodin horisontaalinen paikannustarkkuus on operaattorin mukaan 57 - 70 m (99,7 %) ja vertikaalinen 70 m (99,7 %). Nopeustarkkuus on 0,15 m/s ja aikareferenssin tarkkuus 1 ms. Aivan kuten GPS:n, myös Glonassin paikannustarkkuutta voidaan lisätä differentiaali- ja interferenssimenetelmillä. SP signaali on FDM-multipleksoitu L-kaistan lähete ($L1=1602 \text{ MHz} + n \cdot 0,5625 \text{ MHz}$), jossa kullakin satelliitilla on oma lähetystaajuutensa. Osa satelliiteista lähettää samalla taajuudella, mutta ratakonfiguraatiolla pidetään huoli siitä, että nämä satelliitit eivät näy samaan aikaan samalle vastaanottimelle. Informaatio on BPSK-avainnettua GPS:n tapaan ja bittinopeuskin on sama 50 bps. GLONASS-satelliitin signaalien tasoksi maanpinnalla operaattori lupaa -156...-161 dBW, joten järjestelmä lienee yhtä helposti tai vaikeasti häiritävä kuin GPS:kin⁵⁶.

⁵⁶ David Almdan, Jan Arnsby, Martin Davidson, Erik Maritsi: *Prov med GPS/GLONASS störning mot satellitnavigering. Översiktlig värdering*. FOA användarrapport 12/1998. 55 s.

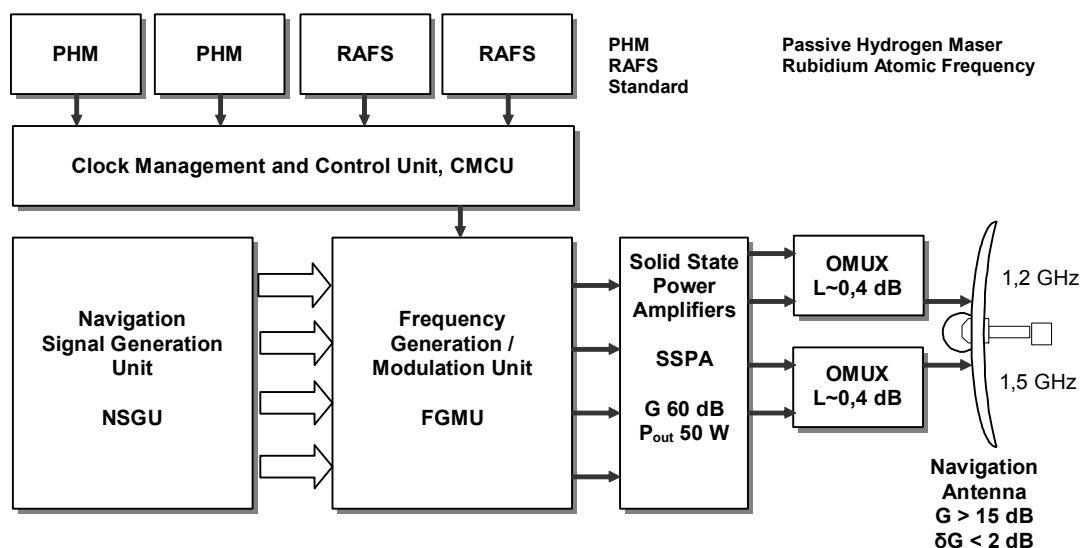


Kuva 353: Yllä nykyinen GPS-signaalirakenne ja alhaalla suunniteltu signaalirakenne.

Järjestelmän maakomponenttiin kuuluu ohjausasema Moskovassa ja useita Venäjän federaation alueella olevia tarkkailuasemia (CTS, Command Tracking Station). Tarkkailuasemat kalibroivat satelliittien radan määräajoin laserilla, mitä varten kaikkiin satelliitteihin on asennettu laserheijastimet.

Glonass-satelliittien kesto-aika on ollut 3 - 5 vuoden luokkaa, joten satelliitin käyttöikä on huomattavasti GPS:ää lyhyempi. Kun tämä seikka yhdistetään Venäjän heikkoon taloudelliseen tilanteeseen, on jouduttu tilanteeseen, jossa operatiivisessa käytössä on vain 7 - 10 satelliittia vuonna 2001 (vuonna 1999 käytössä oli 12 satelliittia) 24 sijasta. Mitä vähemmän vastaanottimella on käytettävissään satelliitteja, sitä helpompaa järjestelmän häirintä on.

Euroopan Unioni on kehittämässä siviilikäyttöön omaa **EGNOS-paikannusjärjestelmää** (European Geostationary Overlay Service), josta käytetään myös nimitystä **Galileo**. Ennen pitkää järjestelmä kehittyi omiin satelliitteihinsa tukeutuvaksi ENSS-järjestelmäksi (European Navigation Satellite System), ja laajenee maailmanlaajuiseksi (GNSS, Global Navigation Satellite System). Satelliittikonstellatio koostuu 30 MEO-satelliitista (27 aktiivista ja kolme varalla) sekä kolmesta ylimääräisestä satelliitista 23.616 km korkeudessa, millä satelliitti kiertää maapallon $1\frac{2}{3}$ kertaa vuorokaudessa. Radan inkliinaatiokulma on 56 astetta.



Kuva 354: ESan ehdotus Galileo-satelliitin (GalileoSat) navigointihyötykuormaksi. Puoli-johdevahvistinten teho on 50 W, multipleksereiden häviöt 0,4 dB ja antennin vahvistus keilan reunoilla 15 dB, mikä antaa EIRP-tehoksi 31,6 dBW, eli 1,44 kW. Antennivahvistuksen vaihtelu keilan alueella on alle 2 dB. [J. Benedicto ea.: ESA's Proposal GalileoSat. Galileo's World Autumn 2000, ISSN1528-2341: 28-37]

Galileon käytettävyyttä digitaalisella taistelukentällä ja lamautettavuutta on vaikeata arvioida ennen kuin järjestelmän kaikki keskeiset tekniset toteutusparametrit on määritelty. Yhteensopivuusvaatimus GPS:n ja GLONASS:n kanssa johtanee samankaltaisiin häirinnäsieto-ominaisuuksiin. Keskeisin ero esimerkiksi Galileon ja GPS:n häiritävyyden välillä lienee se, että Galileon 31,6 watin EIRP-teho on 3,6 dB suurempi kuin GPS:n *nykyinen* lähetysteho. Mahdollisesti hyvinkin käyttökelpoinen ominaisuus on järjestelmän kaksisuuntaisuus. Esimerkiksi pelastusjärjestelmiä varten järjestelmä kykenee vastaanottamaan UHF-alueella toimivan hätälähtetimen signaalin (joka sisältää myös paikan) ja sitten lähettämään hätälähtetimelle vahvistuksen siitä, että se on havaittu ja apua on tulossa.

signaali	kantaalto MHz	teho dBW	tyypilinen C/No dBHz	modulaatio	datanopeus sps
E2-L1-E1	1575,42	-155	50	BOC(2,2)	250
E5a	1176,45	-155	50	QPSK(10)	50
E5b	1207,14	-155	50	QPSK(10)	250
E6	1278,75	-155	50	BPSK(5)	1000

Sps = symbols per second. BOC= Binary Offset Carrier

Taulukko 25: Galileo-järjestelmän signaalit.

Galileo-järjestelmä käyttää taulukossa 25 kuvattuja signaaleja. E5a- ja b sekä E1-L1-E2-signaalit ovat salaamattomia ja vapaasti käytettävissä olevia maksuttomia paikantamissignaaleja (Galileo Open Service). Laajakaistainen E6 sisältää salatut ja mahdollisesti myös maksulliset (Commercial Service ja Public Regulated Service) signaalit.

Galileo-signaalit mahdollistavat myös GPS-järjestelmän L1- ja L2-signaaleja hyödyntävien vastaanotinten kehittämisen siten, että koko analoginen osuus, siis antennit, RF-osat ja signaalin digitointi, voivat olla yhteisiä⁵⁷. Tämä sekä laskee vastaanotinten hintaa että lisää järjestelmän käytettävyyttä.

Satelliittipaikannuksen puutteiden (suhteellisen helppo häirittevyys ja riippuvuus ulkovalloista) vuoksi on tutkittu mahdollisuuksia käyttää myös muita signaaleita kuin erityisesti paikannuskäyttöön tarkoitettuja satelliitteja tai radiomajakoita. Esimerkiksi usean eri pisteestä lähetetyn TV-signaalin erojen mittaamisella voitaisiin päästä noin 30 metrin paikannustarkkuuteen, ja maassa olevien erityisesti paikannuskäyttöön tarkoitettujen tukiasemien avulla tätäkin parempaan suorituskykyyn.

⁵⁷ Bernd Eissfeller et.al. *GPS Modernisation and Galileo*, Galileo's World Autumn 2002. pp 28-33

ANTENNITEKNIikka

Johdanto

Antennilla tarkoitetaan yleisesti sovituskappaletta, joka sovittaa sähkömagneettisen energian aaltoputkesta tai muusta siirtolinjasta vapaantilan säteilyksi. Lähetyksessä antenni vastaanottaa sähkötehoa siirtolinjasta ja säteilee sen ympärillään olevaan avaruuteen. Vastaanotossa antenni sieppaa sieppauspinta-alaansa vastaavan tehon ympäröivästä tehotiheydestä ja johtaa sen siirtolinjan kautta vastaanottimeen.

Tavallisesti antennien ominaisuuksia kuvaillaan lähettämisen kannalta. Antennien resiprookkisisuuden vuoksi antennin säteilykuvio ja muut ominaisuudet ovat samat sekä lähetettäessä että vastaanotettaessa.

Antennien parametrit voidaan jakaa kolmeen pääryhmään:

- **Säteilyominaisuuksia** kuvaavat parametrit: kuten keilanleveys, sivukeila- ja takakeilatasot, suuntaavuus, polarisaatio, energian sieppauspinta-ala (apertuuri), ristipolarisaatiovaimennus sekä sähköinen pituus.
- **Piiriominaisuudet**, joita ovat syöttöimpedanssi, säteilyvastus, hyötysuhde, q-arvo, seisovan aallon suhde, heijastuskerroin ja kaistanleveys.
- **Muut parametrit**, jotka ovat lähinnä fyysisiä ominaisuuksia, kuten: koko, paino, muoto, hinta, kestävyys, materiaali. Mekaanisten mittojen mukaan määräytyy antennin tuulipoikkipinta-ala. Fyysisten ominaisuuksien mukaan määräytyy myös antennin tutkapoikkipinta-ala.

Keilanleveydellä tarkoitetaan säteilykuvion nollakohtien välistä kulmaa. Yleisesti keilanleveyden määrittelyssä käytetään puolentehon eli 3 dB:n pisteitä. Antennin säteilykuvioista saa parhaan käsityksen, mikäli sen keilanleveydet annetaan sekä atsimuuttia että elevaatio- tasossa.

Sivukeilatasolla määritellään säteilykuviossa olevien sivukeilojen tasojen suhde pääkeilaan. Sama pätee myös takakeilatasoon. Mikäli säteilykuviossa on muita saman vahvistuksen omaavia keiloja kuin pääkeila, puhutaan sivumaksimeista.

Antennin suuntaavuus ja vahvistus ilmoittavat sen kyvyn keskittää säteily haluttuun suuntaan. Kaikkialle tasaisesti säteilevää antennia kutsutaan isotrooppiseksi säteilijäksi. Isotrooppisen säteilijän vahvistus on 1 dBi. Puoliaaltodipolin vahvistus on likimäärin 2,1 dBi ja suuren vahvistuksen omaavilla heijastinantenneilla se voi olla jopa 50 dBi.

Antennin sieppauspinta on antennin efektiivinen pinta-ala, jonka avulla lasketaan antennia ympäröivästä olevasta tehotiheydestä antenniin kytkeytyvä teho.

$$P = A_e \cdot S$$

jossa A_e on antennin efektiivinen sieppauspinta ja S antennia ympäröivä tehotiheys.

Antennin vahvistuksen avulla voidaan laskea sieppauspinta-ala:

$$A_e = G \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi}$$

jossa G on antennin vahvistus ja λ on aallonpituus.

Käytettävät antennit valitaan taajuuden ja käyttö-tarkoituksen mukaan. Liikkuvaan käyttöön valitaan yleensä ympärisäteileviä antennia, kuten monopoleja sekä dipoli-antenneja. Mikäli haluttua viestittää ainoastaan yhteen suuntaan, käytetään suuntaavia antennia, esimerkiksi yagi- tai pitkälanka-antenneja. Tutkajärjestelmät tarvitsevat erittäin suuntaavia antennia varsinkin atsimuuttitasossa, joten niissä käytetään erilaisia peili-antenneja ja vaiheohjattuja antenniryhmiä.

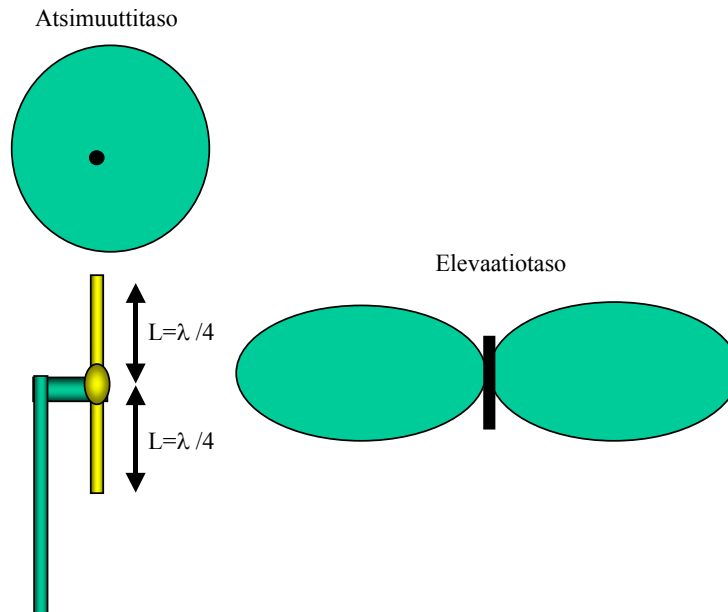
Viesti- ja tutkajärjestelmien ominaisuuksia, kuten taajuus, polarisaatio, lähetys- ja vastaanottotekniikka, kantama, peittoalue sekä elektronisen suojan taso, voidaan arvioida järjestelmien antennien perusteella. Antennin syötön koosta voidaan arvioida käytettävä taajuusalue. Polarisaation näkee yleisesti suoraan antennista, mikäli sitä ei ole piilotettu radomin alle. Lähetys- ja vastaanottotekniikkaa voidaan arvioida säteilijöiden tyypistä, lukumäärästä ja rakenteesta. Seuraavassa käsitellään tyypillisiä sotilasjärjestelmissä käytettäviä antennia ja niiden ominaisuuksia.

Perusantennit

Perusantenneihin kuuluvat mm. dipoli- ja monopoli-antennit sekä niiden erilaiset versiot. Näitä kaikkia yhdistää säteilijän mitoitus, joka on yleensä puolen aallonpituuden mittainen. Sylinteridipoli on kaikkein yksinkertaisin ja käytetyin antenni. Sitä voidaan käyttää ympärisäteilevänä, mutta myös suuntaavana. Tällöin useasta sylinteridipolista muodostetaan vaiheohjattu antenniryhmä.

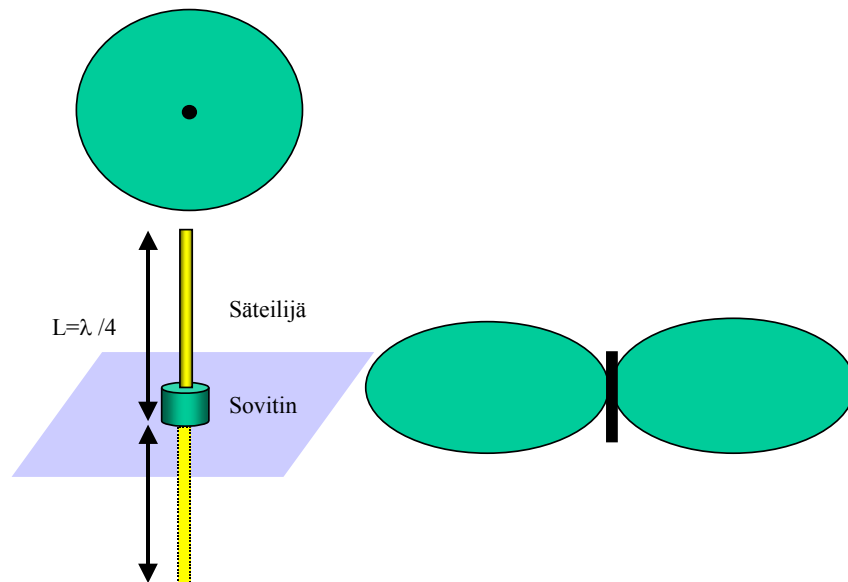
Dipoli-antenneja käytetään HF-, VHF- ja UHF-taajuuksilla. Sitä ylemmillä taajuuksilla ilmakehän ja ilmakehän vaimennukset eivät mahdollista tavallisen dipoli-antennin käyttöä, sillä sen vahvistus on liian pieni. Kaikkein yksinkertaisin dipoli-antenni on kuparilangasta tehty puolenaallon mittainen säteilijä. Lankadipoleita käytetään yleisesti HF-taajuuksilla. Niiden ongelmana on kapeakaistaisuus, mitä voidaan parantaa paksuntamalla dipolia tehollisesti useammilla sylinterin tai kartion muotoon asennettavilla langoilla. Dipolin tehollinen kaistanleveys on noin 10 – 15 % keskitaajuudesta ilman erillistä pakkosovitusta. Puoliaalto-dipolin vahvistus on 2,1 dBi ja kokoaalto-dipolin 3,8 dBi.





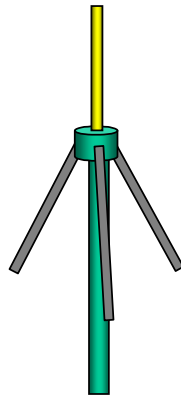
Kuva L1.1: Puoliaaltodipoli koostuu kahdesta neljännesaallon mittaisesta elementistä, joista toinen kytketään lähettimeen ja toinen maapotentiaaliin. Kaikkien dipoliantennien säteilykuvio on lähes ympärisäteilevä atsimuuttitasossa ja kahdeksikko elevaatiotasossa.

Monopoliantenni on dipoliantennin yksinkertaistettu versio, joka tarvitsee erillisen maatason toimiakseen. Säteilevä elementti muodostaa maatason kanssa peilikuvan, jolloin monopoli toimii periaatteessa dipoliantennina. Monopoliantenneja käytetään normaalisti liikkuvissa alustoissa. Neljännesaallon pituisen monopoliantennin vahvistus on noin 1,5 dBi.



Kuva L1.2: Monopoliantenni koostuu yhdestä fyysisestä maatasoon kiinnitetystä elementistä. Mikäli maataso on antennin aallonpituuteen nähden riittävän suuri, peilautuu sen alapuolelle elementti, jolloin monopoli toimii dipoliantennin tavoin.

Todellisesta monopoli-antennista kehitetty versio on antenni, jossa on keinotekoinen maataso.

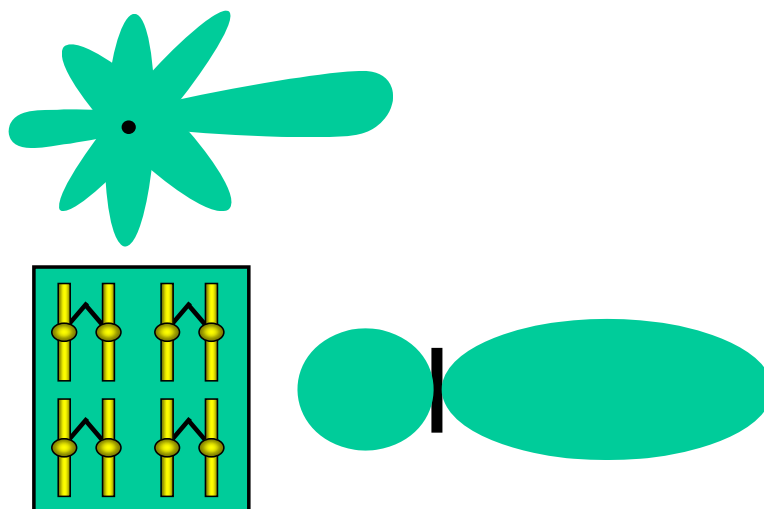


Kuva L1.3: Johtamispaikoilla käytettävä keinotekoisella maatasolla varustettu monopoli-antenni.

Periaatteellinen toiminta on aivan sama monopoli-antennin kanssa, mutta maataso on korvattu keinotekoisella referenssillä. Esimerkiksi kuvassa 4 oleva kolmella maatasolla oleva antenni on hyvä esimerkki tällaisesta antennista.

Heijastinantennit

Heijastinantenneilla tarkoitetaan erillisen syötön ja heijastimen yhdistelmää. Heijastinantenneja käytetään yleisesti sovelluksissa, joissa tarvitaan suurta vahvistusta ja kapeaa keilaleveyttä. Yleisin heijastinantenni on viestiliikenne- ja tutkasovelluksissa käytettävä paraboloidiheijastin. Paraboloidiantenni koostuu yhdestä tai useammasta syöttöelementistä, jotka on sovitettu halutulle taajuusalueelle sekä pyörähdysparaboloidin tai parabolisen sylinterin muotoisesta heijastimesta.

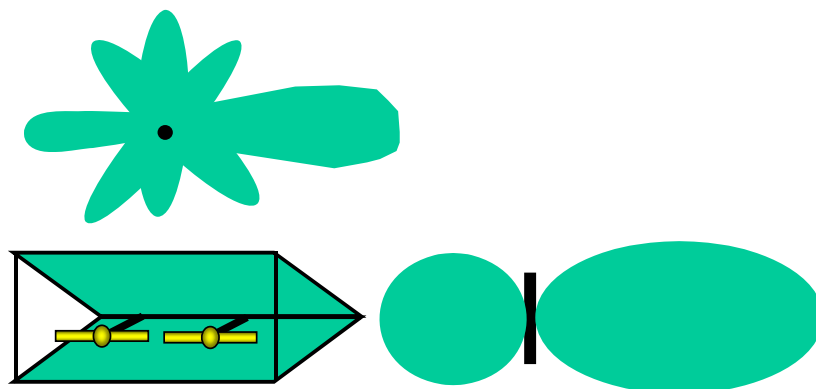


Kuva L1.4: Tasoheijastimen pääkeilan leveys muodostuu pääasiassa syöttöelementtien lukumäärän mukaan tason toimiessa lähinnä suuntaajana.

Heijastinantenneissa tyypillisesti käytettäviä heijastinmuotoja ovat: tasoheijastin, kulmaheijastin ja parabolinen sylinteriheijastin tai sen eri versiot. Tasoheijastimen vahvistus muodostuu yleensä syöttöelementtien lukumäärän perusteella, sillä tasoheijastin toimii lähinnä suuntaajana. Tästä hyvä esimerkki on kahdeksalla puoliaaltodipolilla muodostettu YVII-kenttätelejärjestelmän antenniryhmä. Tasoheijastimien vahvistus vaihtelee 5 – 15 dBi välillä. Vahvistusta voidaan nostaa lisäämällä syöttöelementtien määrää. Syöttöelementit määrittelevät tasoheijastinantennin polarisaation ja taajuuskaistan.

Heijastin voi olla yhtenäinen metallipinta tai se voi koostua erillisistä sauvoista tai metalliverkosta. Heijastimen elementtien tulee olla lähempänä toisiaan kuin 1:16 aallonpituudesta.

Kulmaheijastimella saatava vahvistus on noin 8 – 12 dBi ja sivukeilatase sama kuin tasoheijastimella. Erona tasoheijastimeen on tarvittavien syöttöelementtien lukumäärä. Esimerkiksi YVII-kenttätelejärjestelmän kahdella dipolilla varustetun kulmaheijastin-antennin vahvistus on 11 dBi. Kulmaheijastimen heijastimet ovat yleensä 90 asteen kulmassa toisiinsa nähden. Pienempien kulmien käyttäminen ei juurikaan lisää vahvistusta, mutta kylläkin materiaalitarvetta. Kulmaheijastinantennin rakenteessa pätevät samat säännöt kuin tasoheijastimessakin. Sekä kulma- että tasoheijastinantenneja käytetään VHF- ja UHF-taajuuksilla.



Kuva L1.5: Kahdella puoliaaltodipolilla varustettu kulmaheijastinantenni

Paraboloidi- ja peiliheijastinantenneja käytetään yleisesti S-kaistalla ja sitä ylemmillä taajuuksilla. Peiliantennien vahvistuksien ja keilanleveyksien approksimoimiseen on olemassa erilaisia kaavoja, joiden toimivuus riippuu antennin muodosta ja käytettävästä valaisufunktiosta. Paraboloidiantennin approksimoitu vahvistus on

$$G = \frac{36000}{\theta_{3\text{dB}} \cdot \phi_{3\text{dB}} \cdot L_n},$$

jossa $\theta_{3\text{dB}}$ ja $\phi_{3\text{dB}}$ ovat antennin puolentehon keilanleveydet asteissa ja L_n antennin keilanmuotovakio, joka kertoo kuinka paljon signaalin tehosta on pääkeilan ulkopuolella. Keilanmuotovakio pienentää tutka-antennin vahvistusta yleensä noin 1 – 2 dB. Paraboloidiantennin atsimuutti- ja elevaatiotason keilanleveydet voidaan approksimoida kaavoilla:

$$\theta_{3\text{dB}} = \frac{l \cdot \lambda}{d} \quad \text{ja}$$

$$\phi_{3\text{dB}} = \frac{l \cdot \lambda}{D},$$

jossa d on paraboloidiantennin elevaatiotason halkaisija, D on atsimuuttitason halkaisija ja I valaisufunktion määrittelemä vakio. Valaisufunktion arvo vaihtelee 65 ja 70 asteen välillä approksimoitavan antennin muodon ja keilanmuodostuksen mukaan.

Pienet aukkosäteilijät

Pienillä aukkosäteilijöillä käsitetään ainoastaan muutamien aallonpituuksien mittaisia rako-säteilijöitä. Hyviä esimerkkejä näistä ovat rakoantenni ja kulkuaaltoputken pää. Edellä mainittujen suuntaavuus ja vahvistus on likimain sama luokkaa dipoliantennin kanssa. Aukkosäteilijästä paranneltu versio on torviantenni, jossa säteilijän aukon pää on levitetty suuntaavuuden ja vahvistuksen lisäämiseksi.

Rakoantennina voi toimia esimerkiksi metallilevyyn tehty kapea rako, joka on säteiltävän taajuuden puolenaallon pituinen. Käytännön tilanteissa esimerkiksi ajoneuvojen tai sähkömagneettiselta säteilyltä suojattujen tilojen seinissä ja ovissa olevat pienet aukot toimivat rako-säteilijöinä heikentäen suojatilan vaimennusta.

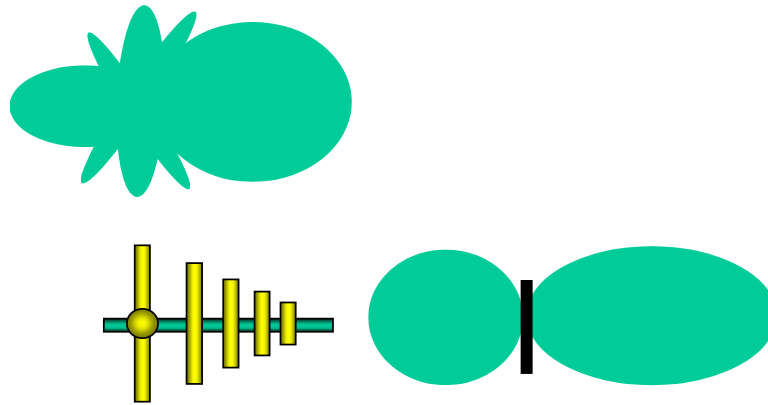
Myös tavallinen suorakulmaisen aaltoputken pää toimii rako-säteilijänä. Sen taajuusominaisuudet määrittyvät siirtojohdossa kulkevan aaltomuodon sähkökentän ja magneettikentän sivujen suhteessa. Aaltoputkesta muodostettua antennia ei käytetä yksinään kovinkaan usein, mutta sen käyttö paraboloidisten antennien syöttönä on yleistä.

Torviantennit

Torviantenni on aaltoputkesta paranneltu versio, jossa päätä on levitetty sopivassa suhteessa aaltoputken mittojen ja katkootaajuuksien suhteen. Aaltoputken pään levittäminen estää etenevän tehon heijastumisen takaisin, jolloin suuntaavuus ja vahvistus paranevat. Torviantenneja on erimuotoisia, joista kaikkein yleisin on suorakulmainen. Torviantennilla saavutetaan 15 – 25 dBi vahvistus, jonka suuruus määräytyy levityksen suhteesta. Torviantenneja käytetään tavallisesti viestiliikenteen runkoverkkojen muodostamiseen.

Laajakaista-antennit

Laajakaista-antenneina käsitetään antennit, joiden taajuuskaista on enemmän kuin yksittäisen elementin taajuusvaste. Yleisin laajakaista-antenni on logaritmisperiodinen ryhmädipoli-antenni eli LPD-antenni, joita käytetään yleisesti viestisignaalien kuuntelemiseen ja sieppaamiseen. LPD-antenni koostuu kolmesta tai useammasta eripituisesta dipolista, joista pisin määrittelee antennin alarajataajuuden puolenaallon dipolin mukaisesti ja lyhin vastavasti ylärajataajuuden. LPD-antennin puolen tehon keilan leveys on noin 120 astetta ja vahvistus noin 8 - 10 dBi. Logaritmisperiodisten antennin heikkoutena on suuri fyysinen koko verrattuna antennista saatavaan vahvistukseen. Toisaalta VHF- ja UHF-taajuuksilla on muutoin lähes mahdoton rakentaa laajakaistaisia antenneja, joiden vahvistus olisi suurempi. LPD-antennia voidaan käyttää aina 2 GHz:n asti, jonka jälkeen heijastinantenneilla saavutetaan paremmat antennitekniset ominaisuudet helpommin.

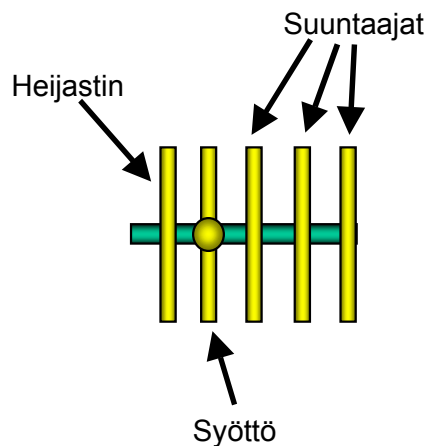


Kuva L1.6: LPD-antennin säteilykuvio on hieman suuntaava. LPD-antennien ongelmana on niiden suuri fyysinen koko.

Lineaarisen LPD-antennin spiraalinen versio toimii laajakaistaisena helix-antennina. Sen ominaisuudet ovat muuten samat lineaarisen antennin kanssa, mutta polarisaatio on joko vasen- tai oikeakätinen ympyräpolarisaatio.

Samaan kategoriaan tavallisen LPD-antennin kanssa kuuluu yagi-antenni, jossa kaikki dipoli-elementit ovat samanpituisia. Ensimmäinen elementti on heijastin ja toinen elementti toimii syöttönä. Muut elementit ovat ainoastaan passiivisia suuntaajia. Yagi-antennilla saavutetaan oikeanlaisella mitoituksella helposti 10 - 18 dBi vahvistus. Yagi-antennin vahvistus riippuu heijastinten määrästä. Vahvistukseen vaikuttaa lisäksi heijastinten sijainti ja etäisyys.

Yagi-antennin taajuuden määrittää syöttönä toimivan elementin mitoitus. Yagi-antennin on tehnyt suosituksi sen yksinkertaisuus ja halpuus sekä sen hyvät antennitekniset ominaisuudet kuten suuntaavuus, vahvistus sekä sivu- ja takakeilasuhteet. Yagi-antennia voidaan käyttää korkeillekin taajuuksille, mikäli antennilta ei vaadita erinomaista suuntaavuutta ja vahvistusta.



Kuva L1.7: Yagi-antennissa on yksi heijastin ja säteilijä mutta useita suuntaajia. Suuntaajien lukumäärä vaikuttaa antennin vahvistukseen. Tyypillisen yagi-antennin vahvistus on noin 13 - 15 dBi.

Antenniryhmät

Antenniryhmät koostuvat kahdesta tai useammasta elementistä, jotka on vaiheistettu niin, että ne muodostavat yhtenäisen kokonaisuuden. Antenniryhmän muodostaminen saattaa perustua moniin syihin, kuten suuremman vahvistuksen, paremman sivukeilatason tai säteilykuvion

minimin muodostamiseen. Antenniryhmässä olevat elementit voivat olla yksinkertaisia perusantenneja, joita vaiheistamalla ja syöttämällä oikeanlaisilla amplitudeilla, saavutetaan haluttu säteilykuvio. Esimerkiksi antenniryhmän säteilykuvion maksimia tai minimiä voidaan kääntää haluttuun suuntaan antennielementtien oikeanlaisella vaiheensierrolla ilman antennin mekaanista kääntämistä. Moderneimmista antenneista myös polarisaatiota voidaan vaihtaa elektronisesti.

Vaiheohjattujen antennien avulla tutkan keilaa voidaan siirtää huomattavasti nopeammin kuin käytettäessä mekaanista pyyhkäisyä, jossa antennin hitausmomentti rajoittaa liikenopeuden muutoksia. Tyypilliset pyyhkäisyajat vaiheohjatuilla antenneilla vaihtelevat suurteho-järjestelmien 5-15 mikrosekunnista PIN-diodien 50 nanosekunnin luokkaa oleviin aikoihin. Keilan nopea siirtäminen mahdollistaa mielenkiintoisten kohteiden pidemmän valaisun, tai tärkeiden maalien tietojen tiheän päivittämisen samaan aikaan kun tutka valvoo edelleen koko avaruutta.

Vaiheohjatuilla antenneilla voidaan muodostaa useita toisistaan lähes riippumattomia keiloja, joilla useita maaleja voidaan seurata samanaikaisesti. Tarvittaessa haluttuihin suuntiin voidaan muodostaa vahvistuskuvion nollakohtia esimerkiksi välkkeen tai häirintälähtetimen vaikutuksen minimoimiseksi. Tekniikalla voidaan lisäksi toteuttaa elektroninen keilan stabilointi ilman mekaanisia komponentteja, mikä on tärkeää pienikokoisissa järjestelmissä ja järjestelmissä, jotka ovat alttiita suurille kiihtyvyysovoimille.

Kaupalliseen tietoliikennetekniikkaan kehitetyt huokeat GaAs-lähetin ja vastaanotin-komponentit ovat mahdollistaneet entistä laajemman vaiheohjattujen antennien käytön myös sotilasjärjestelmissä. Useiden pienitehoisten lähetinten integroiminen samalle antennille mahdollistaa suuren kokonaistehon. Esimerkiksi 64 x 64 GaAs-elementin matriisin, jossa elementtien keskimääräinen teho on 5 W ja huipputeho 20 W, voidaan olettaa antavan keskimäärin yli 20 kW tehon huipputehon ollessa 82 kW.

Elektronisesti vaiheohjattavan antenniryhmän vahvuuksia ovat:

- Säteilykuvion minimin ohjattavuus häirintälähteiden suuntaan
- Lähes valonnopeudella tapahtuva keilanheitto
- Keilanlevyden muuttaminen olosuhteiden mukaisesti
- Antennivahvistuksen adaptiivisuus
- Keilan suuntatarkkuus
- Säteilykuvion sivukeila- ja takakeilataso
- Antennin koko varsinkin ylemmillä taajuuksilla

Vaiheohjatun antenniryhmän heikkouksia ovat:

- Teknologian kompleksisuus
- Komponenttien hinta

Apertuuriantennien sivukeilatasoja voidaan pienentää valitsemalla sopiva apertuurin valaisufunktio.

Neliskulmainen apertuuri

valaisufunktio	3dB keilanleveys	1. sivukeila	1. nollakohta
vakio	$0,89 \cdot \lambda/d$	- 13,3 dB	$1 \cdot \lambda/d$
cos	1,19	- 23,1	1,5
cos ²	1,44	- 31,5	2,0
Taylor	1,07	- 25,0	

Pyöreä apertuuri

valaisufunktio	3dB keilanleveys	1. sivukeila	1. nollakohta
vakio	$1,02 \cdot \lambda/d$	- 17,6 dB	$1,22 \cdot \lambda/d$
$1-R^2$	1,27	- 24,6	1,63
$(1-R^2)^2$	1,47	- 30,6	2,03
Taylor	1,31	- 40,0	

Edellä esitettyjä valaisufunktiota (spatiaalinen dimensio) voidaan käyttää myös ikkunafunktiona signaalin näytteenotosta ja prosessoinnista johtuvien aikataason sivukeilojen pienentämiseen (temporaalinen dimensio).

HAVAITSEMISTODENNÄKÖISYYDEN LASKEMINEN

Signaalin *havaitseminen* (finding) edellyttää ensiksi sen *sieppaamista* (interception) ja toiseksi sen *ilmaisua* (detection)⁵⁸. Siten signaalin havaitsemistodennäköisyys P voidaan laskea, kun tiedetään sieppaamistodennäköisyys P_oI (Probability of intercept) ja ilmaisutodennäköisyys P_d (Probability of Detection):

$$P := P_oI \cdot P_d \quad (L2.1)$$

Sieppaus on tapahtuma, jossa tiedusteluvastaanottimen ilmaisimelle saadaan signaali tiedusteltavasta lähettimestä. Ilmaisua on prosessi, jossa päätellään, onko vastaanottimen ilmaisimella oleva signaali radiolähete vai kohinaa. Tässä liitteessä käsitellään aluksi sieppausta ja sitten ilmaisua matemaattisesti.

SIEPPAUSIKKUNA

Sieppaustodennäköisyyttä voidaan arvioida ikkunafunktioilla, joissa etsintäparametreja kuvataan aikaikkunoina. Ikkuna vastaa aikaa, jona tietyllä parametrilla on oikea arvo. Sieppausikkuna on se ajanhetki, jonka aikana kaikilla sieppaamiseen tarvittavilla parametreilla on oikea arvo.

⁵⁸ Nimitykset havaitseminen, sieppaus ja ilmaisu eivät ole vakiintuneet selkeiksi, minkä vuoksi eri lähteet käyttävät niitä eri merkityksissä. Tässä kirjassa nämä termit on kuitenkin määritelty seuraavasti:

LPI (Low Probability of Intercept) tarkoittaa signaalia tai järjestelmää, jonka signaali on vaikeasti siepattavissa, esimerkiksi hyppivätaajuiset signaalit sekä purskelähteet.

Sieppaus (Intercept) on tapahtuma, jossa kohdejärjestelmän lähettämä tai heijastama signaalienergia saadaan tiedustelujärjestelmän vastaanottimen ilmaisimelle.

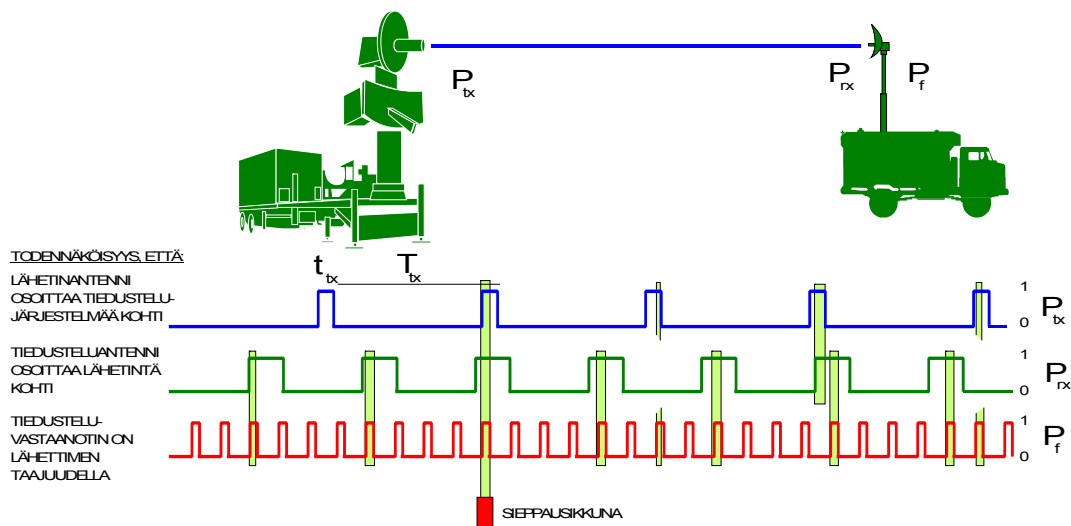
Sieppausikkuna (Intercept Window) on ajanhetki jona sieppaus tapahtuu. Sieppaus edellyttää, että lähetin lähettää tiedusteluvastaanottimen suuntaan hetkellä jona tiedusteluvastaanotin vastaanottaa lähetteen taajuuskaistalla signaalienergiaa lähettimen suunnasta.

LPD (Low Probability of Detection) tarkoittaa signaalia tai järjestelmää, jonka signaali on sieppauksen jälkeen vaikeasti ilmaistavissa, esimerkiksi FM/CW- ja hajaspektrilähteet.

Ilmaisu (Detection) tarkoittaa elektronisessa tiedustelussa lähetteen olemassaolon toteamista.

LPE (Low Probability of Exploitation) tarkoittaa signaalia tai järjestelmää, jonka signaali on ilmaisun jälkeen vaikeasti hyödynnettävissä (suunnittavissa, purettavissa, analysoitavissa tai tunnistettavissa), esimerkiksi nopeasti parametreja vaihtavat tutkat ja digitaaliset salatut viestisignaalit.

Signaalin hyödyntäminen (Exploitation) tarkoittaa signaalin ominaisuuksien tunnistamista, signaalin ja mahdollisuuksien mukaan signaalilähteen luokittelua ja yksilöintiä yms. johtopäätösten tekemistä signaalin ominaisuuksien perusteella. Signaalin analysointi edellyttää signaalin sieppaamista ja ilmaisua ja se vaatii ilmaisua suuremman signaalikohinasuhteen.



Kuva L2.1: Sieppausikkuna on se ajanhetki, jonka aikana lähetin osoittaa tiedustelu-järjestelmän suuntaan ja tiedusteluvastaanottimen antenni lähetintä kohti ja jonka aikana signaali on tiedusteluvastaanottimen valvoman taajuuskaistan sisäpuolella.

Jos lähetin keilaa tasaisesti koko valvonta- tai lähetyssektoria Ω_{tx} , saadaan todennäköisyys, että lähetinantenni osoittaa tiedustelujärjestelmää kohti lähetinantennin keilanleveyden θ_{tx} suhteesta lähetyssysteemin kattamaan sektoriin:

$$P_{tx} = \frac{\theta_{tx}}{\Omega_{tx}} = \frac{t_{tx}}{T_{tx}} \quad (L2.2)$$

jossa t_{tx} on aika, jonka lähetin osoittaa tiedustelujärjestelmää kohti ja T_{tx} on lähetyssektorin kokonaiskeilausaika. Jos tiedustelujärjestelmä keilaa tasaisesti koko valvonta sektoriansa Ω_{tx} , saadaan vastaavasti todennäköisyys, että tiedusteluantenni osoittaa lähetintä kohti kaavasta:

$$P_{rx} = \frac{\theta_{rx}}{\Omega_{rx}} = \frac{t_{rx}}{T_{rx}} \quad (L2.3)$$

jossa θ_{rx} on tiedusteluantennin keilan leveys ja t_{rx} on aika, jonka vastaanotin osoittaa lähetintä kohti ja T_{rx} on tiedustelusektorin kokonaiskeilausaika. Todennäköisyys, että tiedustelujärjestelmä on samalla taajuudella lähettimen kanssa riippuu tiedusteluvastaanottimen hetkellisen kaistanleveyden B_{RF} suhteesta koko tiedusteltavaan kaistaan.

$$B_{SS} \cdot P_f = \frac{B_{RF}}{B_{SS}} = \frac{t_{RF}}{T_{RF}} \quad (L2.4)$$

jossa t_{RF} on aika, jonka vastaanotin on lähettimen taajuudella ja T_{RF} on tiedusteluvastaanottimen koko B_{SS} kaistan valvomiseen käyttämä aika. Sieppausodennäköisyydeksi, eli todennäköisyydeksi, että näillä kaikilla parametreilla on sama arvo saadaan:

$$PoI := P_f P_{tx} P_{rx} \quad (L2.5)$$

On mahdollista, että sieppausikkuna aukeaa niin lyhyeksi ajaksi, ettei sitä kyetä käyttämään hyväksi. Tämä on otettava huomioon kokonaissieppaustodennäköisyyttä arvioitaessa. Jos pienintä hyödynnettävissä oleva sieppausikkunaa merkitään symbolilla Δt , saadaan keskimääräisen sieppausajan osuudeksi kokonaistarkasteluajasta kahden ikkunan tapauksessa⁵⁹:

$$f_{1,2} := \frac{t_{tx} t_{rx} - \Delta t^2}{T_{tx} T_{rx}} \quad (L2.6)$$

Mikäli ikkunafunktioita on enemmän kuin kaksi, matemaattinen arviointi monimutkaistuu. Tätä kaavaa voidaan kuitenkin hyödyntää esimerkiksi silloin, kun tiedustelujärjestelmä kykenee tarkkailemaan samaan aikaan koko valvottavaa sektoria tai tiedusteltavaa taajuus- aluetta tai silloin kun lähetin on ympärisäteilevä.

Yksinkertaisin arvio sieppaustodennäköisyydestä voidaan kuitenkin muodostaa tilastoaritmetiikan keinoin. Jos oletetaan, että sieppausikkunan suhde kokonaistarkastelu-aikaan on:

$$f := \frac{t_{tx} t_{rx} t_{RF}}{T_{tx} T_{rx} T_{RF}} \quad (L2.7)$$

Tällöin tilastollinen sieppaustodennäköisyys on [Wiley 85: 53]:

$$P(t) := 1 - (1 - f) \cdot e^{-\frac{t}{T_o}} \quad (L2.8)$$

jossa T_o on sieppausaikojen keskimääräinen väli, joka saadaan kaavasta:

$$T_o := \frac{\prod_{j=1}^N \frac{T_j}{t_j}}{\sum_{j=1}^N \frac{1}{t_j}} \quad \text{jossa } N \text{ on osaikkunafunktioiden määrä.} \quad (L2.9)$$

Vastaavasti keskimääräinen sieppausikkunan koko saadaan kaavasta:

$$t_o := \frac{1}{\sum_{j=1}^N \frac{1}{t_j}} \quad (L2.10)$$

Tällöin sieppausikkunan keskimääräinen suhde kokonaistarkastelu-aikaan on:

⁵⁹ Richard G. Wiley: *Electronic Intelligence: the Interception of Radar Signals*. ISBN 0-89006-138-6. Artech House 1985. 284 s.

$$f := \frac{t_o}{T_o} = \prod_{j=1}^N \frac{t_j}{T_j} \quad (\text{L2.11})$$

Esimerkki 1:

Tiedusteluvastaanottimella pyritään löytämään tutkajärjestelmä. Tiedusteluvastaanotin keilaa 90 asteen sektorin 10 sekunnissa ja sen keilan leveys on 5 astetta. Tutkajärjestelmä keilaa vaakatasossa ympyräsektorin 3 asteen keilalla nopeudella 10 rpm. Tiedustelujärjestelmä ei tiedä tutkajärjestelmän taajuutta, joten se joutuu valvomaan 2 GHz kaistaa. Järjestelmän hetkellinen kaistanleveys on 20 MHz. Lähetin pyyhkii 2 GHz kaistan 1 sekunnissa.

Lähetinantennille saadaan: $T_1 := \frac{60}{10}$ ja $t_1 := \frac{3}{360} \cdot T_1$

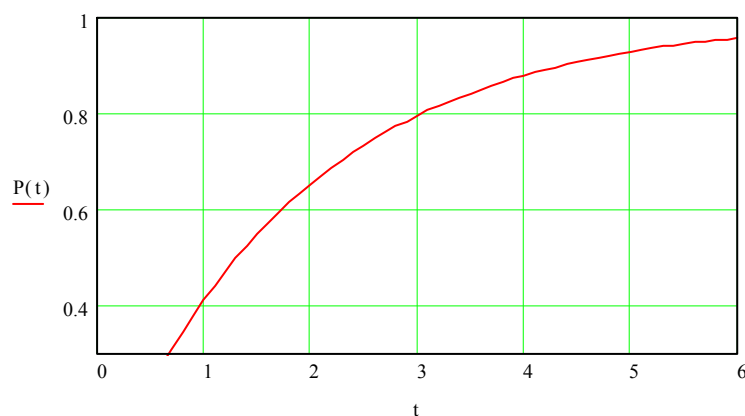
Vastaanotinantennille: $T_2 := 10$ ja $t_2 := \frac{5}{360} \cdot T_2$

Vastaanotin pysyy yhdellä taajuudella $\frac{20 \cdot 10^6}{2 \cdot 10^9}$ sekuntia, ja koska yksi näistä taajuuksis-

ta on sama kuin lähettimen käyttämä, saadaan: $t_3 := \frac{20 \cdot 10^6}{2 \cdot 10^9}$

Kokonaispyyhkäisy aika on $T_3 := 1$

Sieppausikkunan keskimääräinen jakso T_o on tunti 63 minuuttia, ja kesto t_o on 7,9 ms. Tämän mukaisesti 50 % todennäköisyydellä signaali saadaan siepattua reilun tunnin kuluessa tiedustelun aloittamisesta. Kaavan L2.7 perusteella sieppaustodennäköisyys muotoutuu kuvan L2.2 mukaiseksi:

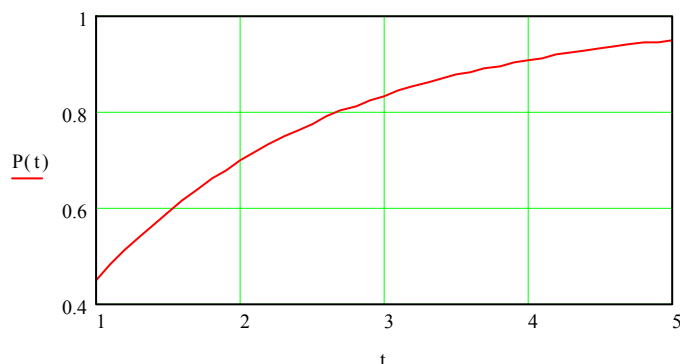


Kuva L2.2: Tutkasignaalin sieppaustodennäköisyys ajan (kuvassa t tunteina) funktiona.

Mikäli tiedustelujärjestelmä kykenee valvomaan koko 90 asteen sektoria samanaikaisesti ($P_{rx}=1$), kasvaa havaitsemistodennäköisyys olennaisesti. Tällöin:

$$T_1 := \frac{10}{60} \text{ ja } t_1 := \frac{3}{360} \quad T_2 := 1 \text{ ja } t_2 := \frac{20 \cdot 10^6}{2 \cdot 10^9} \quad N = 2$$

Sieppausikkunan jakso T_0 on 100 s ja kesto t_0 on 8,3 ms, joten 50% todennäköisyydellä lähete saadaan siepattua ajassa 1 min 40 s.

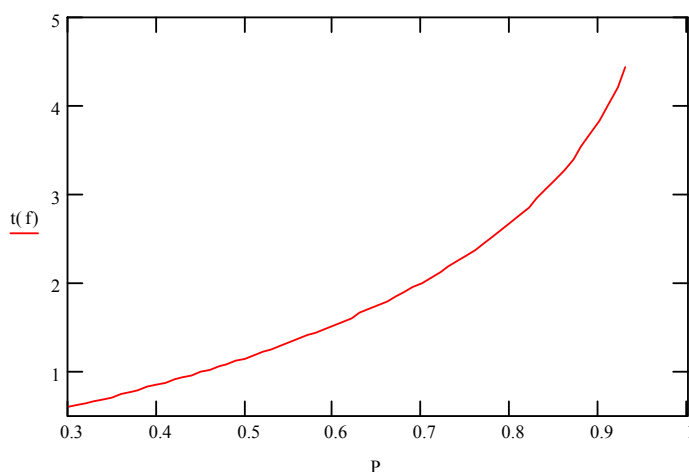


Kuva L2.3: Sieppausodennäköisyys, kun tiedusteluvastaanotin valvoo koko 90 asteen sektoria samanaikaisesti. Aika t on ilmaistu minuutteina.

Aika, joka vaaditaan tietyn sieppausodennäköisyyden P saavuttamiseksi keskimääräisen sieppausajan f funktiona saadaan kaavasta:

$$t(f) := (-\ln(1 - P) + \ln(1 - f)) \cdot T_0 \quad (\text{L2.12})$$

Kuvassa L2.4 on esitetty edellisen esimerkin mukaisesti sieppaamiseen tarvittava aika järjestelmältä edellytetyn sieppausodennäköisyyden funktiona.



Kuva L2.4: Lähetteen sieppaamiseen vaadittava aika $t(P)$ järjestelmältä vaadittavan sieppausodennäköisyyden P funktiona. Aika on esitetty minuutteina.

Kaavasta L.2.12 on huomattava, että jos pienin osaikkuna on hyvin pieni, se määrää käytännössä keskimääräisen sieppausajan. Käytännössä tämä parametri on useimmiten tiedusteluvastaanottimen pyyhkäisynopeudesta riippuva aika, jonka vastaanotin viettää yhdellä taajuudella.

HYPPIVÄTAAJUISEN LÄHETTEEN SIEPPAAMINEN

Lähetteen sieppaaminen edellyttää sitä, että lähete on tiedustelujärjestelmän vastaanottimen valvoman kaistan sisäpuolella. Taajuushypintäjärjestelmillä pyritään vaihtelevaan signaalin hetkittäistä keskitaajuutta siten, ettei tiedustelu- tai valvontajärjestelmä voi tuntea lähetteen taajuutta etukäteen. Taajuushypintälähetteen sieppaamiseksi tiedustelujärjestelmän on laajennettava valvomaansa taajuusaluetta hypintäkaistaa vastaavaksi. Mikäli tiedustelujärjestelmä kasvattaa hetkittäistä kaistaansa, kasvaa vastaanottimeen tuleva kohinateho samassa suhteessa ($N \propto B$). Vastaanottimen pohjakohinan tason nousu merkitsee tiedusteluvastaanottimen herkkyyden vähenemistä. Yhtenä taajuushypinnän tarkoituksena onkin pakottaa tiedustelu- ja häirintäjärjestelmät toimimaan laajakaistaisemmin, jolloin niiden toimintakyky heikkenee. Vaihtoehtona tiedusteluvastaanottimen taajuuskaistan levittämiselle voidaan käyttää taajuuspyyhkäisyä, jossa kapeakaistaisen vastaanottimen valvoma taajuusaluetta pyyhkäistään yli koko lähetteen hypintäkaistan.

Jos lähetteen hypintäkaista on B_{SS} ja lähetteen hetkellinen kaistan leveys on B_{CH} , on lähettimellä käytettävissä N taajuutta:

$$N := \frac{B_{SS}}{B_{ch}} \quad (L2.13)$$

Tällöin todennäköisyys sille, että vastaanotin sattuu olemaan lähettimen taajuudella on:

$$P_f := \frac{1}{N} \quad (L2.14)$$

Vastaavasti tämän komplementti, eli todennäköisyys sille, ettei tiedusteluvastaanotin ole lähettimen taajuudella on:

$$Q_f := 1 - P_f = \frac{N-1}{N} \quad (L2.15)$$

Todennäköisyys sille, että n pulssista kyetään sieppaamaan ainakin yksi on:

$$P_1 := 1 - Q_f^n \quad (L2.16)$$

Todennäköisyys sille, että tasan k pulssia R :stä kyetään sieppaamaan on:

$$P := \frac{R!}{k! \cdot (R-k)!} \cdot P_f^k \cdot (1 - P_f)^{R-k} \quad (L2.17)$$

Vastaavasti todennäköisyys sille, että vähintään k pulssia saadaan siepattua R :stä on:

$$P_{\min.k} := \sum_{j=k}^{\infty} \frac{R!}{j! \cdot (R-j)!} \cdot P_f^j \cdot (1 - P_f)^{R-j} \quad (L2.18)$$

Edellä oleva kaava edellyttää suurten lukujen kertomien laskemista, mikä on laskennallisesti työläs operaatio. Rekursion avulla laskentaa voidaan yksinkertaistaa. Kaava L2.18 saadaan rekursion avulla muotoon:

$$P(k,r) := \begin{cases} 1 & \text{jos } k=0 \\ 1 - (1 - P_0)^r & \text{jos } k=1 \\ \prod_{j=r-(k-2)}^r j & \\ P(k-1,r) - \frac{j=r-(k-2)}{(k-1)!} \cdot P_0^{k-1} \cdot (1 - P_0)^{r-(k-1)} & \text{muutoin} \end{cases} \quad (\text{L2.19})$$

Esimerkki 2:

Hyppivätaajuisten VHF-kenttäradioiden lähete pyritään sieppaamaan pyyhkäisevällä supervastaanottimella. Lähete on 30 – 88 MHz kaistalla ja sen kanavaväli on 25 kHz. Hyppintänopeus on $f_{\text{hop}} = 300$ hyppyä sekunnissa.

30 ja 88 MHz välillä on $\frac{(88 - 30) \cdot 10^6}{25 \cdot 10^3} = 2320$ kanavaa.

Jos tiedusteluvastaanotin pyyhkäisee taajuusaluetta samalla nopeudella kuin lähete hyppii, niin todennäköisyys hetkellinen sieppaustodennäköisyys on:

$$P_f := \frac{1}{N} = 4,31 \cdot 10^{-4}$$

Voidaan kuitenkin olettaa, että tiedusteluvastaanotin pyyhkäisee nopeasti yli lähetteen taajuuskaistan, jolloin se kykenee tarkastamaan useita eri kanavia sinä aikana, jona lähete pysyy samalla taajuudella. Mikäli tiedusteluvastaanottimen pyyhkäisy nopeus on $f_{\text{elint}} = 0,5$ GHz /s, se viipyy yhdellä lähetystaajuudella (radiokanavalla) ajan t_{elint} , joka saadaan kaavasta:

$$t_{\text{elint}} := \frac{B_{\text{ch}}}{f_{\text{elint}}} = 50 \mu\text{s}$$

Tiedusteluvastaanotin kykenee tarkistamaan c kanavaa lähetteen pysyessä samalla taajuudella:

$$c := \frac{T_{\text{hop}}}{t_{\text{elint}}}$$

Hetkellinen sieppaustodennäköisyys nousee siten arvoon:

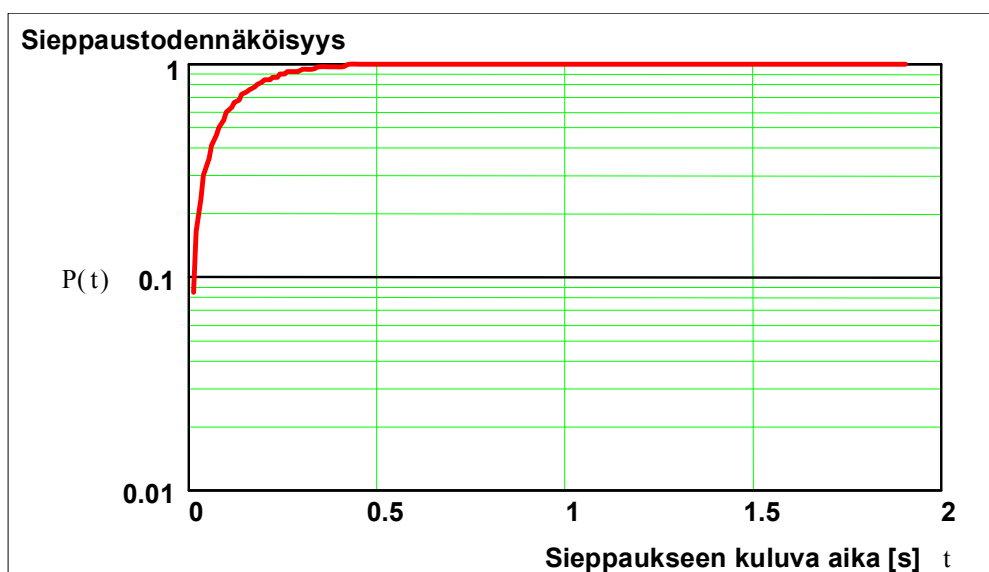
$$P_f := \frac{c}{N} = 0,029$$

Lähetin hyppii n kanavalle t sekunnin aikana, missä $n := f_{\text{hop}} \cdot t$, joten todennäköisyys sille, että t sekunnin kuluessa kyetään sieppaamaan ainakin yksi hyppyjakso, on:

$$P_1(t) := 1 - Q_f^{f_{\text{hop}} \cdot t}$$

Viiden sekunnin aikana lähetin ehtii hyppiä $n = 5 \cdot 300 = 1500$ kanavalle, joten todennäköisyys, että vastaanotin kykenee sieppaamaan ainakin yhden pulssin, on:

$$P_1(t) := 1 - Q_f^n = 1$$



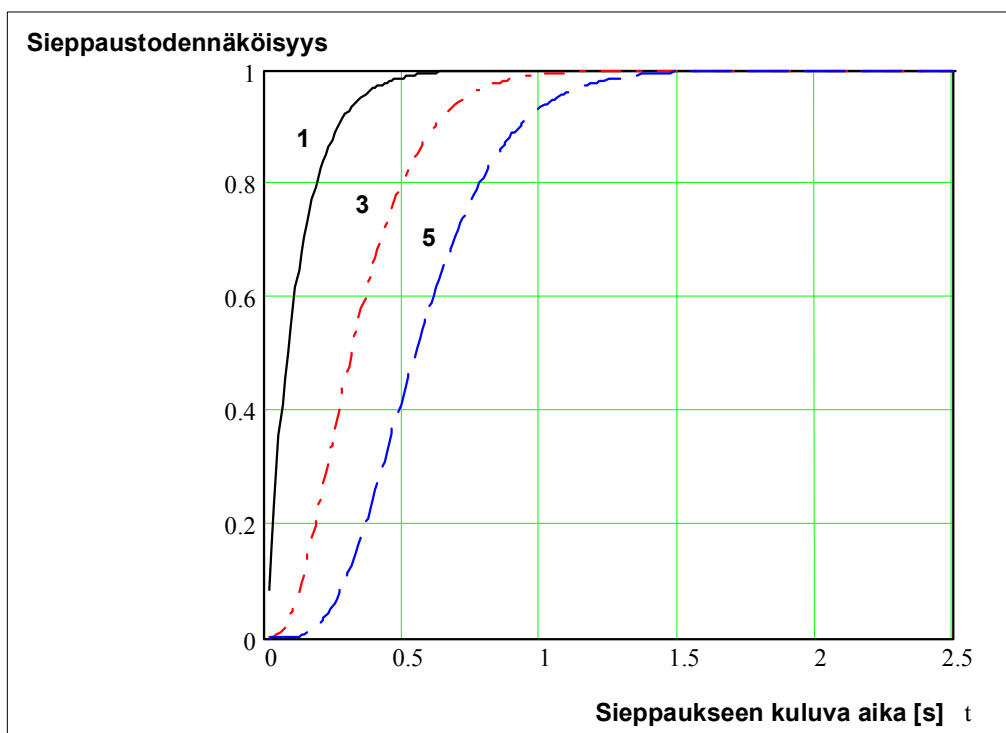
Kuva L2.5: Signaalin sieppaustodennäköisyys ajan funktiona.

Jos hakuvastaanottimessa vaaditaan vähintään k pulssin sieppaamista ennen ilmaisun hyväksymistä, saadaan todennäköisyydeksi sille, että vähintään k pulssia r :stä:

$$P(k,r) := \begin{cases} 1 & \text{if } k=0 \\ 1 - (1 - P_0)^r & \text{if } k=1 \\ \prod_{j=r-(k-2)}^r P(k-1,r) - \frac{j}{(k-1)!} \cdot P_0^{k-1} \cdot (1 - P_0)^{r-(k-1)} & \text{muutoin} \end{cases}$$

Tiedusteluvastaanottimen sieppaustodennäköisyyttä voidaan lisätä kasvattamalla pyyhkäisy-nopeutta, jolloin vastaanotin kykenee tarkistamaan useampia kanavia samassa ajassa ja hetkellinen sieppaustodennäköisyys nousee. Samalla kuitenkin vastaanottimen hetkellinen kaistanleveys kasvaa, sillä

$$B_{\text{IF}} := \sqrt{f_{\text{elint}}} \quad (\text{L2.20})$$



Kuva L2.6: Sieppaustodennäköisyys ajan funktiona eri vaadituilla pulssi- eli havaintomäärillä.

Tämän mukaisesti pyyhkäisy nopeuden nostaminen kymmenkertaiseksi lisää vastaanottimen kohinatasoa kolminkertaiseksi. Tiedustelujärjestelmän suunnittelussa on kyettävä löytämään oikea arvo tälle sieppaus- ja ilmaisutodennäköisyyksiin vastakkaisuuntaisesti vaikuttavalle parametrille. Joissakin pyyhkäisevissä järjestelmissä käytetään useita eri pyyhkäisy nopeuksia ja kaistanleveyksiä erilaisiin tilanteisiin.

ILMAISU

Siepatun signaalin ilmaisu perustuu siihen, että vastaanottimen ilmaisimella olevan hetkellisen signaalitason tai jonkin aikaa integroidun signaalienergian perusteella päätellään, onko kyseessä signaali vaiko taustakohinaa. Päätös tehdään vastaanottimeen asetetun (mahdollisesti tilanteen mukaan muuttuvan) kynnyksiarvon perusteella. Tätä kynnyksiarvoa kutsutaan analogiseksi ilmaisukynnykseksi. Mitä matalampi analoginen ilmaisukynnys on, sitä todennäköisemmin ilmaisimelle tuleva signaali kyetään havaitsemaan. Toisaalta kynnyksen madaltaminen nostaa kohinan vuoksi tapahtuvien väärien ilmaisujen määrää. Näiden vähentämiseksi vastaanottimeen voidaan lisätä digitaalinen laskuri, johon on saatava riittävän monta perättäistä signaalia, jotta lopullinen päätös signaalin havaitsemisesta tietyllä kanavalla voidaan tehdä. Esimerkiksi taajuusalueessa pyyhkivä vastaanotin voi edellyttää, että tietyllä taajuudella ilmaisukynnys on ylittynyt neljällä perättäisellä pyyhkäisyllä ennen kuin vastaanotin ilmoittaa havainneensa signaalin. Vaikka kohinataso nousisi useastikin analogisen ilmaisukynnyksen yläpuolelle, on hyvin epätodennäköistä, että se ylittäisi kaikkina neljänä perättäisenä kertana kynnyksiarvon. Seuraavassa tarkastellaan analogisen ja

digitaalisen kynnysarvon vaikutusta ilmaisutodennäköisyyteen eri tekijöiden, kuten signaali-kohinasuhteen, pyyhkäisy nopeuden ja väärin havaintojen väliajan, suhteen.

Jos päätös signaalin havaitsemisesta tehdään M perättäisen näytteen, esimerkiksi M pyyhkäisyä yli kaistan tai M perättäistä lähetyspulssia, perusteella, saadaan M näytteen ilmaisutodennäköisyys $P_{d,M}$ yksittäisen näytteen ilmaisutodennäköisyydestä $P_{d,1}$ kaavalla:

$$P_{d,M} := P_{d,1}^M \quad (\text{L2.21})$$

Suuretta $P_{d,1}$ sanotaan myös analogiseksi ilmaisutodennäköisyydeksi ja järjestelmän ilmaisutodennäköisyyttä kuvaavaa suuretta $P_{d,M}$ digitaalisesti ilmaisutodennäköisyydeksi. Yleensä kuitenkin tunnetaan järjestelmältä vaadittu ilmaisutodennäköisyys $P_{d,M}$ – esimerkiksi 99% – ja halutaan tietää, mikä on vaadittu yksittäisen pulssin ilmaisutodennäköisyys. Tämä saadaan kaavasta:

$$P_{d,1} := P_{d,M}^{\frac{1}{M}} \quad (\text{L2.22})$$

Kuvassa L.2.5 on esitetty järjestelmältä vaadittava analoginen ilmaisutodennäköisyys $P_{d,1}$ näytemäärän M funktiona. Yhden pulssin ilmaisutodennäköisyys riippuu järjestelmän sietämistä yksittäisten pulssien väärin ilmaisujen todennäköisyydestä $P_{fa,1}$ sekä signaalikohinasuhteesta:

$$P_{d,1} := 1 - e^{-\text{SNR}} \cdot (1 - P_{fa,1}) \quad (\text{L2.23})$$

Yksittäisen pulssin tai pyyhkäisy väärä ilmaisu ei ole merkittävä ongelma, sillä järjestelmän edellytetään odottavan M yksittäistä ilmaisua ennen kuin se päättää signaalin löytyneen. Järjestelmän kannalta merkittävä on M väärän pulssin perusteella tehty väärä ilmaisutodennäköisyys $P_{fa,M}$, joka yleensä on annettu toiminnallisena vaatimuksena. Tällöin yksittäisen pulssin väärän ilmaisun todennäköisyydeksi saadaan:

$$P_{fa,1} := P_{fa,M}^{\frac{1}{M}} \quad (\text{L2.24})$$

Mikäli järjestelmä kykenee käsittelemään väriä hälytyksiä tahtia FAR (False Alarm Rate), saadaan väärin hälytysten todennäköisyys kaavasta

$$P_{fa,M} := \frac{\text{FAR}}{B_{IF}}, \text{ missä } B_{IF} \text{ on tiedusteluvastaanottimen kohinakaistanleveys} \quad (\text{L2.25})$$

Yhdistämällä kaavat (L2.22 ja L2.23) saadaan:

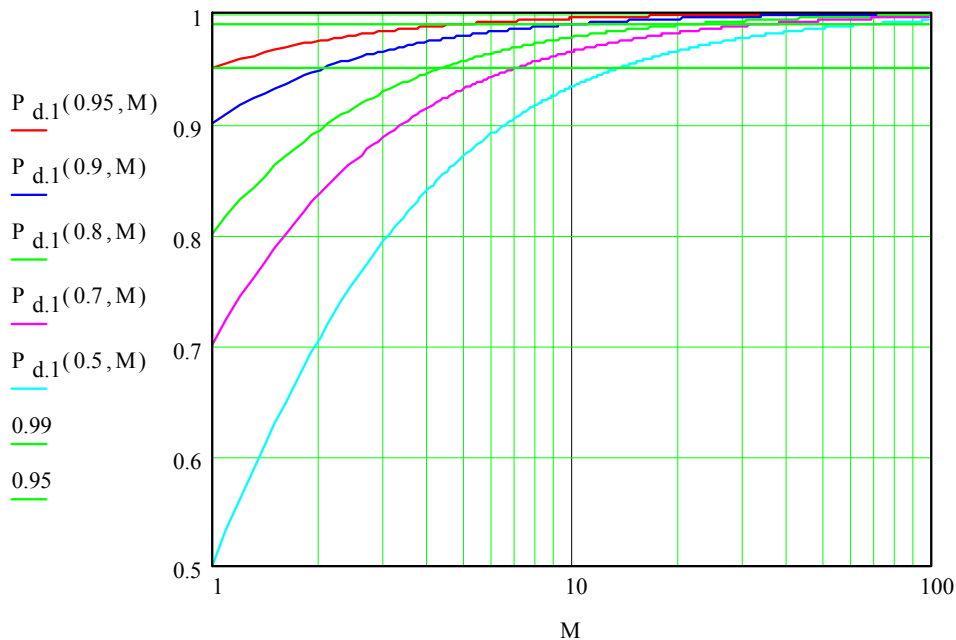
$$P_{d,M}^{\frac{1}{M}} = 1 - e^{-\text{SNR}} \cdot (1 - P_{fa,1})$$

Ja yhdistämällä tähän kaavat (L2.24 ja L2.25) saadaan:

$$P_{d,M}^{\frac{1}{M}} = 1 - e^{-\text{SNR}} \cdot \left[1 - \left(\frac{\text{FAR}}{B} \right)^{\frac{1}{M}} \right]$$

Tämä voidaan ratkaista signaalikohinasuhteen suhteen, jolloin saadaan vaadittava signaalikohinasuhde ilmaisutodennäköisyyden ja värien hälytysten funktiona, kun tiedetään digitaalinen ilmaisukynnys ja kaistanleveys:

$$\text{SNR} := -\ln \left[\frac{1 - P_{d,M}^{\frac{1}{M}}}{1 - \left(\frac{\text{FAR}}{B} \right)^{\frac{1}{M}}} \right] \quad (\text{L2.26})$$

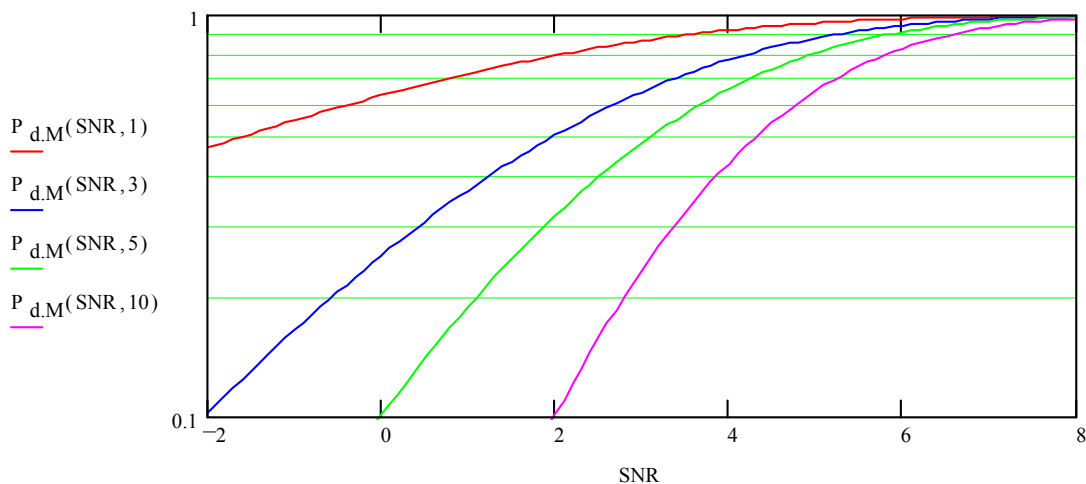


Kuva L2.6: Järjestelmältä vaadittava yhden pulssin ilmaisutodennäköisyys $P_{d,1}$ näytemäärän funktiona, kun järjestelmältä vaadittu lopullinen ilmaisutodennäköisyys on 95%, 90%, 80%, 70% ja 50%.

Mikäli halutaan arvioida tiedustelujärjestelmän havaitsemistodennäköisyyttä muiden parametrien funktiona, voidaan em. yhtälö ratkaista $P_{d,M}$:n suhteen:

$$P_{d,M} := \left[1 - e^{-\text{SNR}} \cdot \left[1 - \left(\frac{\text{FAR}}{B} \right)^{\frac{1}{M}} \right] \right]^M \quad (\text{L2.27})$$

Kuvasta L2.6 käy ilmi ilmaisutodennäköisyys signaalikohinasuhteen SNR funktiona, kun digitaalinen ilmaisukynnys on 1, 3, 5 ja 10 pulssia.

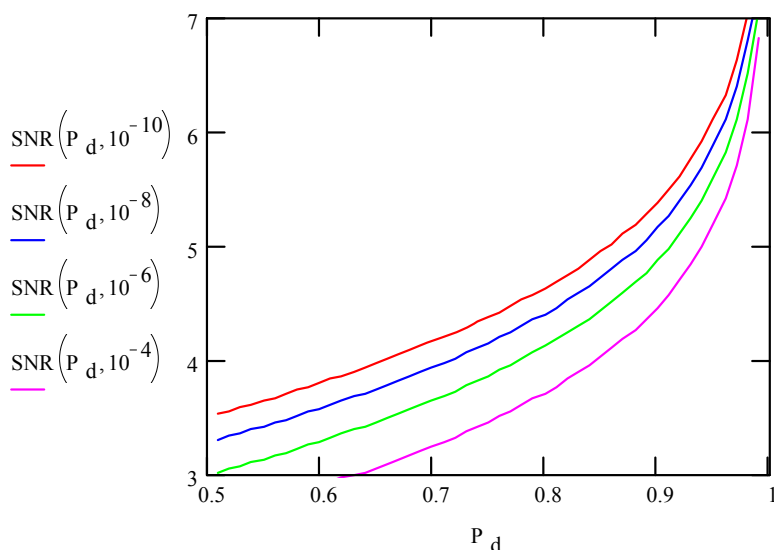


Kuva L2.8: Lopullinen havaitsemisen todennäköisyys signaalikohinasuhteen (desibeleinä) funktiona eri digitaalisen kynnyksen arvoilla, kun analogisen ilmaisun virhetodennäköisyys on $P_{fa,1}=10^{-6}$.

Kun pulssimäärä kasvaa hyvin suureksi, saadaan vaadittavaksi signaalikohinasuhteeksi Hospitalin säännön (derivoimalla kaavan L2.25 ylä- ja alaosat, kun $M \delta \equiv$) perusteella:

$$\text{SNR} := \ln \left(\frac{\ln(P_{fa})}{\ln(P_d)} \right) \quad (\text{L2.28})$$

Käytännössä tätä kaavaa voidaan käyttää approksimaationa kuvaamaan järjestelmältä vaadittavaa signaalikohinasuhdetta jo muutamilla (10) pulseilla. Kuvassa L2.7 on esitetty vaadittava signaalikohinasuhde hyvin suurella digitaalisella ilmaisukynnyksellä vaaditun havaitsemistodennäköisyyden P_d funktiona eri P_{fa} :n arvoilla.



Kuva L2.9: Järjestelmältä edellytetty signaalikohinasuhde SNR havaitsemistodennäköisyyden P_d funktiona, kun P_{fa} on 10^{-10} , 10^{-8} , 10^{-6} ja 10^{-4} .

Esimerkki 3:

Tiedustelujärjestelmän halutaan ilmaisevan 99 % todennäköisyydellä sieppaamansa lähetteen, josta sieppausikkunan aikana saadaan useita näytteitä. Vastaanottimen pyyhkäisy nopeus on 500 MHz/s ja sen edellytetään saavan signaalista vähintään kolme näytettä ennen kuin se ilmaisee löytäneensä lähetteen. Järjestelmä on puoli-automattinen ja kykenee käsittelemään yhden väärän ilmaisun minuutissa.

Lähtötiedoista saadaan: $P_{d,M} := 0.99$, $FAR := \frac{1}{60}$, $M := 3$ ja $B := \sqrt{500 \cdot 10^6}$

$$\text{Vaadittava signaalikohinasuhde on } SNR := -\ln \left[\frac{1 - P_{d,M}^{\frac{1}{M}}}{1 - \left[\left(\frac{FAR}{B} \right)^{\frac{1}{M}} \right]} \right] = 5,7 = 7,6 \text{ dB.}$$

Käytännössä kohinakaistan leveys riippuu vastaanottimen kaistanpäästösuodatinten tyypistä ja ominaisuuksista ja on aina leveämpi kuin pyyhkäisy nopeuden neliöjuuri. Kuitenkin edellä mainittu approksimaatio antaa riittävän käsityksen kohinakaistan ja pyyhkäisy nopeuden suhteesta.

Esimerkki 4:

Tiedustelujärjestelmällä pyritään löytämään kenttäradiolähetteitä. Päätös lähetteen löytymisestä tehdään yhden pyyhkäisy perusteella, mikäli tutkittavan kanavan signaalitaso ylittää kynnsarvon. Tämän jälkeen järjestelmä ryhtyy kuuntelemaan radiokanavan liikennettä ja operaattorin on tehtävä 10 sekunnissa päätös siitä, ryhdytäänkö kanavalla olevaa liikennettä kuuntelemaan, vai jatketaanko hakua. Hakujärjestelmä pyritään sijoittamaan niin, että siihen saataisiin vähintään 5 dB signaalikohinasuhde.

Lähtötiedoista saadaan $SNR := 3.2$ (= 5 dB), $M := 1$, $FAR := \frac{10}{60}$, kenttäradion kanavaväli on 25 kHz, ja koska kyseessä on kenttäradioliikenteen tiedusteluun tarkoitettu järjestelmä, voidaan olettaa, että tämä on myös kohinakaistanleveys B.

$$\text{Ilmaisutodennäköisyys on } P_{d,M} := \left[1 - e^{-SNR} \cdot \left[1 - \left(\frac{FAR}{B} \right)^{\frac{1}{M}} \right] \right]^M = 0,959$$

On huomattava, että tämä ei ole vielä havaitsemistodennäköisyys, johon on laskettava vielä sieppaustodennäköisyys. Kenttäradiot toimivat yleensä ympärisäteilevillä antennilla ja VHF-alueen taktisen tiedustelujärjestelmän antennikeilan voidaan olettaa kattavan koko uhkasektorin. Tällöin sieppaus todennäköisyys riippuu vain todennäköisyydestä, että tiedusteluvastaanotin on kenttäradion lähetystaajuudella. Vastaanottimen pyyhkäisy nopeus saadaan sen kaistanleveydestä:

$$f_{\text{sweep}} := B^2 = 625 \text{ MHz/s}$$

Jos oletetaan kenttäradion käyttämäksi taajuusalueeksi 30 ja 88 MHz väli, tiedusteluvastaanotin kykenee kattamaan koko radion käyttämän taajuuskaistan

$$\frac{88 - 30}{625} = 93 \text{ ms:ssa}$$

Siten yli 93 ms pituinen lähete havaitaan todennäköisyydellä 96 %. Todennäköisyys, että yli 186 ms pitkä lähete havaitaan, voidaan laskea seuraavasti: Tiedusteluvastaanotin ehtii pyyhkäisemään lähetteen yli vähintään kaksi kertaa. Tämä saadaan käyttämällä avuksi todennäköisyyttä, ettei vastaanotin havaitse lähetettä yhden pyyhkäisyn aikana, joka on

$$Q_{d.M} := 1 - P_{d.M}$$

Todennäköisyys, ettei lähetettä havaita kummallakaan kerralla on:

$$Q_{d.2} := Q_{d.M}^2$$

Todennäköisyys lähetteen havaitsemiseen jommalla kummalla pyyhkäisyllä on vastaavasti:

$$P_{d.2} := 1 - Q_{d.2} = 99,8\%$$

Näin suuren ilmaisutodennäköisyyden perusteella voidaan sanoa, että tiedustelujärjestelmä kykenee ilmaisemaan kaikki kanavilla olevat läheteet – hyvin lyhyitä data-lahetteita lukuun ottamatta.

Kuten edellisestä esimerkistä käy ilmi, ilmaisutodennäköisyys on useimmiten niin suuri, että sieppaustodennäköisyys määrää käytännössä järjestelmän havaitsemistodennäköisyyden. Kuitenkin lisättäessä sieppaustodennäköisyyttä esimerkiksi kohinakaistan tai antennivahvistuksen kustannuksella, signaalikohinasuhde pienenee tiedusteluvastaanottimen pohjakohinatasen noustessa ja signaalitason laskiessa. Lopulta voidaan saavuttaa piste, jossa sieppaustodennäköisyyden lisääminen johtaa ilmaisutodennäköisyyden romahtamiseen. Näiden eri parametrien optimaalinen suhde riippuu aina toteutuksesta. Suunnittelutyössä voidaan lähteä esimerkiksi siitä, että päätetään haluttu ilmaisutodennäköisyys ja lasketaan sen perusteella, kuinka suuri signaalikohinasuhde järjestelmän on saatava. Parhaassa tapauksessa tämän saavuttamiseksi tarvittava antennivahvistus mahdollistaa 360 tai 180 asteen valvontasektorin ja koko taajuusalueen peiton. Jos näin ei ole, joudutaan käyttämään pyyhkäiseviä vastaanottimia sekä pyöritettäviä suuntaavia antennoja ja siten tinkimään sieppaustodennäköisyydestä.

HÄIRINTÄLINKKIBUDJETIN LASKEMINEN

1. Laske lähettimen isotrooppinen lähetysteho

Lähetysteho	P_t
Lähettimen häviöt	L_t
Lähetysantennin vahvistus	G_t
Isotrooppinen lähetysteho	$EIRP_t = P_t - L_t + G_t$

2. Selvitä, vallitseeko vapaan tilan vaimennusolosuhde

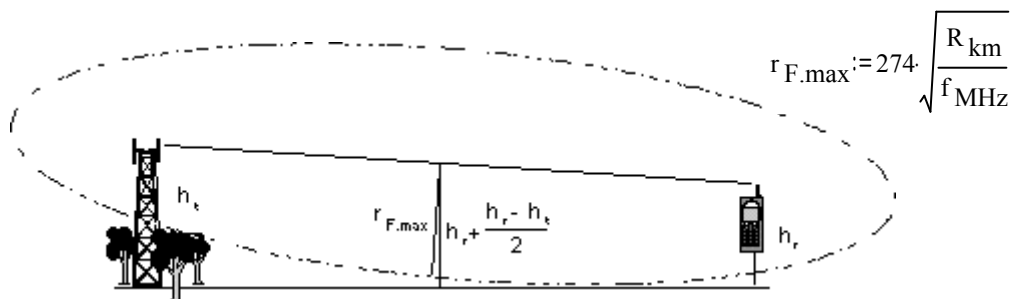
Onko vastaanotin radiohorisontin takana?

Radiohorisontti kilometreinä saadaan kaavasta $R_{rh.km} := 4.1 \cdot (\sqrt{h_t} + \sqrt{h_r})$

missä antennikorkeus on ilmaistu metreinä.

Rikkoutuuko Fresnellin 1. vyöhyke?

Jos taajuus ilmastaan MHz:nä ja jänneväli kilometreinä, saadaan Fresnelin 1. vyöhykkeen maksimisäde (eli säde jänteen puolivälissä) metreinä kaavasta:



Jos vastaus kumpaankin edelliseen kysymykseen on EI, on vapaan tilan vaimennus-
ehto voimassa ja vaimennus saadaan kaavasta

$$L_{spc} := 32.4 + 20 \cdot \log(f_{MHz}) + 20 \cdot \log(R_{km})$$

missä taajuus f_{MHz} on ilmaistu megahertseinä ja etäisyys R_{km} kilometreinä.

Jos vapaan tilan vaimennus ei ole voimassa, on tilanteen mukaan käytettävä soveltu-
vaa mediaanietenemismallia. Kannattaa valita jokin kaava, jota käyttää, esimerkiksi
Eglin kaava:

$$L_E := \begin{cases} (85.9 + 20 \cdot \log(f_c) + 40 \cdot \log(R_{km}) - 20 \cdot \log(h_t) - 20 \cdot \log(h_r)) & \text{jos } h_{re} > 10 \\ (76.3 + 20 \cdot \log(f_c) + 40 \cdot \log(R_{km}) - 20 \cdot \log(h_t) - 10 \cdot \log(h_r)) & \text{muutoin} \end{cases}$$

Huom! Eglin kaava olettaa etäisyyden olevan 1-80 km ja taajuuden 30 - 1000 MHz.

3. Laske vastaanotettu signaali.

Lähettimen isotrooppinen teho	$EIRP_t$
Etenemisvaimennus	L_{signaali}
Vastaanottoantennin vahvistus	G_t
Vastaanottimen häviöt	L_r
Vastaanotettu signaaliteho	$S = EIRP_t - L_{\text{signaali}} + G_t - L_r$

4. Laske kohinateho vastaanottimella

Boltzmannin vakio [J/K]	$k := 1.38065810^{-23}$
Standardilämpötila [K]	$T_o = 290$
Kohinakaistanleveys	B_N
Kohinakerroin	F <small>Huom! Yleensä <u>kohinaluku NF</u> ilmaistaan desibeleinä. Tässä kaavassa <u>kohinakerroin F</u> suhteena.</small>
Kohinateho vastaanottimessa [dW]	$N := 10 \cdot \log(k \cdot T_o \cdot B_N \cdot F)$
tai laskettuna desibeleillä	$N := -204 + F_{\text{dB}} + 10 \cdot \log(B_N)$

5. Laske häirintäsignaalin teho vastaanottimella

Lähettimen isotrooppinen teho	$EIRP_j = P_j + G_j - L_j$
Etenemisvaimennus	$L_{\text{häirintä}}$
Vastaanottoantennin vahvistus	G_{r-j} <small>(vahvistus häirintälähettimen suuntaan)</small>
Vastaanottimen häviöt	L_r
Vastaanotetun häirintäsignaalin teho	$J = EIRP_j - L_{\text{häirintä}} + G_{r-j} - L_r$

6. Laske kohinan ja häirinnän vaikutus

Kohinan ja häirintäsignaalin merkitys on se, että ne pienentävät yhdessä signaalin ilmaisuun hyödynnettävissä olevan energian suhdetta kohinaan.

Hyötysignaali	S_{dB}
Kohina	N_{dB}

Signaalikohinasuhde $SNR_{dB} = S_{dB} - N_{dB}$

Häirintäsignaali J_{dB}

Hyöty/häirintäsignaalisuhde $SJR_{dB} = S_{dB} - J_{dB}$

Jos $J \gg N$, SJR on riittävä, muutoin on laskettava $SJNR = S / (J + N)$, missä S, J ja N on ilmaistu watteina.

Konversio: $S := 10^{\frac{S_{dB}}{10}}$

7. Määritä häirinnän ja/tai kohinan vaikutus yhteyden laatuun, eli käytännössä bittivirhesuhteeseen.

SÄTEILYN VAIKUTUS IHMISEEN

YLEISTÄ

Sähkömagneettisen spektrin hyödyntämistä käsittelevässä teoksessa on syytä ainakin sivuta sähkömagneettisen säteilyn vaikutusta ihmiseen. Tämän kirjan tarkoituksena on kuitenkin käsitellä sähkömagneettisen spektrin hyödyntämistä sodankäynnissä, joten säteilyn vaikutuksen käsittely jää pakostakin pinnalliseksi. Tämä liite täydentää suunnatun energian aseiden käsittelyn yhteydessä esitettyä kuvausta. Sähkömagneettisen säteilyn vuorovaikutus materiaan, siis myös ihmisen kudosten, kanssa riippuu lähinnä säteilyn aallonpituudesta (taajuudesta) ja säteilyn tehosiheydestä. Tunnetuimmat säteilyn vaikutusmekanismit ovat

- sähköärsytys
- lämpeneminen
- sähkökemialliset muutokset

Lisäksi ympäristössä yleisesti esiintyvien mikroteslatastoisten magneettikenttien epäillään aiheuttavan leukemiaa, keskushermostosyöpää ja imusolmukesyöpää, mutta tätä ei ole kyetty varmentamaan kokeilla, eikä mahdollista vaikutusmekanismia tiedetä.

Suomessa sähkömagneettisen säteilyn käyttöä säätelee säteilylaki 521/91 ja sen perusteella annettu asetus ionisoimattoman säteilyn valvonnasta (1306/93).

Tässä kirjassa pientaajuiseksi säteilyksi on nimitetty sähkömagneettista säteilyä, jonka aallonpituus on yli millimetrin. Puhuttaessa sähkömagneettisen säteilyn vaikutuksesta ihmiseen käytetään kuitenkin usein seuraavaa jakoa:

- | | |
|---------------------------|----------------------------|
| 1. pientaajuinen säteily: | 300 Hz – 30 kHz taajuus |
| 2. radiotaajuinen säteily | 30 kHz – 300 MHz taajuus |
| 3. mikroaaltosäteily | 300 MHz – 300 GHz taajuus |
| 4. optinen säteily | 1 mm – 100 nm aallonpituus |

Optisella alueella erotetaan ionisoimaton ja ionisoiva säteily toisistaan. Aiemmin ionosfäärin käsittelyn yhteydessä todettiin suhteellisen matalataajuistenkin säteilyn kykenevät ionisoimaan atomeja ja molekyyliä korkealla ilmakehässä. Säteilyn vaikutuksista puhuttaessa jako ionisoivaan ja ionisoimattomaan säteilyyn perustuu kuitenkin säteilyn kykyyn ionisoida eläinsolujen rakennetta, minkä vuoksi raja on spektrissä korkeammalla, ultraviolettilinon kohdalla. Biologisen materiaalin ionisoimiseen tarvitaan noin 12 eV energia.

IONISOIMATON SÄTEILY

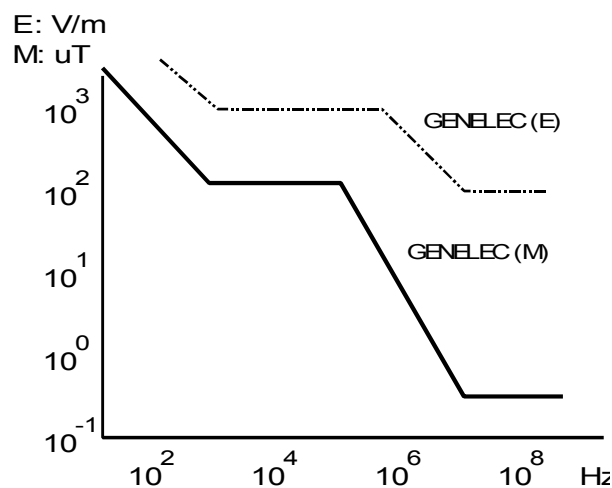
Pientaajuusalue

Säteilyllä on stimuloiva vaikutus: kehoon indusoituvat sähkömagneettiset kentät ja virrat voivat aiheuttaa sähköärsytystä hermo- ja lihassoluissa. Lyhytaikainen altistuminen on vaaratonta, mutta pitkäaikaisen altistumisen vaikutuksesta ei ole riittävästi tietoa. Kuitenkin sähköalan ammatteihin näyttää liittyvän kohonnut aivokasvainten ja leukemian riski, mutta syytä tai vaikutusmekanismia ei tunneta. Eläinkokeiden tulokset ovat kuitenkin olleet ristiriitaisia.

Heikkojen kenttien osalta soluviljelmillä tehtyjen kokeiden perusteella vaikuttaa siltä, että vain magneettikentällä on vaikutusta solujen toimintaan sähkökentän ollessa harmiton. Sähkökenttä ei siten missään olosuhteissa ole fyysikaalisesti vaarallinen. Noin 10 mT -tasoinen 50 Hz magneettikenttä aiheuttaa lihas- ja hermosolujen sähköistä stimulaatiota⁶⁰. Noin 1 T magneettikenttä häiritsee jo sydänlihaksenkin toimintaa ja saattaa siten olla hengenvaarallinen. Näin suuria magneettikentän tasoja ei juurikaan esiinny normaalissa elinympäristössämme. Esimerkiksi 380 V / 600 A kaapelin aiheuttama magneettikenttä on metrin päässä kaapelista noin 1 μ T ja näyttöpäätteet noin 0,16 μ T puolen metrin päästä mitattuna.

Pientaajuuden kentän energia on liian pieni, jotta se kykenisi muuttamaan DNA:ta, minkä vuoksi se ei kykene suoraan aiheuttamaan esimerkiksi syöpää. Sen sijaan säteily saattaa vaikuttaa systeemitasolla ihmiseen alentamalla vastustuskykyä ja muuttamalla solun Kalsium-tasapainoa. Puhuttaessa pientaajuuden säteilyn vaikutuksista unohdetaan usein se, että näiden kenttien soluihin indusoimat sähkövirrat ovat pienempiä kuin normaali solutason sähköinen kohina.

Genelec ja CEC ovat määritelleet omat rajansa eri taajuisille sähkö- ja magneettikentille. Maksimikenttä riippuu taajuudesta kuvan L3.1 mukaisesti.



Kuva L3.1

Tyypillinen asunnon taustataso on noin 0,1 μ T ja alle 0,1 kV/m. Nämä kentät johtuvat pääosin putkistojen ja runkorakenteiden läpi kulkevista harhavirroista.

⁶⁰ Magneettikentän voimakkuuden yksikkönä käytetään Teslaa [1 T =] .

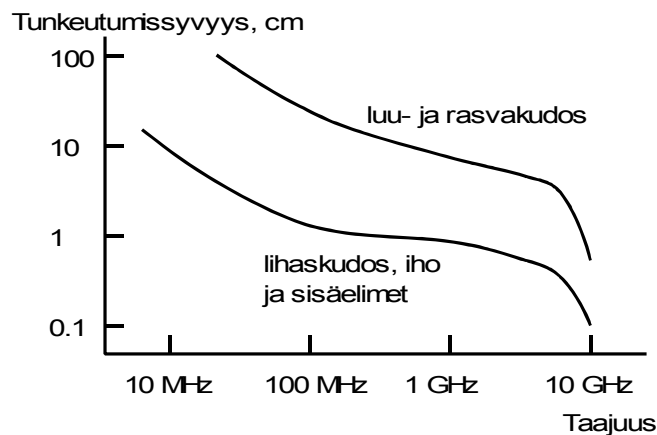
Radioaallot

Noin 1 MHz alkaen keho alkaa absorboida aallosta energiaa, mikä johtaa kudosten lämpenemiseen. 70 - 100 MHz taajuudella ihminen muodostaa puolen aallonpituuden luokkaa olevan kohteen, joka on resonanssissa radioaallon kanssa. Aalto vaikuttaa koko kehon lämpenemiseen; paikallinen absorptio on korkeintaan 10 - 20 -kertainen kokonaisabsorptioon verrattuna.

Ominaisabsorptionopeus (SAR, Specific Absorption Rate) määritellään aallon kudoksessa kulkemaa matkaa kohti absorboivaksi tehoksi. Se riippuu kentän tasosta ja taajuudesta sekä polarisaatiosta, heijastuksista, ihmisen koosta ja muodosta. Ihmisen oma lämmönsäätelyjärjestelmä pyrkii kumoamaan säteilyn aiheuttaman lämmön nousun. Radioaallon aiheuttaman lämmön lisäksi kudosten oma perusaineenvaihdunta synnyttää noin 1 W/kg ja voimakas liikunta noin 10 W/kg. Kehon ja pään maksimirajat ovat noin 10 W/kg ja 20 W/kg.

Mikroaallot

Mikroaaltosäteily voi fokuoittaa pienelle alueelle ja aiheuttaa siten paikallista kudosten lämpenemistä, jopa palovammoja. Solutuho alkaa 43 °C lämpötilassa ja kiihtyy nopeasti 46 °C jälkeen. Mikäli säteily absorboituu pinnan alla oleviin kudoksiin, eivät iholla olevat lämpöreseptorit reagoi sisäisiin palovammoihin. Erityisen herkkä vaurioille on silmän mykiö, jossa on vähän jäädyttäviä verisuonia.



Kuva L3.2: Radio- ja mikroaaltojen tunkeutumissyvyys eri kudostyyppihin.

Optinen alue

Optisella alueella säteily ei tunkeudu ihoa ja silmiä syvemmälle. Säteily lämmittää ja aiheuttaa valokemiallisia reaktioita. Erityisen vaarallinen säteilyn lähde on laser, joka kykenee lämmittämään solukkoa ja aiheuttamaan palovammoja.

Silmän sarveiskalvo absorboi alle 315 ja yli 1400 nm säteilyä. Silmän linssi absorboi 315 – 400 nm alueella, joten 400 – 1400 nm aallonpituisen säteily pääsee verkkokalvolle asti. Verkkokalvo ei ole sen herkempää tulevalle säteilylle kuin muukaan solukko, mutta silmän fokuoivan toiminnan vuoksi säteilyn tehoisuus verkkokalvolla on noin 100.000-kertainen sarveiskalvolle tulevaan säteilyyn nähden. Jos silmän edessä vielä on kiikari tai muuta

vahvistavaa optiikkaa, on tehotiheys verkkokalvolla vielä tätäkin suurempi. Kudoksen lämpötilan noustua yli 50 °C seuraa proteiinien ja entsyymien koaguloituminen ja yli 100 °C lämpötilassa kudosten höyrystyminen, eli fototerminen ablaatio. Silmän vaurioittamiseen riittää tilanteesta riippuen 0,5 – 5 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ säteilyenergia.

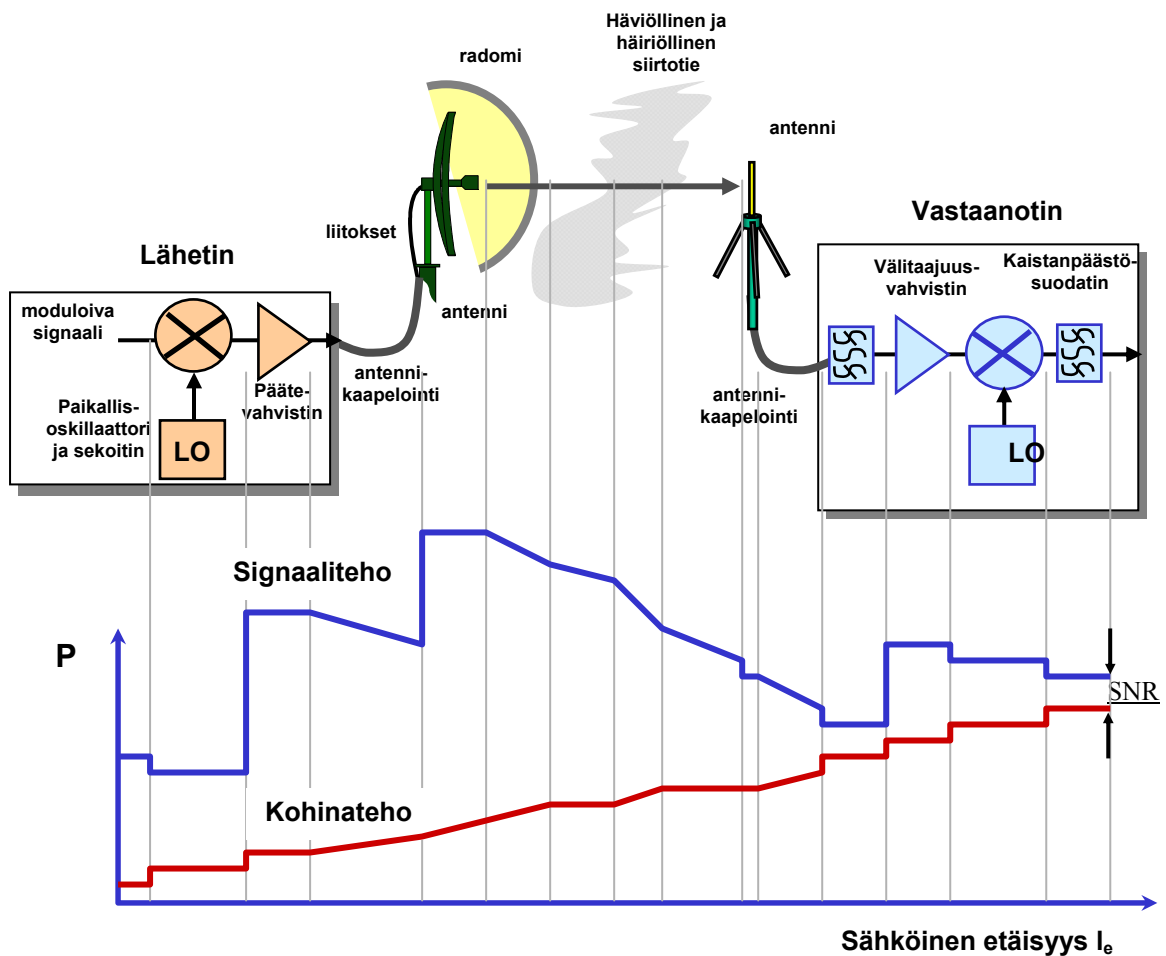
IONISOIVA SÄTEILY

Säteilykvantin energia ($E=h\cdot f$) ylittää noin 12 eV rajan noin ultravioletialueella 100 nm aallonpituudella. Tämä riittää ionisoimaan biologista materiaa, mikäli säteilyn tehotiheys (fotonien lukumäärä tilavuus- ja aikayksikköä kohti) on riittävä. Soluun osuvat fotonit aiheuttavat fotokemiallisia muutoksia DNA-molekyyleissä ja proteiineissa. UV-A-säteily tunkeutuu syvimmillään jopa 1-5 mm ihon läpi, mutta se on biologisilta vaikutuksiltaan pienin. Lyhytaaltoisen UV-C-säteilyn energia on suurin ja siten sen vaikutus solulle tuhoisin, mutta ilmakehä vaimentaa sitä tehokkaasti. Haitallisimmaksi säteilyksi muodostuu siten UV-B, joka ei läpäise ihon pinnalla olevaa ohutta 50 – 150 μm paksuista orvaskettä.

Joidenkin arvioiden mukaan noin 10 % ihmisen altistumisesta ionisoivalle säteilylle johtuu keinotekoisista lähteistä, kuten valaisimet, hitsauslaitteet ja solarium. Sähköhitsauksessa syntyy laajakaistaista säteilyä infrapuna-alueelta ultravioletialueelle. Alle 200 nm UV-säteily absorboituu hitsauskaaren välittömässä läheisyydessä synnyttäen otsonia.

SIGNAALIKOHINASUHDE JA SÄHKÖINEN ETÄISYYS

Signaaliin summautuu kohinaa jokaisessa aktiivisessa tai häviöllisessä prosessivaiheessa. Moduloiva signaali sisältää kohinaa, joka voimistuu modulaattorissa sekoittimen ja paikallisoskillaattorin oman kohinan vaikutuksesta. Lähettimen tehovahvistin lisää oman kohinansa. Antennikaapelointi ja liittimet edustavat häviöllistä siirtotietä, jossa niiden vaimennuksesta riippuva terminen kohina summautuu signaaliin. Antennin lisäämä kohina syntyy esimerkiksi sen epäsovituksista. Antennin suojana oleva radomi lisää oman kohinansa antennista lähtevään aaltoon. Kun aalto etenee häviöllisen tai häiriöllisen väliaineen läpi, siihen sekoittuu lisää kohinaa. Vastaanotinantenniin tulee kohinaa paitsi pääkeilasta, myös kohinaisia kohteita valaisevista sivukeiloista. Vastaanottimen kaapelointi, liittimet, kaistanpäästösuodattimet, sekoittimet ja paikallisoskillaattorit lisäävät edelleen kohinatasoa. Signaalin tehotiheys laskee passiivisten piirielementtien aiheuttaman vaimennuksen myötä. Aktiivisilla vahvistimilla voidaan lisätä signaalin tehotasoa, mutta samalla vahvistetaan myös kohinaa.



LUONNONVAKIOITA JA KAAVOJA

SI-JÄRJESTELMÄN YKSIKÖT

SI-järjestelmän perusyksiköt

suure	tunnus	yksikkö	tunnus	suure	tunnus	yksikkö	tunnus
<i>pituus</i>	<i>l</i>	metri	m	<i>massa</i>	<i>m</i>	kilogramma	kg
<i>aika</i>	<i>t</i>	sekunti	s	<i>sähkövirta</i>	<i>I</i>	ampeeri	A
<i>lämpötila</i>	<i>T</i>	kelvin	K	<i>ainemäärä</i>	<i>n</i>	mooli	mol
<i>valovoima</i>	<i>I</i>	kandela	cd				

Aihealueen kannalta keskeiset johdannaisyksiköt, joilla on erityisnimi:

suure	nimi	tunnus	selite
tasokulma	radiaani	rad	1 rad = 1 m/m
avaruuskulma	steradiaani	Sr	1 sr = 1 m ² /m ²
taajuus	hertsi	Hz	1 Hz = 1/s
voima	newton	N	1 N = 1 kgm/s ²
energia, työ	joule	J	1 J = 1 Nm
teho	watti	W	1 W = 1 J/s
celciuslämpötila	celciusaste	°C	1 °C = 1 K
sähkövaraus	coulombi	C	1 C = 1 As
jännite	voltti	V	1 V = 1 W/A
kapasitanssi	faradi	F	1 F = 1 As/V
resistanssi	ohmi	Ω	1 Ω = 1 V/A
konduktanssi	siemens	S	1 S = 1 Ω ⁻¹
magneettivuo	weber	Wb	1 Wb = 1 Vs
magneettivuon tiheys	tesla	T	1 T = 1 Wb/m ²
induktanssi	henry	H	1 H = 1 Vs/A
valovirta	lumen	lm	1 lm = 1 cd*sr
valaistusvoimakkuus	luksi	lx	1 lx = 1 lm/m ²

KERTOIMET

a	atto	10 ⁻¹⁸	E	eksa	10 ¹⁸
f	femto	10 ⁻¹⁵	P	peta	10 ¹⁵
p	piko	10 ⁻¹²	T	tera	10 ¹²
n	nano	10 ⁻⁹	G	giga	10 ⁹
μ	mikro	10 ⁻⁶	M	mega	10 ⁶
m	milli	10 ⁻³	k	kilo	10 ³
c	sentti	10 ⁻²	h	hehto	10 ²
d	desi	10 ⁻¹	da	deka	10 ¹

SÄHKÖTEKNIIKAN SUUREITA JA MITTAYKSIKÖITÄ

suure		yksikkö		
nimi	tunnus	nimi	tunnus	huomautukset
us	I	ampeeri	A	
sähkövirta	I	ampeeri	A	
sähkövaraus	Q	coulombi	C	1 C = 1 As
jännite	U	voltti	V	1 V = 1 W/A
sähkömotorinen voima	E	voltti	V	
sähkökentän voimakkuus	E		V/m	
sähkövuoto	Ψ	coulombi	C	
sähkövuon tiheys	D		C/m ²	
kapasitanssi	C	faradi	F	1 F = 1 As/V
magneettivuoto	Φ	weber	Wb	1 Wb = 1 Vs
magneettivuon tiheys	B	tesla	T	1 T = 1 Wb/m ²
magneettikentän voimakkuus	H		A/m	
induktanssi	L	henry	H	1 H = 1 Vs/A
resistanssi	R	ohmi	Ω	1 Ω = 1 V/A
resistiivisyys	ρ	ohmimetri	Ω m	
konduktanssi	G	siemens	S	1 S = 1 Ω^{-1}
sähkönjohtavuus	γ	siemens/m	S/m	
impedanssi	Z	ohmi	Ω	
reaktanssi	X	ohmi	Ω	
admittanssi	Y	siemens	Ω	
näennäisteho	S	voltiampeeri	VA	
loisteho	Q	vari	Var	

VALAISTUKSEEN LIITTYVIÄ SUUREITA JA YKSIKÖITÄ

suure		yksikkö		
nimi	tunnus	nimi	tunnus	huomautukset
valovoima	I	candela	cd	
valovirta	Φ	lumen	lm	(1 lm = 1 cd*sr)
valomäärä	Q		lms	
luminanssi	L		cd/m ²	
valaistusvoimakkuus	E	luksi	lx	(1 lx = 1 lm/m ²)

LUONNONVAKIOT

Seuraavassa on esitetty kirjan aihepiirin kannalta olennaiset luonnonvakiot sekä niiden SI-järjestelmän mukainen tunnus. On huomattava, että anglo-amerikkalaisessa kirjallisuudessa poiketaan usein SI-järjestelmästä ja tällöin vakioille voidaan antaa poikkeavia nimityksiä.

Normaaliputoamiskiihtyvyys	g_n	$9,80665 \text{ ms}^{-2}$
normaalilämpötila	T_0	$273,15 \text{ K}$ (1)
valon nopeus tyhjöissä	c_0	$2,99792458 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$
tyhjön permittiivisyys	ϵ_0	$8,85194 \cdot 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$
tyhjön permeabiliteetti	μ_0	$4 \cdot 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$
alkeisvaraus	e	$1,6021892 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
neperin luku	e	$2,718281829$
Planckin vakio	h	$6,626196 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ $4,135714 \cdot 10^{-15} \text{ eVs}$
Boltzmannin vakio	k	$1,380658 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$
Stefan-Boltzmannin vakio	σ	$5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$
Wienin siirtymälain vakio		$0,290 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$
Maapallon säde ekvaattorilla	R_E	$6378,17 \cdot 10^3 \text{ m}$
Maapallon säde navalla		$6356,79 \cdot 10^3 \text{ m}$
Maapallon pyörähdysaika		$23 \text{ h } 56 \text{ min } 4,100 \text{ s}$ $= 86\,164,1 \text{ s}$
Pakonopeus maapallolta		$11,19 \text{ kms}^{-1}$
	π	$3,14159265359$

1) Usein käytetään ilman erillistä mainintaa $T_0 = 300 \text{ K}$ laskujen helpottamiseksi.

KREIKKALAISET AAKKOSET

Kreikkalaisia aakkosia käytetään tekniikassa ilmaisemaan erilaisia suureita. Seuraavassa on esitetty kreikkalaisten aakkosten isot ja pienet kirjaimet sekä niiden suomenkielinen kirjoitus- ja ääntämysasu.

A α alfa	I ι ioota	P ρ rhoo
B β beeta	K κ kappa	Σ σ sigma
Γ χ gamma	Λ λ lambda	T τ tau
Δ δ delta	M μ myy	Y υ ypsilon
E ϵ epsilon	N ν nyy	Φ ϕ fii
Z ζ zeeta	Ξ ξ ksii	X χ khii
H η eeta	O \omicron omikron	Ψ ψ psii
	θ ν theeta	Π π pii

Kreikkalaisten aakkosten käyttöä ei ole vakioitu, joten samaa kirjainta saatetaan käyttää eri tieteenhaaroissa eri merkityksessä. Kuitenkin joitakin kirjaimia käytetään tyypillisesti tämän kirjan aihealueilla tietyn suureen ilmaisemiseen. Seuraavassa taulukossa esitetään tässä kirjassa käytetyt ja yleisimmät suureiden nimeämiseen käytettävät aakkoset.

alfa	α	tulokulma
beeta	β	lähtökulma, symbolin lähetysajan suhde purskejaksoon
delta	Δ, δ	ero, tarkkuus
epsilon	ε	permittiivisyys (ε_0 tyhjän permittiivisyys ja ε_r suhteellinen p.)
lambda	λ	aallonpituus
myy	μ	permeabiliteetti
omega	Ω	sähkövastus, avaruuskulma tai sektori
	ω	kulmanopeus
nyy	v	nopeus, taajuus, diffraktiovaimennus
eeta	η	taitekerroin, koodin tai protokollan tehokkuus
theeta	θ	kulma, atsimuuttikulma
rho	ρ	resistiivisyys, heijastuskerroin, häirintäpulsissuhde
sigma	Σ	summa, kokonais-
	σ	sirontapoikkipinta-ala, Stefan-Boltzmannin vakio
tau	T	jakson kesto
	τ	pulssin pituus
fii	Φ	kulma-, elevaatiokulma, vaihekulma
	φ	vaihekulma
pii	Π	kertoma

Taulukko L4.1: Yleisimmin käytettävät kreikkalaiset aakkoset käyttötarkoituksineen.

Myöskään aakkosten käyttöä ei ole vakioitu. Seuraavassa taulukossa on esitetty tässä kirjassa eri käyttötarkoituksiin käytetyt aakkoset.

A	vahvistus, apertuuri (aperture)
B	kaistanleveys (bandwidth)
C, c	kapasiteetti (capacity), kontrasti (contrast), pulssisuhde (duty cycle)
D, d	etäisyys (distance), antennin läpimitta (diameter), ilmaisevuus (detectivity)
E	sähkökentän voimakkuus (electric field strength), energia (energy), valaistusvoimakkuus (irradiance)
F	kohinakerroin (noise factor) tai desibeleinä kohinaluku
f	taajuus (frequency), murto-osa (fraction)
G	vahvistus (gain)
h	korkeus (height)
I	säteilyn intensiteetti (intensity)
J	säteilytehotiheys
k	Boltzmannin vakio, datakentän koko
L	häviökerroin (loss) tai desibeleinä häviö, luminanssi (luminance)
M	magneettikentän voimakkuus (magnetic field strength)
N	kohina (noise), taiteluku, kokonaislukumäärä
n	taitekerroin, kokonaislukumäärä
P	teho (power), todennäköisyys (probability)
p	liikemäärämomentti
R, r	säde (radius), suhde (ration), symbolinopeus (rate)
S	signaalitaso [V/m] (signal strength) tai signaaliteho [W]
T	lämpötila (temperature), jakson kesto
t	aika (time), osa-aika
v	nopeus (velocity)
Z	impedanssi

Taulukko L4.2: Aakkosten käyttö suureiden nimeämisesä tässä kirjassa.

MUUNNOSKAAVOJA

1" tuuma = 25,40 mm	1 m maili = 1,6 km
1' jalka = 30,48 cm	1 nmi merimaili = 1,85 km
1 aste = $/180 = 0,017$ radiaania	1 km kilometri = 0,54 nmi
1 rad = 57,3 astetta	1 mph = 1,6093 km/h = 0,447 m/s
1 kn solmu = $0,5144 \text{ ms}^{-1} = 1,852 \text{ kmh}^{-1}$	1 eV elektronivoltti = 0,16 aJ
1 bar baari = 10^5 Pa	1 hv hevosvoima = 735,5 W
Mach 1 = 1225 km/h merenpinnan tasossa	1 kWh kilowattitunti = 3,6 MJ

LOGARITMIT

Tässä kirjassa 10-kantainen logaritmi \log_{10} on esitetty muodossa *log*, luonnollinen logaritmi \log_e muodossa *ln* ja binäärinen 2-kantainen logaritmi muodossa *log₂*. Useimmissa laskimissa ei ole binääristä logaritmia, joten 2-kantainen logaritmi voidaan laskea myös kaavalla

$$\log_2(X) = \log(X) / \log(2)$$

Muita logaritmien laskemisessa hyödyllisiä kaavoja ovat:

$$\log(A \cdot B) = \log(A) + \log(B)$$

$$\log(A / B) = \log(A) - \log(B)$$

$$\log(A^B) = B \cdot \log(A)$$

$$\log(\sqrt[B]{A}) = \log(A) / B$$

Desibeliä käytetään signaalin tehon laskemiseen. **Desibeli on aina tehon mitta**. Siten signaaliteho ($P = UI = RI^2$) voidaan ilmoittaa desibeleinä:

$$\text{teho desibeleinä } P_{\text{dBW}} = 10 \cdot \log(P_{\text{W}})$$

tai virran, jännitteen, kentänvoimakkuuden tms. suureen avulla esim.:

$$\text{teho desibeleinä } P_{\text{dBW}} = 10 \cdot \log(RI^2) = 10 \cdot \log(R) + 20 \cdot \log(I)$$

Vastaavasti suure voidaan muuttaa desibeleistä lineaariseksi suhteeksi kaavalla:

$$\text{teho Watteina } P_{\text{W}} = 10^{\text{TEHO DESIBELEINÄ} / 10}$$

Usein teho ilmaistaan dBm:nä, mikä tarkoittaa desibeliä yli milliwatin, eli

$$P_{\text{dBm}} = P_{\text{dBW}} + 30 \text{ dB} \quad \text{tai} \quad P_{\text{dBW}} = P_{\text{dBm}} - 30 \text{ dB}$$

Desibeliwatin dBW ja desibelimilliwatin dBm lisäksi joissakin yhteyksissä käytetään ilmaisua dBi, joka tarkoittaa desibeliä yli isotrooppisen antennivahvistuksen. Tässä kirjassa antennivahvistus on aina ilmaistu desibelinä yli isotrooppisen vahvistuksen, vaikkei sitä ole erikseen merkitty. Kummajainen dBd tarkoittaa desibeliä yli dipoliantennin vahvistuksen.

LYHENTEET

Seuraavassa on esitetty kirjassa käytetyt yleisesti käytössä olevat lyhenteet. Järjestelmäkohtaiset lyhenteet on jätetty luettelosta.

ACLOS	Automatic Command to Line of Sight	ELINT	Electronic Intelligence
ADC	Analog-to-Digital Converter	EMC	Electro-Magnetic Compatibility
AFC	Automatic Frequency Control	EMP	Electro-Magnetic Pulse
AGC	Automatic Gain Control	ENSS	European Navigation Satellite System
AGM	Air-to-ground Guided Missile	EP	Electronic Protection
ALCM	Air-Launched Cruise Missile	EPLRS	Enhanced Positioning Location Reporting System
AM	Amplitude Modulation	ES	Electronic Support
AOA	Angle Of Arrival	ESM	Electronic Support Measures
ARM	Anti-Radiation Missile	EW	Electronic Warfare
ARQ	Automatic Repeat Request	FAR	False Alarm Rate
ASK	Amplitude Shift Keying	FCG	Flux Compression Generator
ASM	Air to Surface Missile	FCR	Fire Control Radar
ATM	Asynchronous Transfer Mode	FDM	Frequency Division Multiplexing
AWGN	Average White Gaussian Noise	FDMA	Frequency Division Multiple Access
BAT	Brilliant Anti-Armor Submunition	FDOA	Frequency Difference of Arrival
BDA	Battle Damage Assessment	FEC	Forward Error Correction
BER	Bit Error Rate	FIR	Far Infra-Red
BMS	Battle Management System	FM	Frequency Modulation
BSC	Base Station Controller	FOGM	Fiber-Optic Guided Missile
BTS	Base Transceiver Station	FOV	Field of View
C/A	Coarse Acquisition	FPA	Focal Plane Array
CALCM	Conventional Air-Launched Cruise Missile	FPEN	Foliage Penetration
C2W	Command and Control Warfare	FSK	Frequency Shift Keying
CCD	Charge-Coupled Device	GAM	GPS-Aided Munition
CDC	Conditioned Di-Phase	GBU	Guided Bomb Unit
CDMA	Code Division Multiple Access	GEO	Geostationary Earth Orbit
CFAR	Constant False Alarm Rate	GLONASS	Global Navigation Satellite Service
CIR	Carrier to Interference Ratio	GMSK	Gaussian Minimum Shift Keying
CMT	Cadmium Mercury Telluride	GNSS	Global Navigation Satellite System
CNRA	Combat Net Radio Access	GPEN	Ground Penetrating Radar
COLOS	Command Off the Line Of Sight	GPS	Global Positioning System
COMINT	COMMunications INTelligence	HARM	High-Speed Anti-Radiation Missile
COSRO	Conical Scan on Receive Only	HF	High Frequency
CW	Continuous wave	HEL	High Energy Laser
CVSD	Continuous Slope Variable Delta	HPM	High-Power Microwave
DAC	Digital-to-Analog Converter	IF	Intermediate Frequency
DCA	Dynamic Channel Allocation	IF	Intermediate Frequency
DCT	Discrete Cosine Transform	IFF	Identification Friend or Foe
DECT	Digital European Cordless Telephone	IFM	Instantaneous Frequency Measurement
DEW	Directed Energy Weapon	IIR	Imaging InfraRed
DGPS	Differential Global Positioning System	IN	Inertial Navigation
DIRCM	Directed Infra-Red CounterMeasures	IS	Information Superiority
DOA	Direction of Arrival	ISI	Inter Symbol Interference
DSB	Double Sideband	IW	Information Warfare
DSP	Digital Signal Processor	JEM	Jet Engine Modulation
DS-SS	Direct-Sequence Spread Spectrum	JTIDS	Joint Tactical Information Distribution System
EA	Electronic Attack	LED	Light Emitting Diode
EFOGM	Enhanced Fiber Optic Guided Missile	LEO	Low Earth Orbiting
EGNOS	European Geostationary Overlay Service	LF	Low Frequency
EHF	Extremely-High Frequency	LGB	Laser Guided Bomb
EIRP	Effectively Isotropically Radiated Power		
ELF	Extremely Low Frequency		

LLTV	Low Light Television	SACLOS	Semi-Automatic Command to Line of Sight
LNA	Low Noise Amplifier	SADARM	Sense and Destroy Armor Munition
LO	Local Oscillator	SaF	Store-and-Forward
LOS	Line of Sight	SAL	Semi-Active Laser homing
LPD	Low probability of Detection	SAM	Surface to Air Missile
LPE	Low Probability of Exploitation	SAR	Synthetic Aperture Radar
LPI	Low Probability of Intercept	SCR	Signal-to-Clutter Ratio
LTM	Laser Target Marker	SCRA	Single Channel Radio Access
LUF	Lowest Usable Frequency	SEAD	Suppression of Enemy Air Defences
LV	lähetinvastaanotin	SIGINT	Signals Intelligence
LWIR	Long-Wavelength IR	SFW	Sensor Fuzed Weapon
LWR	Laser Warning Receiver	SHF	Super-High Frequency
MAW	Missile Approach Warner	SJNR	Signal-to-Jamming+Noise Ratio
MCLOS	Manual Command to Line Of Sight	SLAM	Standoff Land Attack Missile
MEO	Medium Earth Orbit	SLL	Sidelobe Level
MF	Medium Frequency	SoS	System of Systems
MIR	Middle Infra-Red	SSB	Single Sideband
MLRS	Multiple Launch Rocket System	SSL	Single Site Location
MRTD	Minimum Resolvable Temperature Difference	SWIR	Short-Wavelength IR
MSK	Minimum Shift Keying	TDM	Time Division Multiplexing
MTI	Moving Target Indicator	TDMA	TDM Access
MUF	Maximum Usable Frequency	TDOA	Time Difference of Arrival
MWIR	Medium-Wave IR	TELINT	TElemetry INTelligence
NAVWAR	Navigation Warfare	TERCOM	TERrain CONtour Matching
NCW	Network-Centric Warfare	TERNAV	TERrain NAVigation
Nd-YAG	Neodymium Yttrium-Aluminium Garnet	TETRA	Trans-European Trunked Radio tai TERrestrial Trunked Radio
NETD	Noise Equivalent Temperature Difference	TOA	Time Of Arrival
NIR	Near Infrared	TVM	Track Via Missile
NLOS	Non-LOS	TWS	Track-while-scan
NVIS	Near Vertical Incidence System	TWT	Travelling wave tube
OPO	Optical Parametric Oscillator	UAV	Unmanned Aerial Vehicle
OTM	On-The-Move	UGV	Unmanned Ground Vehicle
OWF	Optimum Working Frequency	UHF	Ultra-High Frequency
PCM	Pulse Code Modulation	UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
PGM	Precision Guided Munition	UTM	Universal Transversal Mercator
PIK	Phase Inversion Keying	UV	Ultravioletti
PIK	Pulse Interval Keying	UWB	Ultra-wide Band
PIM	Pulse Interval Modulation	VCO	Virtual Cathode Oscillator
PM	Phase Modulation	VHF	Very High Frequency
POI	Probability of Intercept	VLf	Very Low Frequency
PPI	Plan Position Indicator	VSb	Vestigial Sideband
PPM	Pulse Position Modulation	WGS84	World Geodetic System 84
PRF	Pulse Repetition Frequency	XIR	eXtreme Infra-Red
PRI	Pulse Repetition Interval	YAG	Yttrium-Aluminium Garnet
PRMA	Packet Reservation Multiple Access	YVI	Yhtymän Viestijärjestelmä
PSK	Phase Shift Keying		
QAM	Quadrature Amplitude Modulation		
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying		
RADAR	Radio Detecting And Ranging		
RAM	Radar Absorbing Material		
RF	Radio Frequency		
RINT	Radiation INTelligence		
RISTA	Reconnaissance-, Surveillance and Target Acquisition		
RLE	Run-Length Encoding		
RPV	Remotely Piloted Vehicle		
RWR	Radar Warning Receiver		
SA	Situational Awareness		