

MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU

ILMATORJUNTAOHJUSASEIDEN JA -JÄRJESTELMIEN TEKNIikka

Pro gradu -tutkielma

Kadetti
Jani Koskivuori

Kadettikurssi 92
Ilmatorjuntalinja

Maaliskuu 2009

MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU

Kurssi Kadettikurssi 92	Linja Ilmatorjuntalinja
Tekijä Kadetti Jani Koskivuori	
Tutkielman nimi ILMATORJUNTAOHJUSASEIDEN JA -JÄRJESTELMIEN TEKNIikka	
Oppiaine, johon työ liittyy Tekniikka	Säilytyspaikka Kurssikirjasto (Mpkk:n kirjasto)
Aika Maaliskuu 2009	Tekstisivuja 63 Liitesivuja 6
TIIVISTELMÄ <p>Ilmatorjuntaohjusaseet ja -järjestelmät kehittyvät nykypäivänä nopeasti. Nämä järjestelmät käyvät kilpajuoksua ilma-aseen kanssa, sillä ilmatorjunta on kehitetty vasta-aselajiksi. Tekniikan kehittymisen myötä ilmatorjuntaohjusaseiden tekniikka on myös kehittynyt hyvin paljon. Uudet tekniset ratkaisut ja laitteet mahdollistavat muun muassa erilaisten hakupäiden ja moottorien tehokkaamman toiminnan. Tutkimus on aiheellinen, sillä ilmatorjuntaohjusjärjestelmien peruseräatteen ovat pysyneet pääosin samoina vaikka järjestelmien valmistajia on tullut enemmän.</p> <p>Tässä tutkielmassa käsitellään ilmatorjuntaohjusaseiden ja -järjestelmien lisäksi ohjuksien tekniikkaa yleisellä tasolla. Tutkielman tarkoituksena on saada lukija ymmärtämään, minkälaista tekniikkaa on käytössä ja minkälaisia teknisiä ratkaisuja on mahdollista tehdä ohjuksiin. Tutkielmassa käsitellään myös Suomessa olevia kansallisia ilmatorjuntaohjusjärjestelmiä, jotka ovat käytössä maa- ja merivoimilla.</p> <p>Tutkimuskysymyksenä on ”Minkälaista tekniikkaa on käytössä ilmatorjuntaohjuksissa ja ilmatorjuntaohjusjärjestelmissä?”. Johtopäätöksissä käsitellään lyhyesti tutkielmalle asetetut eri kysymykset ja käsitellään osittain myös mahdollisia ilmatorjuntaohjusjärjestelmiä, joita olisi mahdollista hankkia Suomeen.</p>	
Avainsanat Ohjus, ohjusjärjestelmä, sensori, ohjautuminen, maaliinhakeutuminen	

ILMATORJUNTAOHJUSASEIDEN JA -JÄRJESTELMIEN TEKNIikka

1	JOHDANTO	1
1.1	Tutkimuksen lähtökohdat, tutkimuskysymys	2
1.2	Tutkimuksen näkökulma ja rajaus	3
1.3	Tutkimuksen ongelmat	4
1.4	Keskeiset käsitteet	5
2	ILMATORJUNTAOHJUSASEIDEN TEKNIikka	7
2.1	Moottorit	7
2.1.1	Rakettimoottorit	9
2.1.1.1	Ruutirakettimoottorit	9
2.1.1.2	Nesterakettimoottorit	11
2.1.2	Ilmareaktiomoottorit	12
2.2	Hakupäät	15
2.2.1	Lämpöhakupää	15
2.2.2	Laserhakupää	19
2.2.3	Tutkahakupää	20
2.2.3.1	Lasertutka	20
2.2.3.2	Millimetriaaltotutka	21
2.3	Siivekkeet ja runko	22
2.4	Taistelukärki	26
2.5	Sytytin	29
3	ILMATORJUNTAOHJUSJÄRJESTELMIEN TEKNIikka	34
3.1	Reititysmenetelmät	34
3.1.1	Suuntalinjareitti	34
3.1.2	Takaa-ajoreitti	35
3.1.3	Kulmanopeusreitti	36
3.2	Ohjautusmenetelmät	36
3.2.1	Komento-ohjaus	38
3.2.2	Säteenseuranta	40
3.2.3	Seuranta ohjuksen avulla (track via missile)	41
3.3	Maaliinhakeutumismenetelmät	42
3.3.1	Aktiivinen hakeutuminen	42

3.3.2 Puoliaktiivinen hakeutuminen.....	43
3.3.3 Passiivinen hakeutuminen.....	44
4 SUOMESSA OLEVIA ILMATORJUNTAOHJUSJÄRJESTELMIEN	
VERTAILU.....	46
4.1 Ohjusjärjestelmien esittely.....	46
4.1.1 ItO 90 Crotale NG.....	46
4.1.2 ItO 91 Mistral.....	48
4.1.3 ItO 96 Buk-M1.....	50
4.1.4 ItO 2004 Umkhonto-IR.....	51
4.1.5 ItO 2005 Asrad-R.....	53
4.1.6 ItO 2005M RBS 70.....	55
4.2 Ohjusjärjestelmien vertailu.....	56
5 JOHTOPÄÄTÖKSET.....	59
6 TULEVAISUUSNÄKYMÄT.....	61
LÄHTEET.....	64
LIITTEET.....	69

ACLOS – Automatic Command to Line Of Sight
Automaattinen komento-ohjaus tähtäyslinjalla

AMRAAM – Advanced Medium-Range Air-to-Air Missile
Ilmastaisteluohjus

BEAM RIDER
Säteenseuranta

COLOS – Command Off the Line of Sight
Komento-ohjaus muualta kuin tähtäyslinjalta

GPS – Global Positioning System
Satelliittipaikannusjärjestelmä

IFF – Identify Friend or Foe
Laitte, joka tunnistaa onko kohde oma vai vihollinen

IP – Infrapuna

LOAL – Lock On After Launch
Lukittutuminen maaliin laukaisun jälkeen

LPI – Low Probability of Intercept
Pienitehoinen tutka ("kuiskaava tutka")

MCLOS – Manual Command to Line Of Sight
Manuaalinen komento-ohjaus tähtäyslinjalla

MRTD – Minimum Resolvable Temperature Difference
Pienin erotettavissa oleva lämpötilaero

MTDT – Minimum Detectable Temperature Difference
Pienin havaittavissa oleva lämpötilaero

NETD – Noise Equivalent Temperature Difference
Kohteessa havaittava lämpötilaero

PIM – Pulse Interval Modulation
Pulssipaikkamodulaatio

SACLOS – Semi-Automatic Command to Line Of Sight
Puoliautomaattinen komento-ohjaus tähtäyslinjalla

TVM – Track Via Missile
Seuranta ohjuksen avulla, puoliaktiivinen järjestelmä

ILMATORJUNTAOHJUSASEIDEN JA -JÄRJESTELMIEN TEKNIikka

1 JOHDANTO

Ilma-aseen merkitys on nykypäivänä erittäin suuri. Toisaalta sen merkitys on ollut aiemminkin merkittävä, esimerkiksi ensimmäisessä Persianlahden sodassa, jolloin ilma-asetta käytettiin massamaisesti. Tekniikan kehityksen myötä ilma-aseen merkitys on kasvanut, mutta sen käyttö on myös muuttunut. Toisessa Persianlahden sodassa ei enää pommitettu massamaisesti, vaan käytettiin muun muassa laserohjattuja ohjuksia sekä GPS-järjestelmään perustuvia ohjuksia. Ilma-aseen merkitystä kuvaa myös hyvin Giulio Douhetin näkemys sodankäynnistä. Hänen näkemyksessään ilma-aseella on suurin merkitys sodan voittamisen kannalta. Siinä korostuu ilmaherruuden lisäksi myös teknologia, joka on yksi edellytys sodan voittamiseen [2].

Ilmatorjunta on kehitetty ilma-asetta vastaan. Näin ollen voidaan sanoa, että myös ilmatorjunnan merkitys on kasvanut huomattavasti. Ilmatorjuntaa suoritettiin aluksi vain ammusilmatorjunnan avulla, mutta teknisten puutteiden vuoksi osumatarkkuus oli suhteellisen heikko. Sen vuoksi kehitettiin herätesytyttimet, jotka saivat aikaan sen, että enää ei tarvittu suoraa osumaa lentokoneeseen. Teknologian kehittymisen myötä ilma-aluksien toimintakykyä paranneltiin, jolloin ammusilmatorjunnan kyky vastata tähän heikentyi, vaikkakin myös ammusilmatorjuntaa kehitettiin. Tämän teknologisen kehityksen myötä kehitettiin ohjusilmatorjunta, jonka kehitys on ollut nopeaa. Ohjusilmatorjunnan merkitys on kasvanut yhä suuremmaksi, vaikka ammusilmatorjuntaa ei ole unohdettu.

Nykypäivänä ilmatorjunta voidaan jakaa ammusilmatorjunta-, ohjusilmatorjunta- sekä suoja-järjestelmiin [10]. Näistä kolmesta järjestelmästä ohjusilmatorjunta on noussut hyvin tärkeäksi tekijäksi, sillä se pystyy toimimaan nykypäivänä hyvin monia eri ilma-aseen komponentteja vastaan. Ohjuksen muokattavuuden ansiosta sitä kyetään käyttämään hyvinkin erilaisia maaleja vastaan. Jo esimerkiksi pelkän taistelulatauksen valinnalla kyetään saamaan haluttu vaikutus tiettyä kohdetta vastaan.

Ilmatorjuntaohjuksissa käytettävä tekniikka valitaan usein esimerkiksi halutun tarkoituksiperän perusteella. Toisin sanoen ilmatorjuntaohjuksia voidaan kehittää pelkästään lentokoneita vastaan. Toisaalta nykypäivän ilmauhan ja ilma-aseen moninaisuuden takia ilmatorjuntaohjuksia pyritään kehittämään vastaamaan mahdollisimman monta eri uhkaa vastaan, esimerkiksi lentokoneita ja risteilyohjuksia. Tämä kehitys tulee todennäköisesti yleistymään enemmän, mutta teknologian antamien rajojen puitteissa. Ilmatorjuntaohjukset tulevat aina käymään tietynlaisia kilpajuoksua ilma-aseen kanssa.

Suomessa ilmatorjunnan katsotaan syntyneen 1.7.1925 ensimmäisen ilmatorjuntakoulutusta antavan yksikön perustamisen myötä, vaikka ilmatorjuntatykkejä oli ollut jo kymmenen vuotta aiemmin. Ammusilmatorjunta oli ainut Suomen ilmatorjunta-asejärjestelmä toisessa maailmansodassa ja pitkään sen jälkeenkin. Pariisin rauhansopimuksen ja suurvaltapolitiikan takia vasta 1980-luvun vaihteessa hankittiin ensimmäiset ilmatorjuntaohjusjärjestelmät: Strela 2M ja S-125 M1 Petshora [41].

Ilmatorjuntaohjusjärjestelmät ovat Suomessa vielä suhteellisen uusi asia, mutta järjestelmien tärkeys on huomattu esimerkiksi eri sotien kautta. Ilmaherruus on pystyttävä kiistämään edes jollakin tasolla. Tällä hetkellä yksi maavoimien kehittämisen painopisteistä onkin ilmatorjunnan kehittäminen [42]. Vaikka nykypäivänä Suomessa on sekä ammusilmatorjuntajärjestelmiä että ohjusilmatorjuntajärjestelmiä, näistä jälkimmäistä kehitetään huomattavasti enemmän. Esimerkiksi uutta erittäin lyhyen kantaman ilmatorjuntaohjusjärjestelmää etsitään tälläkin hetkellä ja lisäksi BUK-M1-ilmatorjuntaohjusjärjestelmän korvaajaa etsitään. Uusia ammusilmatorjuntajärjestelmiä ei olla ostamassa, mutta käytössä olevia järjestelmiä tullaan päivittämään ja ne tulevat säilymään aina 2020-luvulle saakka [12].

1.1 Tutkimuksen lähtökohdat, tutkimuskysymys

Ilmatorjuntaohjuksista on tehty paljon tutkimusta ulkomailla ja myös jonkin verran Suomessa. Esimerkiksi Toni Hautaniemi on tehnyt sotatieteiden kandidaatin tutkimuksen ”Kannettavien ilmatorjuntaohjusten kehitysnäkymät” ja Seppo Heiskanen on tehnyt kirjan ”Ohjustekniikan perusteita”. Lisäksi aihetta käsittelevät myös erilaiset tekniikan laitoksen julkaisut, kuten ”Digitaalinen taistelukenttä” ja ”Taisteluvälineet 2020”. Ohjuksista, ohjusjärjestelmistä, tutkista ja räjähteistä löytyy myös paljon tietoa Brassey’s-kirjasarjasta, jota käytetään myös tässä tutkimuksessa suhteellisen paljon. Joiltakin osin lähteet ovat osittain vanhentuneet, mutta se ei heikennä tutkimuksen arvoa, sillä tekniikat ovat pysyneet pääpiirteittäin samoina.

Tämä tutkimus on jatkoa aikaisemmalle kandidaatintutkielmalle ”Ilmatorjuntaohjusaseiden ohjautus- ja maaliinhakeutumisyjärjestelmät –teknologiaselvitys”. Tutkimuksen lähtökohtana onkin avata tutkijalle itselleen, mutta myös lukijalle, eri ohjuksien ja ohjusjärjestelmien tekniikoita ja täten lisätä tutkijan omaa ammattitaitoa omaan aselajiin liittyen.

Tutkimuskysymys: Minkälaista tekniikkaa on käytössä ilmatorjuntaohjuksissa ja ilmatorjuntaohjusjärjestelmissä?

Alakysymys: Mitä tekniikkaa on käytössä moottorin osalta?

Alakysymys: Mitä tekniikkaa on käytössä hakupäiden ja ohjautus- ja maaliinhakeutumislaitteiden osalta?

Alakysymys: Minkälaista tekniikkaa ohjuksissa on käytössä ylipäättänsä?

Alakysymys: Minkälaisia eroja Suomessa olevista ohjuksista löytyy?

Alakysymys: Mikä on ilmatorjuntaohjusten tulevaisuus?

1.2 Tutkimuksen näkökulma ja rajaus

Tutkimusmenetelmänä tulen käyttämään pääasiallisesti asiakirja- ja kirjallisuustutkimusta, mutta myös vertailua käytetään tässä tutkimuksessa. Asiakirja- ja kirjallisuustutkimuksella on vaikea löytää eroja julkisista lähteistä, joten eroavaisuudet selviävät pääosin laitteen suorituskyvyn kautta. Tutkimuksessa käytetään tekniikan laitoksen ohjeita muun muassa viittauksen suhteen [20]. Käsiteltävät tekniikat rajataan käsittelemään niitä yleisellä tasolla ja luvussa neljä käsiteltävät ilmatorjuntaohjusjärjestelmät rajataan käsittämään Suomessa olevat ilmatorjuntaohjusjärjestelmät. Tässä on tärkeää huomata, että ilmatorjuntaohjusjärjestelmiä on käytössä myös laivoissa. Nämä järjestelmät otetaan tässä tutkimuksessa huomioon. Muissa luvuissa käsiteltävät ilmatorjuntaohjusjärjestelmät voivat olla myös Suomen ulkopuolisia järjestelmiä.

Tämä tutkimus ei anna asiantuntijuutta, sillä tässä käsiteltävät asiat kuten ohjuksen ohjautus, hakupäät ja moottorit, ovat hyvin yleisellä tasolla. Tämä tutkimus antaa kuitenkin tavalliselle käyttäjälle tai asiasta kiinnostuneelle hyvät perusteet perehtyä/tutkia asiaa. Tässä tutkimuksessa pyritään yksinkertaisesti helpottamaan ja madaltamaan kynnystä tutustua tekniikkaan ja erityisesti ohjustekniikkaan. Sensorit, joita tässä tutkimuksessa käsitellään, ovat hyvin yleisiä sekä siviili-, että sotilasympäristössä. Sensoreiden käsittely ja esille tuominen on hyvin tärkeää ohjautus- ja maaliinhakeutumisyjärjestelmien kannalta, sillä nämä sensorit ovat tärkeä osa ohjusta.

Ohjuksen moottoria käsiteltävässä luvussa pyritään tuomaan esille ohjuksiin käytössä olevat moottorit sekä osittain myös niiden toimintaperiaatetta. Osa käsiteltävistä moottoreista ei ole ilmatorjuntaohjuksissa käytössä, mutta niiden käsittely on kuitenkin syytä tehdä, sillä ne kuuluvat osaltaan ohjustekniikkaan. Osaa näistä moottoreista on myös mahdollista käyttää erilaisissa sovellutuksissa, kuten esimerkiksi ilmasta-maahan ammuttavissa ohjuksissa. Luvussa 2.3 tullaan käsittelemään siivekkeitä ja runkoa yleisellä tasolla, sillä ohjuksien siivekkeisiin ja runkoon vaikuttavat asiat ovat pääperiaatteiltaan samat, oli kyseessä sitten ilmatorjuntaohjus tai vaikkapa ilmasta ilmaan ammuttava ohjus.

Vaikka tässä tutkimuksessa käsitellään paljon erilaisia ohjukseen ja järjestelmiin liittyviä tekniikoita, käsitellään tässä tutkimuksessa myös Suomessa olevia ilmatorjuntaohjusjärjestelmiä, joista muodostuu tämän tutkimuksen tärkein osa. Pyrin esittelemään nämä ilmatorjuntaohjusjärjestelmät niin, että lukija ymmärtää niiden käyttöperiaatteen. Lisäksi tulen käsittelemään myös sitä, mitä tekniikkaa niissä on käytössä ja miten se vaikuttaa niiden toimintakykyyn. Tämän perusteella vertailen näitä eri järjestelmiä keskenään, jolloin lukijalle tulee ymmärrys näiden järjestelmien erilaisuudesta.

1.3 Tutkimuksen ongelmat

Vaikka yhtenä tämän tutkimuksen tarkoituksena onkin avata ja helpottaa erilaisten henkilöiden suhtautumista ja ymmärtämistä tekniikkaa kohtaan, on tässä tutkimuksessa erinäisiä ongelmakohtia. Ensinnäkin aihe, jota käsitellään, ei ole mitenkään uusi, joten tästä aiheesta on jo paljon kirjallisuutta olemassa. Lisäksi tätä aihetta on käsitelty hyvin paljon erilaisissa tutkimuksissa, vaikka joissain vain tiettyjen asioiden kohdalta. Tämän takia, koska eroavaisuuksia löytyy lähteistä riippuen, on tätä tutkimusta syytä käsitellä kriittisesti.

Internet-lähteet muodostavat myös tietyn ongelman, nimittäin luotettavuuden. Internetin luotettavuudesta osittain kertoo se, että jokainen voi kirjoittaa mitä tahansa tai vaikkapa tahallisesti esiintyä asiantuntijana. Toisaalta mikäli internetissä olevat lähteet ovat sisällöltään samankaltaisia ja mahdollisesti myös kirjojen kanssa yhteneviä, on syytä olettaa, että lähteet ovat luotettavia. Lisäksi tiettyihin internetsivuihin voidaan luottaa suoraan, mikäli ne ovat esimerkiksi tieteellisten lehtien sivut tai muuten yleisesti arvostettuja sivuja. Tästä hyvänä esimerkkinä on internetsivu Jane's, jota käytetään tässä tutkimuksessa.

Lähteitä on tarjolla riittävästi, mutta ongelmaksi muodostuu se, että niissä käsiteltävät asiat ovat lähes samanlaisia, joten eri lähteistä on suhteellisen vaikea saada mitään uutta tietoa tuo-

tua esille. Lisäksi jotkin lähteet ovat jo suhteellisen vanhoja, mutta toisaalta taas järjestelmien toimintaperiaatteet ja toimintatavat ovat pysyneet samoina.

1.4 Keskeiset käsitteet

Tässä tutkimuksessa tullaan käsittelemään hyvin paljon ohjukseen ja ohjusjärjestelmiin liittyviä teknisiä asioita, jotka eivät välttämättä ole tuttuja kaikille. Tästä johtuen on syytä esitellä tässä vaiheessa tämän tutkimuksen kannalta keskeisimmät käsitteet, jotta lukija pystyy seuraamaan tutkimusta paremmin [7]. Tämän tutkimuksen keskeisimpiä käsitteitä ovat ohjus, ohjusjärjestelmä, sensori, sähkömagneettinen spektri, sytytin, heräte, tutka.

Ohjus on taistelulatauksen tai muun sotilaallisen hyötykuorman kuljettava miehittämätön taisteluväline, joka reaktiomootorin kuljettamana tai liikkeeseen saattamana liikkuu kohteeseensa ohjattuna tai hakeutuen joko kokonaan tai osittain maanpinnan yläpuolella olevalla, ennalta ohjelmoidulla tai jatkuvaan mittaukseen perustuvalla, tiettyä mallia noudattavalla reitillä.

Ohjusjärjestelmä on asejärjestelmä, jonka vaikutusosana on ohjus. Se sisältää ohjuksen lisäksi kaikki ne laitteet ja välineet, joita tarvitaan maalin havaitsemiseen ja seuraamiseen, ohjuksen toimintavalmiiksi saattamiseen, laukaisemiseen sekä ohjauskomentojen muodostamiseen ja lähettämiseen.

Sensori on laite, jonka avulla kohteen lähettävä säteily tai kohteesta heijastunut säteily vastaanotetaan ja tulkitaan. Erilaisilla sensoreilla kyetään vastaanottamaan ja tulkitsemaan erilaisia suureita, kuten aaltoliike, paine, kemiallinen emissio, magneettisuus tai kohteesta tuleva sähkömagneettinen säteily. Sähkömagneettisen säteilyn spektrin sensorit riippuvat käytettävästä taajuusalueesta. Sensoreita on aktiivisia ja passiivisia. Aktiivinen sensori lähettää itse säteilyä ja tulkitsee kohteesta heijastuneen säteilyn. Passiivinen sensori taas ei lähetä säteilyä, vaan vastaanottaa ja tulkitsee kohteesta itsestään lähtevää säteilyä [15].

Sähkömagneettinen spektri on kaiken sähkömagneettisen säteilyn, kuten radioaaltojen, infrapunon, näkyvän valon, ultravioletin, röntgensäteilyn ja gammasäteilyn taajuuksien joukko.

Sytytin on räjähdystarvikkeen yksi osakokonaisuus, joka saattaa räjähdystarvikkeen toimimaan kohteessa, kohteen välittömässä läheisyydessä tai tietyn ajan kuluttua [18].

Heräte tarkoittaa kohteesta saatavaa signaalia, jonka avulla kohde kyetään havaitsemaan, paikantamaan tai tunnistamaan. Heräte voi olla peräisin joko heijasteesta tai kohteen omasta emissiosta. Tässä yhteydessä signaalilla tarkoitetaan magneettista, sähkömagneettista, akustista tai sähköstaattista signaalia [18].

Tutka on laite, joka säteilee ja vastaanottaa radiotaajuista sähkömagneettista energiaa. Tämän avulla se kykenee ilmaisemaan kohteesta palautuvan kaiun tai toisiolähetteen [18].

2 ILMATORJUNTAOHJUSASEIDEN TEKNIikka

2.1 Moottorit

Moottorin valintaan vaikuttaa eritoten fysikaaliset ilmiöt, mutta myös halutut ominaisuudet. Näitä ominaisuuksia voivat muun muassa olla ohjuksen nopeus, kantama sekä koko. Ohjuksissa käytettävät moottorit ovat reaktiomoottoreita, joiden toiminta perustuu Newtonin mekaniikan kolmanteen liikelakiin. Jokaiseen vaikutukseen liittyy samansuuruinen, mutta vastakkaisuuntainen vaikutus (*reaktio*). Reaktiomoottorin toimintaidea on siis yksinkertaisesti lähettää ainesuihku tiettyyn haluttuun suuntaan, jolloin siihen itseensä kohdistuu vastakkaiseen suuntaan vaikuttava voima. Helposti voidaan kuvitella, että moottori ”työntää” itseään ilmaan nojaten, mutta näin se ei ole. Kyseessä on ohjuksen sisällä tapahtuva kemiallinen reaktio, joka mahdollistaa moottorin käytön myös tyhjiössä tai hyvin korkealla, missä ilman tiheys on pieni [6, 43].

Ilmatorjuntaohjuksien moottorit ovat reaktiomoottoreita, jotka muodostavat ainesuihkun tiettyyn suuntaan. Usein tätä suihkua kiihdytetään Laval-suuttimen avulla, jolloin suihkun nopeus suurenee ja paine pienenee. Reaktiomoottorit voidaan jakaa kahteen ryhmään, rakettimoottoreihin ja ilmareaktiomoottoreihin [6].

Rakettimoottorien toiminta perustuu kemialliseen reaktioon, jonka polttoaine ja hapetin aiheuttavat. Rakettimoottorit voidaan luokitella käytettävien ajoaineiden olomuodon mukaan nesterakettimeottoreihin ja ruutirakettimeottoreihin. Ruutirakettimeottoreissa käytettävä kiinteä aine sisältää sekä hapettimen että polttoaineen, jotka ovat valettu toisiinsa. Ilmareaktiomoottoreiden toiminta perustuu siihen, että ohjuksessa itsessään on polttoainetta, kun taas tarvittava happi saadaan ulkoilmasta. Ulkoilmasta tullut happi pitää kuitenkin puristaa esim. ahtimen avulla tiheämmäksi, jotta palaminen olisi tehokkaampaa. Ilmareaktiomoottoreista yleisimpiä ovat sysäysputkimoottori, patoputkimoottori sekä suoravirtausmoottori, josta käytetään nimitystä ohivirtausmoottori silloin, kun kyseessä on ohjus [6].

Ohjuksissa moottorityyppinä voi olla kolme erilaista, jotka ovat ulosheittomoottori, lähtömoottori ja matkamoottori. Ulosheittomoottorin tehtävänä on työntää ohjus ulos laukaisuputkesta tai ohjussäiliöstä halutulla nopeudella sellaiselle etäisyydelle, että lähtö- tai matkamoottori voidaan käynnistää ampujan tai laukaisulavetin kannalta turvallisesti. Lähtömoottorin tehtävänä sen sijaan on kiihdyttää ohjus sellaiseen nopeuteen, jolla matkamoottorin käynnistäminen ja ohjuksen aerodynaaminen ohjaus on mahdollista. Matkamoottorin tehtävänä on

yksinkertaisesti saattaa ohjus maksiminopeuteen ja/tai ylläpitää haluttua matkanopeutta [22]. Ohjuksen perusominaisuuksista sekä aerodynaamisista asioista johtuen, moottorityyppejä voidaan käyttää erilaisissa toiminnoissa seuraavasti:

- Ulosheitto: ruutirakettimoottori
- Lähtökiihdytys: ruutirakettimoottori
- Nopea matkalento: raketimoottori tai patomoottori
- Hidas matkalento: suihkurturpiinimoottori tai ohivirtausmoottori.

Tämä jako perustuu hyvin pitkälti aiemmin mainittuihin asioihin, mutta myös yksinkertaisesti suihkuvirtauksen nopeuden mukaan. Eri moottorityyppien perustekijänä on nopeusalue, joka on ratkaiseva tekijä moottorityypin valinnassa. Nämä nopeusalueet eri moottorityypeille ovat:

- Ohivirtausmoottori: 350–500 m/s
- Suihkurturpiinimoottori: 500–750 m/s
- Patomoottori: 1000–1200 m/s
- Ruutirakettimoottori: 2000–2500 m/s
- Nesterakettimoottori: 2500–3000 m/s.

Raketti- ja ilmareaktiomoottoreiden tehokkuutta kuvataan usein ominaisimpulssilla, joka on momentin muutos polttoaineyksikköä kohden. Näiden moottoreiden ominaisimpulssi on siis yhteydessä raketin palokaasujen nopeuteen. Palokaasujen nopeus voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$v_e = g_0 J_{sp} \quad , \text{ missä}$$

$$v_e = \text{palokaasujen nopeus m/s}$$

$$g_0 = \text{painovoiman kiihtyvyys maan pinnalla, 9,81 m/s}^2$$

$$J_{sp} = \text{raketimoottorin ominaisimpulssi sekunteina}$$

Tästä laskukaavasta saatavalla palokaasujen nopeudella voidaan laskea myös Tsiolkovskin lain mukainen raketin ideaalinopeus. Tämän lain mukaan raketin saavuttama nopeus riippuu raketin palokaasujen nopeudesta ja raketin tyhjämassan ja täyden massan välisestä suhteesta. Tätä yhtälöä voidaan soveltaa myös yksivaiheiseen ohjukseen [25, 27].

Tsiolkovskin kaava:

$$\Delta v = v_e \ln \frac{m_0}{m_1}, \text{ missä}$$

Δv = raketin loppunopeus

v_e = palokaasujen nopeus m/s

m_0 = raketin alkumassa kilogrammoissa

m_1 = raketin loppumassa kilogrammoissa

2.1.1 Rakettimoottorit

2.1.1.1 Ruutirakettimoottorit

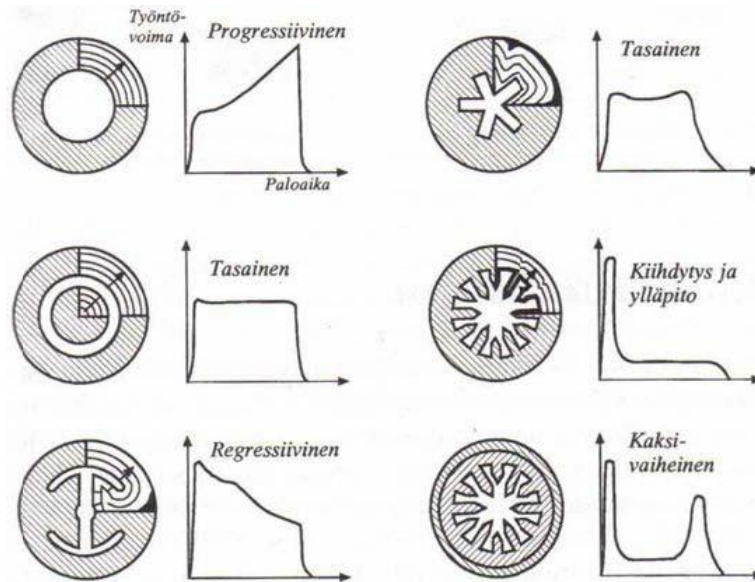
Ruutirakettimoottorin perusrakenne on suhteellisen yksinkertainen, se koostuu viidestä eri kokonaisuudesta, jotka ovat:

- Sytytin
- Ruutilataus
- Palokammio
- Suutin
- Moottorin kuori.

Näiden viiden eri kokonaisuuden toiminnalla saadaan ruutirakettimoottori toimimaan. Sytyttimen sytyttäessä ruutilatauksen, palaminen alkaa halutulla tavalla, jolloin palamisen johdosta syntyvät kaasut täyttävät palokammion. Tässä palokammiossa syntyy riittävä paine, joka mahdollistaa tasaisen palamisen. Tämän jälkeen kuumat kaasut purkautuvat Laval-suuttimesta ulos [16].

Vaikka käytetäänkin nimitystä ruutirakettimoottori, on se nykypäivänä kuitenkin osittain vaiheellista, sillä ruuti on jäämässä pois käytöstä ja muut ajoaineet ovat yleistyneet. Nykyisin yleisimmät ajoaineet koostuvat ammoniumperkloraatista ja alumiinijauheesta [6]. Koska ruutirakettimoottoreissa on kiinteää ainetta, on palamisen kannalta palamispinta-ala oleellista. Tästä johtuen ruuti tai muu kiinteä seos muotoillaan tiettyihin muotoihin, joiden palamispinta-ala voidaan kontrolloida kahdella eri tavalla. Ruutijyviin voidaan joko valaa kuumuutta kes-

tävä kuori tai ruutijyvät voidaan valaa moottorin kuoreen. Tämä moottoriin valaminen on yleisempi tapa vaikkakin se poissulkee tiettyjä ajoaineita. Itse ruutijyvien muodon valintaa ohjaa kaksi asiaa, kiihdytys ja vauhdin ylläpito [3, 32].



Kuva 1. Ruutien poikkileikkausrakenteita [22].

Kiihdytysmoottorin tehtävänä on antaa nopea kiihtyvyys ja kova työntövoima. Tässä tapauksessa ruutijyvien suurempi palamispinta-ala tuottaa halutut ominaisuudet. Kannettavissa ohjusjärjestelmissä erittäin tärkeää on myös ulosheittomoottori, jonka tarkoituksena on irrottaa ohjus alustastaan ilman, että ampuja vahingoittuu. Ulosheittomoottorin toimittua, järjestelmästä riippuen, aloittaa joko kiihdytysmoottori tai matkamoottori toimintansa [3].

Matkamoottorin ruutijyvien tarkoituksena on palaa hitaammin ja ylläpitää tietty nopeus, jolla saavutetaan pidempi ulottuvuus ohjukselle. Tällöin ruudin palopinta-ala on oltava sama koko palamisen ajan, jolloin myös kaasuvirtaus pysyy vakiona. Tasainen palaminen voidaan saavuttaa siten, että ruutilataus on poikkileikkaukseltaan joko tähtimäinen tai sitten ruutilataus on ympyrämäinen [3, 6].

Yksinkertaisilla ruutirakettimeottoreilla on se huono puoli, että niillä ei kyetä säätämään työntövoimaa ajoaineen palamisen aikana. Ratkaisuksi tähän on kehitetty kaksiosaisia ruutirakettimeottoreita, joissa on kaksi erillistä, halutussa vaiheessa sytytettävää ruutilatausta. Näitä moottoreita varten on olemassa kaksi erilaista rakenneperiaatetta, jotka ovat irtoava eriste ja irtoava väliseinä [3].

Irtoava eriste on kahden ruutilatauksen väliin asennettu eriste, jonka tarkoituksena on estää toisen ruutilatauksen palaminen ensimmäisen ruutilatauksen palaessa. Toinen ruutilataus joudutaan sytyttämään erikseen sisäpuolelta, jolloin eriste hajoaa osittain. Irtoava väliseinä toimii taas siten, että ensimmäisen ruutilatauksen palamisen jälkeen toinen ruutilataus sytytetään automaattisesti, jolloin väliseinä murtuu paineen noustessa [3].

Hyvin useissa ilmatorjuntaohjuksissa on käytössä ruutirakettimeoottori, sillä sen ominaisuudet soveltuvat hyvin ohjuksiin. Se on helppo varastoida ja säilyttää, sillä on hyvä nopeus- ja korkeusalue ja moottori on aina käyttövalmis. Esimerkkeinä tästä ovat yhdysvaltalainen PAC-3-ohjus ja venäläinen 9K38M1-ohjus. Näistä ensiksi mainittu ohjus on käytössä Patriot-ilmatorjuntaohjusjärjestelmässä ja jälkimmäinen ohjus on käytössä Buk-M1-ilmatorjuntaohjusjärjestelmässä, joka on myös Suomessa käytössä [49, 61].

2.1.1.2 Nesterakettimeoottorit

Nesterakettimeoottori toimii samalla periaatteella kuin ruutirakettimeoottorikin, mutta nesterakettimeoottorin tärkeimmät osat ovat hiukan erilaisia kuin ruutirakettimeoottorissa. Nämä viisi kokonaisuutta nesterakettimeoottorissa ovat:

- Paineistus- tai syöttöjärjestelmä
- Polttoainesäiliö
- Hapetinsäiliö
- Suutin
- Palokammio.

Nesterakettimeoottorin toiminnalle ominaista on se, että polttoaine ja hapetin kyetään syöttämään palokammioon hyvinkin hallituissa tiloissa, jotka ovat paine, lämpötila ja nopeus. Näiden avulla saadaan muodostuneen seoksen itsesytyminen, jolloin seos kaasuuntuu ja kasvat-
taa palokammion painetta. Muodostunut kaasu puolestaan virtaa ulos suuttimesta ja aiheuttaa moottorille sen työntövoiman. Nesteiden paineistaminen voidaan suorittaa kahdella eri tapaa, joko puristamalla/paineistamalla nestesäiliöitä tai sitten käyttää erillisiä pumppuja nestesäiliöiden ja palokammion välillä.

Nestesäiliön puristamisessa on kuitenkin tiettyjä ongelmia, joista suurin on se, että näille säiliöille on tietty maksimiyläraja. Tämä yläraja aiheutuu siitä, että ne yksinkertaisesti painavat liikaa. Toisaalta on huomioitava, että tämä rajoittaa usein ainoastaan suuria ohjus- tai raketti-

järjestelmiä. Tästä johtuen erillisiä pumppuja on kehitetty siten, että on saatu aikaiseksi turbo-pumppujärjestelmä. Pienemmissä järjestelmissä voidaan kuitenkin käyttää edelleen tätä nestesäiliön paineistamista, sillä yläraja ei tule vastaan [16, 36].

Nesterakettimootoreissa on mahdollista olla joko kaksi erillistä säiliötä hapetinta ja polttoainetta varten tai yksi yhteinen säiliö. Näitä kutsutaan nestemäiseksi yksittäisajoaineeksi ja nestemäiseksi kaksoisajoaineeksi. Kaksoisajoaineelle tyypillisiä komponentteja ovat muun muassa tyypitetetroksidi ja aerotsiini sekä happi ja vety. Yksittäisajoaine pystyy spontaaniin reaktioon kaasun ja kuumuuden avulla. Tämä reaktio voidaan tuottaa joko katalyytin avulla tai pelkästään kuumuuden avulla. Yksittäisajoainetta käyttäville ohjuksille tyypillisin ajoaine on hydratsiitti, johon tosin käytetään katalyyttia, jolloin palamisen tehokkuutta saadaan lisättyä. Kaksoisajoaineet voivat aiheuttaa reaktion joko joutumalla kosketuksiin toistensa kanssa tai ne voidaan käynnistää sytyttimen avulla. Ominaista näille kaksoisajoaineille on suuri tehokkuus ja helposti kontrolloitava työntö [3, 6].

Kaksoisajoaineita käytetään hyvin usein silloin, kun on tarve saada korkea impulssi. Tällöin ajoaine ja hapetin ovat erillisissä säiliöissä, jotka paineistetaan ainoastaan silloin, kun moottori on käynnissä. Koko tämä järjestelmä voi olla joko täysin kryogeeninen tai osittain kryogeeninen. Tämä tarkoittaa sitä, että tietyt komponentit täytyy pitää erittäin alhaisessa lämpötilassa, jopa noin -200 °C :ssa. Kryogeenisen järjestelmän käyttö on kuitenkin suhteellisen harvinaista ohjuksissa.

Ajoaineen ja hapettimen ulostulo omista säiliöistään voidaan suorittaa käyttämällä esimerkiksi kaasupulloja, jolloin kaasu pakottaa ajoaineen ja hapettimen palokammioon. Näiden kahden komponentin kulkeminen palokammioon on suhteellisen tärkeää. Nämä komponentit voivat kulkea joko tietynlaisten reikien lävitse tai suoraan ilman mitään estäviä levyjä tai vastaavia. Kun kyseessä on itsestäänsyttyvä ajoaine, jolloin ajoaineen ja hapettimen sekoittuminen on tärkeää, käytetään reikiä ajoaineen kulkemiseen säiliöstä palokammioon. Nämä reiät suunnitellaan tarkasti ja ne voivat luoda tietynlaisen kuvion, jotta ajoaineen ja hapettimen virtaus kohtaavat palokammiossa oikeassa kohdassa [3, 16].

2.1.2 Ilmareaktiomootorit

Ilmareaktiomootorit voidaan jakaa kolmeen ryhmään, suihkaturpiinimootoreihin, ohivirtausmootoreihin ja patomootoreihin. Kaikille näille moottoreille on kuitenkin tyypillistä se, että moottorissa oleva kaasu on saatava ulos moottorin ulkopuolella vallitsevaa nopeutta suu-

remmalla nopeudella. Toisin kuin rakettimeoottoreissa, ilmareaktiomoottoreissa tapahtuvan reaktion toisena komponenttina on ulkoilmasta moottoriin virtaava happi, joka on puristettava ulkoilmaa tiheämmäksi, jotta palaminen olisi mahdollisimman tehokasta.

Suihkuturpiinimoottori on ilmareaktiomoottoreista yleisin ja se koostuu seuraavista osista:

- Ilmanotto
- Kompressori
- Polttoainesäiliö
- Polttoaineen syöttöjärjestelmä
- Palokammio
- Turpiini
- Suutin.

Suihkuturpiinimoottorin toiminta perustuu siihen, että moottorin läpi menevälle virtaukselle annetaan hyvin suuri muutos. Ilmanoton tehtävänä on koota tarvittava ilmamäärä palamista varten ja työntää se kompressoriin tietyllä nopeudella. Yleensä tämän ilmapuristuksen nopeus tulee olla alle äänennopeuden. Kompressori puolestaan puristaa siihen saapuvan ilman palamista tapahtumaan vaadittavaan paineeseen. Suurella nopeudella virtaava ilma pakotetaan kompressorista palokammioon, jossa itse palamisreaktio tapahtuu [16, 21].

Palokammioon ruiskutetaan polttoainetta, joka on hyvin usein kerosiinia. Tämän ansiosta palokammion lämpötila nousee jopa 1500 °C:seen. Tämä palamista tapahtuma vapauttaa suuren määrän energiaa, jolloin ilmapuristukselle saadaan suuri lämpötilan ja tilavuuden muutos. Tämän prosessin jälkeen ilma ja palokaasut työntyvät palokammion turpiiniin. Turpiinin tehon ylittäessä kompressorin tarvitseman tehon moottorin kierrosnopeus kasvaa. Turpiinin läpi virtaava kaasu kuitenkin menettää energiaa, joten suuttimen on kiihdytettävä kaasu suureen nopeuteen. Kuten useimmissa suuttimissa, myös suihkuturpiinimoottorin suutin on ulosvirtausuuntaan kapeneva [16, 29].

Ohivirtausmoottori on kehitetty suihkuturpiinimoottorin pohjalta, joten moottorin pääosat ja toimintaperiaate on suurimmilta osin sama. Suurin ero on kuitenkin siinä, että moottorin läpikulkevaa ilmamäärää lisätään ohjaamalla pääosa tulevasta ilmasta palokammion ja turpiinin ohi suoraan suuttimeen. Ohivirtausmoottorin keskeisin lähtökohta on se, että samankokoista suihkuturpiinimoottoria vastaava työntövoima saadaan pienemmällä suihkuvirtausnopeudella.

Ohivirtausmoottorissa menetettävän suihkuvirtauksen liike-energian määrä on pienempi, joka puolestaan pienentää polttoaineenkulutusta [16, 28].

Patomoottori luetellaan ilmareaktiomoottoreihin, sillä ilmanotossa syntyvää patopainetta käytetään hyväksi. Tästä syystä patomoottorit eivät kuulu ruutirakettimoottoreihin eivätkä nesterakettimoottoreihin, vaikka patomoottorit voidaankin jakaa ruuti- ja nestepatomoottoreihin.

Patomoottorin pääosat ovat:

- Polttoainesäiliö
- Ilmanotto
- Palokammio
- Polttoaineen syöttöjärjestelmä
- Sytytysjärjestelmä
- Liekinpidätin
- Suutin.

Patomoottorin toimimiseen voi riittää jopa 45 m/s, mutta tällöin patomoottorin tehokkuus on todella huono. Vasta yliääninopeuksilla patomoottorin tehokkuus on erittäin hyvä ja jopa parempi kuin suihkukurpiinimoottorilla tai ohivirtausmoottorilla. Tämän lisäksi patomoottorit voivat olla huomattavasti pienempiä kuin suihkukurpiinimoottorit ja ohivirtausmoottorit, joten patomoottoreiden käyttö ohjuksissa on yleistä. Tästä hyvänä esimerkkinä on Akash-ilmatorjuntaohjusjärjestelmä. Se on vuonna 1990 valmistettu intialainen järjestelmä, jossa on käytössä ruutipatomoottori [24, 50].

Yliääninopeudella lentävän ohjuksen kärjessä ilma tiivistyy ja samalla ilman nopeus, paine ja lämpötila muuttuvat. Yliääninopeudella virrannut ilma hidastetaan aliääniseksi ennen kuin se ehtii palokammioon, jotta palamiselle olisi mahdollisimman optimi paine ja lämpötila. Syöttöjärjestelmä päästää palokammioon polttoainetta, jolloin nestepatomoottorin ollessa kyseessä ilman ja polttoaineen seos sytytetään sytytystulpan avulla. Kun kyseessä on ruutipatomoottori, polttoaine syötetään palokammioon tietyssä lämpötilassa ja paineessa, jotta polttoaineen ja ilman seos kykenee syttymään itsestään.

Palokammiossa syntyneet palokaasut ohjataan suuttimeen, jossa kaasuvirtaus kiihtyy. Liekinpidättimen tehtävänä on estää palamistapahtuman leviämistä ilmanottoon. Patomoottorissa on erityisen tärkeää se, että patopaine ei saa laskea liian alhaiseksi, sillä muuten moottori sam-

muu. Tämä saattaa tapahtua silloin, kun ohjus joutuu jyrkkään liikkeeseen, sillä silloin ohjuksen asento ilmavirtaukseen nähden muuttuu ja paine pienenee. Jo 10° muutos mahdollistaa moottorin sammumisen [16, 24].

Patomoottorit ovat hyvin tehokkaita, mutta ne ovat aina tarvinneet jonkinlaisen lähtömoottorin. Aikaisemmin lähtömoottorit sijoitettiin ohjuksen ympärille, mutta se aiheutti ohjukselle lisää painoa ja kokoa. Tämän ongelman ratkaisemiseksi kehitettiin palokammioon sijoitettava ruutirakettilähtömoottori. Tätä ratkaisua kyetään käyttämään niin ruutipatomoottoreissa kuin nestepatomoottoreissa. Ongelmana tässä ratkaisussa on kuitenkin se, että ruutirakettilähtömoottori ja patomoottori tarvitsevat erilaisen suuttimen. Ratkaisuna tähän on se, että ruutirakettilähtömoottorin kapeampi suutinosa laukaistaan irti paloajan loputtua. Jotta ohjukselle ei tulisi toimintahäiriöitä, on myös ohjuksen kärjen ilmanottoaukkojen oltava kiinni. Nämä ilmanottoaukot aukaistaan samanaikaisesti, kun suutinosa laukaistaan irti. Ohjuksen toiminnan kannalta kriittisin kohta on patomoottorin käynnistyminen. Sen on käynnistytävä samanaikaisesti, kun ruutirakettilähtömoottori sammuu [16, 24].

2.2 Hakupäät

2.2.1 Lämpöhakupää

Lämpösäteilyssä on otettava huomioon emissiivisyys ja reflektiivisyys. Emissiivisyys tarkoittaa kappaleesta aiheutuvan säteilyn lämpötehon suhdetta vastaavan mustan kappaleen säteilyn lämpötehoon. Reflektiivisyys puolestaan tarkoittaa kappaleen heijastavuutta. Kaikki kappaleet, joiden emissiivisyys on >0 ja lämpötila >0 K lähettävät lämpösäteilyä. Näillä kahdella ominaisuudella, emissiivisyydellä ja reflektiivisyydellä, on huomattava merkitys lämpökameran käyttöä ajatellen. Muita käyttöön vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa sääolosuhteet, havaintoetäisyys ja maalin ominaisuudet [14, 22].

Infrapunailmaisimen, joka kuuluu osana lämpökameraan, tehtävänä on muuttaa siihen tullut säteily jännite- tai virtapulsseiksi. Termisen alueen infrapunailmaisimet voidaan jakaa kahteen eri ryhmään: termisiin ilmaisimiin ja kvantti-ilmaisimiin. Termisissä ilmaisimissa sähkömagneettinen säteily kohottaa ilmaisimateriaalin lämpötilaa, joka puolestaan muuttaa ilmaisimateriaalin sähköisiä ominaisuuksia. Nämä termiset ilmaisimet voidaan jakaa pyro- ja ferrosähköisiin ilmaisimiin, bolometri-ilmaisimiin sekä termoelementti-ilmaisimiin. Näiden kolmen eroavaisuudet tulevat esille ilmaisimen kuvan muodostamisessa sähköön avulla. Kvantti-ilmaisimissa sähkömagneettinen säteily sen sijaan vaikuttaa suoraan ilmaisimateri-

aalin atomeihin. Tämän vaikutuksen ansiosta nämä atomit vapauttavat esimerkiksi elektroneja, jotka joko muuttavat ilmaisimateriaalin sähkönjohtavuutta tai tuottavat mitattavan virran tai jännitteen [14].

Vaikka nämä termisen infrapuna-alueen ilmaisimet jaettiin kahteen eri pääryhmään, termisiin ilmaisimiin ja kvantti-ilmaisimiin, tarkoittaa tämä jako samalla myös jakoa jäähdyttämättömiin ja jäähdytettäviin ilmaisimiin. Siviilikäytössä on olemassa kummankin ryhmän ilmaisimia, mutta sotilassovellutuksissa on käytössä lähes poikkeuksetta vain kvantti-ilmaisimia, sillä termisillä ilmaisimilla ei ole saatu riittävää suorituskykyä. Tämä taas puolestaan on johtanut siihen, että sotilaspuolella kehittämistyö on suunnattu kvantti-ilmaisimiin. Nykyään kuitenkin termisillä ilmaisimilla voidaan saavuttaa yhtä hyvä kuvanlaatu kuin kvantti-ilmaisimilla, mutta tähänkin on vielä tiettyjä rajoituksia.

Lämpösensorijärjestelmien kannalta yksi olennaisimmista ominaisuuksista on pienin erotettavissa oleva lämpötilaero, MRTD (Minimum Resolvable Temperature Difference), joka riippuu sensorin lämpöherkkyydestä ja erottelukyvystä. Vaikka MRTD ottaa huomioon muun muassa sensorin kohinan, resoluution ja optiikan virheet, on kuitenkin muistettava, että MRTD kuvaa ainoastaan pienintä havaittavaa lämpötilaeroa sensorilla eikä maalissa. MTD (Minimum Detectable Temperature Difference), pienin havaittavissa oleva lämpötilaero, kuvaa pienintä lämpötilaeroa, jolla kyetään erottamaan maali taustasta. Yleensä maalina käytetään neliön tai ympyrän muotoista maalia. Näissä kummassakin ominaisuuksissa on huomiotava se, että nämä molemmat ominaisuudet ovat järjestelmän herkkyyttä kuvaavia lukuja, joihin vaikuttaa laitteen käyttäjä [14, 15].

Lämpökameran ilmaisimien suorituskykyä voidaan ilmaista myös kertomalla, mikä lämpötilaero vastaa ilmaisimen omaa kohinatasoa, NETD (Noise Equivalent Temperature Difference). NETD mittaa siis kohteen lämpötilaa, jolla ilmaisimessa saavutetaan signaalikohinasuhteeksi 1. NETD on optiikan ja ilmaisimen yhteistulos, joten se perustuu olennaisesti optiikkaan ja optiikan kokoon. Suuremmalla optiikalla on mahdollista kerätä enemmän säteilyä kohteesta, jolloin NETD arvo on pienempi. Ohjuksen mitat kuitenkin rajoittavat hakupään valovoimaisuutta ja kokoa. Parhaat jäähdyttämättömät ilmaisimet saavat NETD-arvoksi 0,1 K, kun taas jäähdytetyt matriisi-ilmaisimet pääsevät 0,025–0,05 K NETD-arvoihin. On muistettava, että vaikka kohina voi olla pienempää, sitä silti esiintyy myös jäähdyttämättömissä ilmaisimissa [14, 15].

Lämpöhakupään tehtävänä on etsiä maali, lukittua siihen ja antaa asean ohjauselektronikalle tarvittava suuntatieto asean pitkittäisakseliin nähden asean ohjaamiseksi maaliin. Ohjuksien hakupäissä olevien ilmaisimien valmistusteknologiasta, maalityypeistä sekä toimintaympäristöstä riippuen on mahdollista käyttää useita eri ilmakehän transmissioikkunoita [15].

Aallonpituus	Ikkunan/alueen nimike
0.3 – 0.9 μm	Näkyvän valon alue
1.0 μm	Lähi-infrapunan alueen kapea ikkuna
1.3 μm	Lähi-infrapunan alueen kapea ikkuna
1.6 μm	Lähi-infrapunan alueen kapea ikkuna
2.2 μm	Lähi-infrapunan alueen kapea ikkuna
3 – 5 μm	Terminen infrapuna-alue
8 – 14 μm	Terminen infrapuna-alue

Taulukko 1. Transmissioikkunat [15].

Ilmatorjuntaohjusten yhteydessä käytetään myös nimityksiä I-alue (2.2 μm :n ikkuna) ja II-alue (3–5 μm :n ikkuna). Ilmatorjuntaohjukset, jotka hakeutuvat lentokoneen kuumiin osiin, kuten moottoriin, käyttävät 3–5 μm :n aallonpituuksilla toimivia ilmaisimia. Ongelmaksi muodostuu tällöin sumu ja sade, sillä näiden partikkelikoko on hyvin lähellä ilmaisimen aallonpituutta. Sen sijaan ohjuksissa, jotka käyttävät II-alueen ilmaisimia, ei tätä ongelmaa ole. Toisaalta taas näiden ohjuksien ongelmana on se, että ne eivät kykene hakeutumaan suoraan kohti tuleviin lentokoneisiin [15].

Uusimmissa lämpötähtäimissä sekä ilmatorjuntaohjuksien hakupäissä käytetään hyväksi 8–12 μm :n aluetta, sillä kohteet, jotka ovat yhtä lämpimiä kuin taustansa, säteilevät eniten lämpöä noin 10 μm :n aallonpituudella. Johtuen suuremmasta aallonpituudesta, on savun, pölyn ja sumun läpäisy parempaa kuin lyhemmillä aallonpituuksilla. Toisaalta 8–12 μm :n alueella voidaan toimia vain riittävän kuivassa ilmastossa.

Tällä hetkellä hakupäiden ilmaisimissa käytetään muun muassa lyijysulfidia tai kadmiumelohopeatelluridia, koska näillä aineilla on todella hyvä herkkyys sähkömagneettisen spektrin eri alueilla. Esimerkiksi juuri lyijysulfidia käytetään ilmaisimissa, jotka on suunniteltu toimimaan 2–3 μm :n aallonpituuksilla, kun taas kadmiumelohopeatelluridia käytetään 8–15 μm :n aallonpituuksilla. Nykyään ohjuksissa oleva hakupää toimii kahdella eri aallonpituusalueella ja tätä

hakupäätä kutsutaan kaksikanavaiseksi hakupääksi. Tämän menetelmän ansiosta soihtujen merkitys on pienentynyt huomattavasti, sillä ne kyetään suodattamaan pois. [4, 22].

Lämpösäteilyyn hakeutuvan ohjuksen on pystyttävä päättelemään maalin sijainti. Yksilmaisinelementtihakupäällä varustettu ohjus, jossa on kuvaava matriisi-ilmaisimien tai pyyhkäisymekaniikka, kykenee päättelemään maalin sijainnin suoraan kuvasta. Mikäli ohjus on kuitenkin varustettu matriisi-ilmaisimella, on ongelmana ollut monielementtimatriisien korkea hinta ja mikäli ohjus on varustettu pyyhkäisymekaniikalla, on ongelmana ollut muun muassa hinta ja heikompi kyky kestää kiihtyvyyttä. Tämän vuoksi hakupäissä käytetään vielä yksielementtisiä ilmaisimia, joissa ei ole minkäänlaista pyyhkäisyä. Tällöin hakupää kykenee aistimaan ainoastaan pistemäisiä herätteitä.

Maalin sijainnin saamiseksi on kuitenkin mahdollista moduloida maalista saatavaa signaalia. Tämä modulointi mahdollistetaan asettamalla hakupään eteen pyörivä kiekko, retiikkeli, jonka ansiosta signaali moduloituu eri lailla sen mukaan, mikä on maalin ja ohjuksen pituusakselin välinen kulma. Retiikkelin rakojen muoto on valittu sellaiseksi, että sen perusteella voidaan erottaa pistemäinen lämpölähde suurikokoisista taustakuvioista. Signaalin modulaatio on voimakasta, kun ohjuksen ja maalin välinen kulma on suuri. Tällöin ohjuksessa sijaitseva ohjauselektroniikka kääntää ohjusta kohti maalia. Signaalin modulaatiota ei tapahdu ollenkaan silloin, kun maali on ohjuksen pituusakselin suunnassa. Toisaalta modulaation loppuminen johtaa siihen, että ohjus alkaa vaappua. Tämä vaappuminen on kuitenkin ratkaistu uudemmissa ohjuksissa käyttämällä pyörivää optiikkaa ja paikallaan pysyvää levyä pyörivän sijaan. Tällöin hakupää saa moduloidun signaalin, vaikka maali olisikin suoraan edessä [6].

Ohjuksen hakupäätä pyritään häiritsemään lähettämällä sille oikean kaltaista moduloitua signaalia, jolloin ilmaisimen vastaanottaessa tätä moduloitua signaalia ilmaisimien luulee maalin olevan sivussa ohjuksen lentosuunnasta ja kääntää ohjusta. Pyöriviin modulointikielakkeihin perustuvissa järjestelmissä tämä aiheuttaa sen, että ohjus kääntyy liikaa sivuun, jolloin ohjus kadottaa maalin ja samalla menettää lukituksen maaliin. Jotta lukitus menetetään, edellyttää se oikeataajuista ja -vaiheista moduloivaa signaalia. Tämä taas edellyttää joko ennakkotietoja kohteena olevasta hakupästä tai häirintälähettimen on etsittävä oikeat arvot häirintäsignaalille. Häirintätehon ei tarvitse olla suuri, jotta häirintä saataisiin ohjuksen hakupäähän, mutta oikean modulointitaajuuden löytäminen sen sijaan on kriittistä. Tämä modulointitaajuus voidaan löytää joko valaisemalla ohjusta laserilla ja mittaamalla retiikkelin aiheuttama modu-

laatiotaajuus takaisin heijastuvasta säteilystä tai tarkkailemalla häirinnän vaikutusta ohjukseen [15, 22].

Lämpöhakupäät soveltuvat ominaisuuksiltaan hyvin erittäin lyhyen tai lyhyen kantaman ilmatorjuntaohjuksiin. Näitä ohjuksia on tehty paljon ja niitä kehitetään yhä eteenpäin. Hyvin usein tällaiset ilmatorjuntaohjukset, joissa on lämpöhakupää, ovat joko olalta laukaistavia tai sitten joltain pieneltä alustalta, mutta myös suurempikokoisia ohjuksia ja lavetteja myös löytyy. Esimerkkejä lämpöhakuisista ilmatorjuntaohjusjärjestelmistä on Igla-1, FIM-92 Stinger ja Umkhonto-IR. Näistä kolmesta järjestelmästä Igla-1 ja FIM-92 Stinger ovat olalta laukaistavia, kun taas Umkhonto-IR on suuresta koostaan johtuen lavetilta pystysuoraan ammuttava ilmatorjuntaohjus.

2.2.2 Laserhakupää

Laser tuottaa lyhytaikaisen, suuritehoisen tarkasti suunnatun valonsäteen, jota käytetään lähes kaikissa digitaalisen taistelukentän osa-alueissa. Vaikka laserlähettämiä on paljon erilaisia, koostuvat laserlähettimet kuitenkin neljästä peruskomponentista, jotka ovat aktiivinen laser-materiaali, viritysmekanismi, heijastava peili sekä puoliläpäisevä peili.

Laserhakupäässä on herkkä, tietyllä aallonpituudella toimiva laserilmaisain ja vastaanotin. Ohjuksessa sijaitseva ilmaisain on sijoitettu hyrrävakavoidulle tasolle, jonka hyrrät laukaistaan pyörimään ohjuksen laukaisun yhteydessä ruutipanoksien kaasun avulla. Lasersäteily koodataan sopivalla menetelmällä, jonka purkamiseen ainoastaan vastaanotin kykenee. Ohjus haakeutuu maalista heijastuvan säteilyn perusteella kohti intensiteettikeskipistettä, eli maalista aiheutuvan suurimman säteilykohdan suuntaan hakupään antamien ohjaukskomentojen mukaisesti. Huonosti heijastava materiaali, savu ja sumu vaikuttavat hakupään toimintaan haitallisesti [6].

Laserhakupää käyttäytyy samalla tavalla kuin tutka. Se etsii heijastuvan kohteen ja pyrkii ohjaamaan joko suoraan kohteeseen tai ennakkopisteeseen. Etäisyydenmittaus parantaa tarkkuutta ja laserhakupäätä kyetään käyttämään myös sytyttimen yhteydessä. Laserhakupää on periaatteessa lasertutkahakupää, kun se löytää kohteen. Tällöin se siirtyy etäisyydenmittaukseen. Laserhakupään koodaus on salaamista, jolla pyritään siihen, että sitä ei kyettäisi häiritsemään eikä se saisi virheellistä tietoa.

2.2.3 Tutkahakupää

Tutkahakupää on eritoten ilmataisteluohjuksissa erittäin tärkeä, sillä sen avulla ohjus kykenee itsenäiseen toimintaan. Useimmiten ilmataisteluohjuksien hakupäät saavat myös maalin päivitystä koneen omalta tutkalta, jolloin hakupäällä on tieto maalin etäisyydestä ja suunnasta, vaikka se ei vielä olisikaan hakupäälle sopivalla etäisyydellä. Ilmatorjuntaohjuksissa tutkahakupää on myös hyvin yleinen. Ohjus voi saada päivitystä maassa sijaitsevalta tutkalta tai asemalta tietoa maalista, jolloin toiminta on periaatteessa samanlaista kuin ilmataisteluohjuksissa. Ilmatorjuntaohjuksien tutkahakupäät toimivat eri tutkien, kuten esimerkiksi pulssidopplertutkan yleisten periaatteiden ja tekniikoiden mukaisesti. Ilmatorjuntaohjuksien hakupäiden taajuusalueet voivat vaihdella haluttujen ominaisuuksien mukaan, joten mitään tiettyä yhtä taajuutta ei käytetä. Esimerkkejä erilaisista tutkahakupäistä:

- Amerikkalaisessa AIM-120 AMRAAM -ilmataisteluohjuksessa on käytössä tutkahakupää, joka käyttää I-tutka-alueita (8–10 GHz) [45]
- Venäläisessä R-27AE-ilmataisteluohjuksessa on käytössä 9B-1103M monopulssidopplertutka, mutta tästä kehittyneempiä versioita voidaan käyttää myös ilmatorjuntaohjuksissa [67]
- Thalesin 4A-sarjan tutkahakupäissä voi olla käytössä eri tutka-alueita, esimerkiksi joissain järjestelmissä voi olla K_a-tutka-alue (24–40 GHz) [66]
- Ranskalaisvalmisteisessa MICA-ilmatorjuntaohjusjärjestelmässä on käytössä pulssidopplertutkaan perustuva AD4A hakupää, joka käyttää J-tutka-alueita (10–20 GHz) [44]
- Aster-ilmatorjuntaohjusjärjestelmässä on myös käytössä pulssidopplertutkaan perustuva AD4A hakupää, joka käyttää K_u-tutka-alueita (12–18 GHz) [47].

Edellisissä esimerkeissä on otettava huomioon, että tiedot voivat vaihdella eri lähteiden mukaan ja joissakin voi olla puhe eri tutka-alueista. Joskus tutka-alue on voitu määrittellä Naton määritelmien mukaan ja joskus taas yleisten periaatteiden mukaan. Lisäksi on kyettävä olemaan kriittinen joidenkin järjestelmien osalta, jotka voivat olla vielä osittain testivaiheessa.

2.2.3.1 Lasertutka

Lasertutkat ovat aktiivisia laitteita, jotka toimivat samalla tavalla kuin mikrometrialueen tutkat sillä poikkeuksella, että niissä on paljon korkeampi taajuus. Korkea taajuus aiheuttaa sen, että muun muassa lasertutka on paljon herkempi ottamaan häiriötä ilmakehän partikkeleista,

mutta toisaalta lasertutkan eri osat ovat pienempiä ja tarkkuus parempi. Lasertutkissa on kaipa säteen keilanleveys, joka rajoittaa maalien määrää, mutta samalla se on myös hyvin tehokas. Lasertutkat rakennetaan usein tietyille aallonpituuksille, jolloin voidaan heikentää ilmakehän vaikutusta lasertutkan toimintaan. Useimmat lasertutkat rakennetaankin 1.06 μm :n tai 10.6 μm :n aallonpituuksille [8].

Lasertutkajärjestelmiä käytetään usein esimerkiksi passiivisten infrapunaseurainten ja infrapunakameroiden kanssa. Tällöin yleensä jälkimmäisenä mainittuja järjestelmiä käytetään maalin hakuun. Lasertutkia voidaan myös käyttää millimetrialueen ja mikrometrialueen tutki- en kanssa, joka parantaa muun muassa etäisyyden tarkkuutta. Lasertutkan näkemät maalit voidaan jakaa kahteen ryhmään niiden heijastuksen perusteella. Nämä kaksi ryhmää ovat yksittäisen heijastuksen ryhmä ja moniosuman heijastuksen ryhmä.

Yksittäisen heijastuksen ryhmässä maalista aiheutuvassa heijastuksessa on yksi suuri ja dominoiva heijastus, joka heijastuu lähes joka kerta, kun lähetetty pulssi osuu siihen. Tämän yksittäisen heijastuksen ympärillä tapahtuu usein myös Gaussin jakauma. Tämän avulla on mahdollista laskea havaitsemistodennäköisyys. Moniosuman heijastuksen ryhmässä maalilla on monta heijastavaa kohtaa, joilla kaikilla on tietyllä tapaa samanlaisia ominaisuuksia heijastuksen suhteen. Oletuksena on, että jokainen heijastava kohta jakautuu Gaussin jakauman mukaan, jolloin maalin hajanaiset heijastuskohdat voidaan esittää kokonaisheijastuksena Rayleigh'n jakauman mukaan [8].

2.2.3.2 Millimetriaaltotutka

Millimetriaaltotutkat kuuluvat 30–300 GHz:n alueelle, jolloin niiden aallonpituus on 1–10 mm:n luokkaa, jonka johdosta tutkaan tarvittavat komponentit ja laitteet voidaan rakentaa hyvinkin pieniksi. Millimetriaaltojärjestelmät muistuttavat hyvin paljon sekä infrapunajärjestelmien että lasertutkajärjestelmien ominaisuuksia. Näitä ominaisuuksia ovat muun muassa pieni koko, pieni paino sekä hyvä etäisyysresoluutio. Millimetriaallot läpäisevät infrapunasäteitä paremmin ilmakehän epäpuhtauksia, mutta kuitenkin huonommin kuin mikroaallot. Koska millimetriaaltotutkalla on hyvä doppler-resoluutio, sillä on helppo havaita hitaasti liikkuvia maaleja ja poistaa tutkavälke tehokkaasti [15].

Tällä hetkellä suurin osa millimetriaaltotutkista käyttää 94 GHz:n aluetta, jolloin esimerkiksi passiivinen millimetriaaltotutka kykenee havaitsemaan metallipinnoista tulevat heijastukset kylmältä taivaalta. Passiivisien millimetriaaltotutkien ongelmana on kuitenkin kuvien muo-

dostumisaika, joka on nykyteknologian tasolla hidask. Kun käytössä on 94 GHz:n alue, tulee ohjuksen antennin kyetä kääntymään riittävän hyvin ohjuksen rakenteen sisällä. Tämä kääntösäde on maalin ja ohjuksen pitkittäissuunnan välinen kaari, joka ominaisuuksista ja järjestelmästä riippuen voi olla 35° tai jopa sen yli.

Millimetriaaltotutkia käytetään nykypäivänä esimerkiksi panssarintorjuntaohjuksissa, mutta niiden käyttö ilmatorjuntaohjuksissa ei ole mitenkään mahdollista. Niitä käytetään panssarintorjuntaohjuksissa siksi, koska niillä on mahdollisuus havaita paikallaan oleva maali. Millimetriaaltotutkia voidaan käyttää myös suuren alueen etsintään, koska näillä tutkilla on suuri säteenleveys [8].

2.3 Siivekkeet ja runko

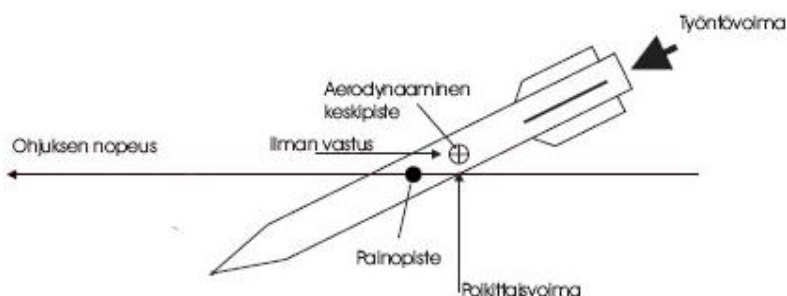
Ohjukset ovat muodoltaan ympyräsylintereitä ja rungon eri osat ovat liitettynä yhteen. Koska ohjus kokee suuria rasituksia, voidaan runkoa vahvistaa asentamalla pitkittäissuunnassa olevia tankoja ja tukia. Ohjuksen rungon materiaalina käytetään usein kevytmetalleja, mutta myös erilaisia kuitumateriaaleja kuten lasikuitua. Rungon materiaalin valintaan vaikuttaa myös se, millä nopeusalueella ohjus lentää. Mikäli ohjus lentää aliaääninopeuksilla, voidaan ohjuksen runkomateriaalina käyttää esimerkiksi lentokoneen runkomateriaaleja. Sen sijaan yliaääninopeuksilla joudutaan käyttämään sellaisia materiaaleja, jotka kestävät rasituksia ja kuumuutta huomattavasti paremmin [16].

Ohjukseen kuuluvat myös olennaisesti vakavointisiivekkeet, jotka voivat olla sijoitettuna joko ohjuksen rungon kärkeen tai perään. Kun siivekkeet ovat sijoitettuna ohjuksen kärkeen, kutsutaan siivekkeitä etusiivekkeiksi. Siivekkeiden ollessa sijoitettuna ohjuksen perään, siivekkeitä voidaan kutsua takasiivekkeiksi tai pyrstövakavoinniksi. Siivekkeiden paikan valinta riippuu siitä, minkälaisesta ohjuksesta on kyse, toisin sanoen mitä ominaisuuksia ohjukselle halutaan ja minkälainen ohjautusmenetelmä on kyseessä. Vaikka etusiivekkeet ja toimintalaitteisto ovat usein pieniä, aiheuttavat ne parhaan nostovoiman ja reagointinopeuden. Kuitenkin tämä ohjaustapa vaatii myös ohjuksen perään ylimääräiset siivet, jotta kallistusvakavointi voidaan toteuttaa. Ongelmana on myös se, että etusiivekkeet ja niiden koneisto vievät tilaa ohjuksen kärjestä, jolloin hakupään sijoittaminen voi hankaloitua. Etusiivekkeitä käytetään hyvin usein lyhyen kantaman ilmatorjuntaohjuksissa. Esimerkkinä etusiivekkeisestä järjestelmästä on amerikkalainen ilmatorjuntaohjusjärjestelmä FIM-92 Stinger [6, 33].

Takasiivekkeiset ohjukset ovat hyvin hallittavissa lennon aikana ja niillä on hyvä kallistusvakavuus, mutta ohjausvaikutus on hidask. Tästä johtuen ohjuksen liikkeet voivat olla hyvinkin suuria. Takasiivekkeisillä ohjuksilla painopisteen muutos ei aiheuta ongelmaa ja takasiivekkeet voidaan tehdä vain pieneltä osalta liikkuvaksi. Takasiivekkeitä voidaan käyttää pitkän kantaman ilmatorjuntaohjuksissa. Esimerkkinä tällaisesta takasiivekkeisestä ilmatorjuntaohjuksesta on amerikkalainen PAC-3-ohjus, joka on käytössä Patriot-ilmatorjuntaohjusjärjestelmässä [6, 33].

Kun käytetään pääsiipiä, jotka ovat sijoitettuina poikkeuksetta ohjuksen puoliväliin, saadaan niillä aikaan hyvä ohjaus ja vakavuus. Toisaalta ne kuitenkin tarvitsevat tehokkaan ja painavan laitteiston toimiakseen. Tämä lisää puolestaan ohjuksen painoa. Lisäksi pääsiipiohjatuisissa ohjuksissa rungon aiheuttamaa nostovoimaa ei hyödynnetä. Koska laitteiston tulee olla mahdollisimman lähellä ohjuksen painopistettä, muodostuu siitä pieni ongelma polttoaineen kulutuksen myötä, jolloin ohjausvaikutus muuttuu hiukan. Näitä pääsiipiä käytetään pitkän kantaman ilmatorjuntaohjuksissa [6].

Ohjuksille ominaista on se, että niiden rungon tulisi olla mahdollisimman kevyt, mutta samalla myös toimia kantavana rakenteena ja oltava kestävä ja vankka. Mitä suurempia ja painavampia osia ohjuksessa on, sitä vankempi ja kestävämpi ohjuksen rakenteen tulee olla. Ohjuksen muoto ei saa muuttua sen joutuessa erilaisiin rasituksiin, koska tällöin ohjus ei toimi enää oikealla tavalla. Ohjuksen lentoon vaikuttavia rasituksia ovat ilmanvastus, ohjuksen kuljettama hyötykuorma, moottorin työntövoima sekä siipien, siivekkeiden ja rungon aiheuttama nostovoima. Eri vaiheissa tapahtuu myös erilaisia rasituksia. Ohjuksen kuljetuksen ja käsittelyn aikana runko, ohjuksen hyrrät ja elektroniikkaosat joutuvat rasituksille. Eritoten värähtelyt ja iskut aiheuttavat rasitusta. Ohjuksen kiihdytysvaiheessa runkoon vaikuttavat pituusakselin suuntaiset, lyhytaikaiset rasitukset, jolloin rakenteen on pysyttävä kasassa. Reittivaiheessa ohjukseen vaikuttavat eritoten jyrkkiin kaarroiin liittyvät poikittaiskiihtyvyydet [6, 16].



Kuva 2. Ohjukseen vaikuttavia voimia [16, 31].

Nostovoiman aiheuttamat rasitukset jakautuvat epätasaisesti koko rungon pituudelle ja siiville. Siipien osalta nostovoima johtuu paine-erojen vaihtelusta siipipintojen eri puolilla. Painejakauma, joka muodostuu runkoon ja siipiin, riippuu suurelta osin ohjuksen lentokorkeudesta ja lentonopeudesta. Nostovoimasta johtuvat rasitukset voivat aiheuttaa runkoon erilaisia taipumisia pitkittäissuunnassa, mutta aiheuttavat myös taipumista siivissä. Suurimmat rasitukset kohdistuvat sinne, missä on suurin massa. Suurimmat massat löytyvät yleensä taistelukärjestä ja moottorista [16].

Koska ohjuksella ei ole mitään määrättyä vakiolentoasentoa, on ohjuksen oltava symmetrinen poikittaisakselin suuntaisesti. Lisäksi ohjukset ovat hyvin usein ristisiipisiä, jotta niitä voidaan ohjata asennosta riippumatta. Tämä ei tosin kosketa risteilyohjuksia, sillä niillä voi olla jokin määrätty lentoasento. Siivet ovat lähes aina kiinteät, vaikka ne tosin ovat kääntyneinä kuljetuksen ja laukaisun aikana. Vasta laukaisun jälkeen siivet avautuvat oikeaan asentoonsa ja aiheuttavat ohjukselle suurimman osan nostovoimasta. Siipien lisäksi ohjuksessa voi myös olla siivekkeitä, joita kutsutaan myös ohjainpinnoiksi. Näiden tehtävänä on aiheuttaa ohjukselle sen aerodynaaminen ohjaus ja ne ovat usein sijoitettu mahdollisimman kauas siivistä [6, 16].

Kuten aiemmin mainittiin, myös siivet joutuvat erilaisten rasitusten kohteeksi ja saattavat taipua. Kuitenkin siiven paksuuden tulisi olla mahdollisimman pieni aerodynaamisten ominaisuuksien takia. Tämä ongelma on ratkaistu siten, että siivet rakennetaan jäykemmiksi ja vahvemmiksi. Asentamalla niin sanottu I-palkki siihen osaan siipeä, missä se kestää huonoiten taipumista, johtaa siiven jäykkyyden paranemiseen. Näitä I-palkkeja voi olla myös enemmän, mutta pienemmillä ohjuksilla siivet voivat olla kokonaan kiinteitä [16].

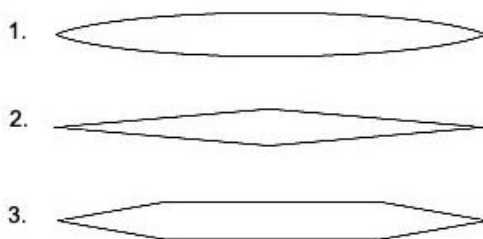
Aliääninopeuksilla lentävillä ohjuksilla pyritään saamaan siipien kärkiväli mahdollisimman suureksi. Ohjuksesta riippuen siivet voidaan rakentaa myös kaareviksi. Koska ohjuksien tulee olla ohjattavissa yhtä hyvin mihin tahansa suuntaan, on ohjus lähes poikkeuksetta symmetrinen ja siivet ovat suorat. Siipien poikkileikkausmuoto on tehty sellaiseksi, että etuosa on pyöristetty ja takaosa on terävä. Tällainen muotoilu aiheuttaa sen, että nostovoima on suoraan verrannollinen siipien pinta-alaan ja ilman paikalliseen tiheyteen. Lisäksi kohtauskulma vaikuttaa nostovoimaan ja nostovoima kasvaakin lentonopeuden neliön suhteen. Kohtauskulmaksi kutsutaan siiven ja ilmapirtauksen välistä kulmaa. Kohtauskulman kasvaessa nostovoima pienenee ja vastusvoima suurenee. Kohtauskulma, jossa nostovoima on maksimissaan, kutsutaan sakkauskulmaksi, joka vaihtelee 15° – 20° välillä siivissä [16].

Vaikka tämän tyyppiset siipirakenteet ovat erittäin tehokkaita, eivät ne sovellu suurimpaan osaan ohjuksista. Syitä tähän on monia. Ensinnäkin ohjuksen käsittely, liikuttaminen ja laukaisu ovat ongelma siipien suuren kärkivälin takia, joka tosin on korjattu joissakin ohjuksissa avautuvilla siivillä. Toinen syy, minkä takia nämä siipirakenteet eivät sovellu ohjuksiin, on pieni sakkauskulma. Tämä ilmenee silloin, kun ohjuksen automaattiohjain reagoi nostovoimaan lisäämällä kohtauskulmaa enemmän kuin on tarve. Nämä syyt johtavat siihen, että ohjuksen lentorata ja kohtauskulma on tarkkaan säädetty [16].

Toinen vaihtoehto suuren siipivälin rakenteen sijaan on hoikka siipirakenne. Hoikka siipirakenne tarkoittaa sitä, että siiven tulee olla pituussuunnassa vähintään yhtä pitkä kuin siipien kärkiväli. Tässä vaihtoehdossa aiemmat ongelmat eivät ole läsnä, mutta se ei ole aivan yhtä tehokas kuin suuren siipivälin rakenne. Toisaalta kuitenkin tämä rakennetyyppi on yksinkertaisempi ja tehokkaampi yliääninopeuksilla. Lisäksi tietyissä olosuhteissa tämän siipirakenteen sakkauskulma voi olla jopa 45° [16].

Yliääninopeuksilla siiven rakenne riippuu paljolti siiven muodosta. Yleisin siipien muoto on teräväkärkinen muoto, joka johtuu siitä, että tylppäkärkisillä siipirakenteilla ilma ei saa ennakkovaroitusta siivestä. Tämä tarkoittaa sitä, että teräväkärkinen siipirakenne on aerodynaamisempi ja tehokkaampi. Tämän tyyppisiä siipirakenteita on yleisesti kolme erilaista, jotka ovat:

- Kaksoiskaareva
- Symmetrinen kaksoiskiila
- Yhdensuuntainen kaksoiskiila.



Kuva 3. Yliääninopeusalueen ohjuksien siipirakenne. 1. Kaksoiskaareva 2. Symmetrinen kaksoiskiila 3. Yhdensuuntainen kaksoiskiila [16].

2.4 Taistelukärki

Taistelukärki valitaan sen mukaan, minkälainen maali on kyseessä ja mitä ominaisuuksia sillä on. Esimerkiksi lentokoneita vastaan käytetään usein suunnattuja, esisirpaloituja taistelukärkiä. Taistelukärki koostuu yksinkertaisimmillaan kolmesta eri osasta, varmistimesta ja sytyttimestä, taistelulatauksesta ja viritinmekanismista. Hyvin usein varmistin ja sytytin sekä viritinmekanismi ovat yhdistettyjä. Ohjukseen lisätään usein myös itsetuhomekanismi, jotta ohjuksista ei olisi vaaraa, mikäli ohjus ei osuisi kohteeseen. Taistelukärjen tärkein asia on kuitenkin taistelulataus, joka aiheuttaa vahinkoa viholliselle. Vahingon ei aina tarvitse olla tuhoava, vaikka se sitä hyvin usein onkin. Taistelukärjessä käytetään lähes poikkeuksetta räjähdettä, joka tarvitsee erillisen sytyttimen. Sytytin voi vaihdella hyvinkin paljon, mutta ilmatorjuntaohjuksissa käytetään usein herätesytytintä. Herätesytytin pyrkii toimimaan optimietäisyydellä maalista. Iskusytyttimen toimiessa se sytyttää räjäyttimen, joka taas puolestaan räjäyttää taistelulatauksen [16].

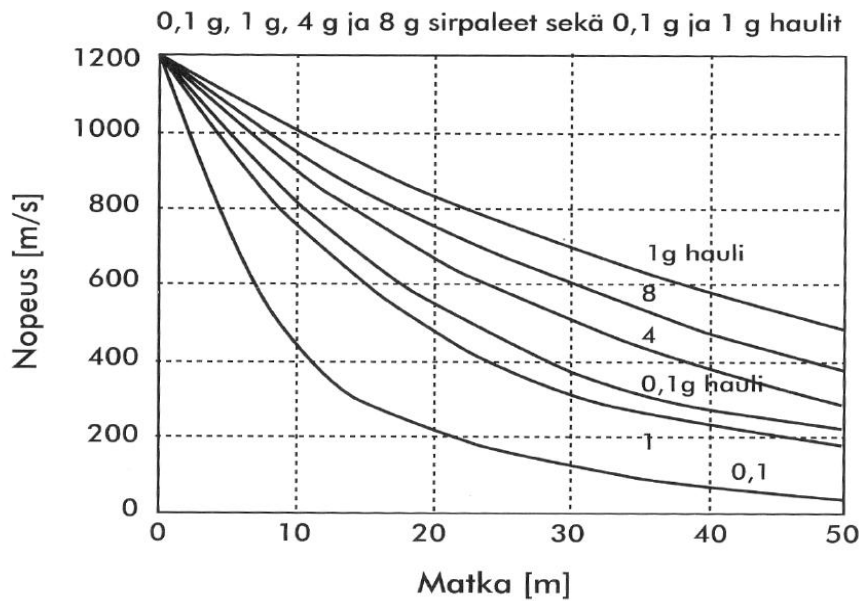
Sirpalevaikutteisissa taistelukärjissä käytetään paksua metallivaippaa, joka on taistelulatauksen ympärillä. Tämä metallivaippa muodostaa sirpaleita räjähtäessään. Suuri merkitys on myös sirpaleiden materiaalilla, massalla ja iskunopeudella. Tästä johtuen käytetäänkin usein esisirpaloituja metallivaippoja, sillä tavallinen yhtenäisestä osasta valmistettu metallivaippa räjähtää erikokoisiin sirpaleisiin, jotka saattavat lähteä ei-toivottuun suuntaan. Ilmatorjuntaohjuksissa taistelulatauksen räjähdyksessä sinkoutuvat sirpaleet voivat olla muun muassa palloja tai tankoja, jotka sinkoutuessaan muodostavat laajenevan renkaan. On myös mahdollista käyttää esimerkiksi suunnattuja räjähteitä, joissa sinkoutuu sirpaleita tai mahdollisesti nuolia tietyn kuvion mukaisesti. Sirpalevaikutteiset räjähteet toimivat paremmin suuremmilla korkeuksilla, sillä ilmantiheys on pienempi. Sirpalevaikutteisissa räjähteissä sirpaleet muodostavat koneille suurimman uhan, sillä sirpaleet voivat saavuttaa nopeuden, joka voi olla jopa 4000 m/s. Sekundäärinen uhka muodostuu räjähdysten aiheuttamasta paineesta [6].

Sirpaleiden muodosta ja ilmantiheyden johdosta sirpaleet menettävät nopeuttaan ajan myötä, jolloin sirpaleiden paino ja muoto korostuvat. Sirpaleen paino voi vaihdella maalista riippuen, mutta sirpaleen optimipaino kevytmetallivalmisteista lentokonetta vastaan on noin 4 grammaa. Sirpaleet voivat muodostua kolmella eri tavalla: luonnollisella sirpaloitumisella, ohjatulla sirpaloitumisella sekä esisirpaloitumisella. Näistä kolmesta tavasta jälkimmäisin tapa on tehokkain ja käytetyin.

Räjähteen ympärille asennetaan jo valmiiksi muodostettuja sirpaleita, jotka ovat pakattuina esimerkiksi alumiiniin, jolloin räjähteen toimiessa sirpaleet toimivat halutulla tavalla. Sirpaleet voivat olla pakattuina lähes minkälaiseen muotoon tahansa, mutta useimmiten ne ovat pakattuina metallikuutioihin, -pallioihin tai -sylintereihin. Itse sirpaleiden materiaalina käytetään muun muassa volframia ja nikkelseoksia. Sirpaleiden muoto voi olla lähes minkälainen tahansa, aivan kuten niiden pakkauksetkin, mutta tavallisimpia sirpaleiden muotoja ovat pallo, kuutio, tanko ja nuoli. Tämä tapa on kallein näistä kolmesta vaihtoehdosta, mutta myös tehokkain. Nuoli ei välttämättä ole sirpale johtuen sen valmiista rakenteesta. Nuolella pyritään paksun panssarin läpäisyyn, kun taas tangon muotoisilla sirpaleilla haetaan keveyttä ja vaikuttavuutta. Tanko voi olla valmistettu esimerkiksi titaanista. [16].

Ohjattu sirpaloituminen muodostetaan esimerkiksi uurtamalla räjähteen ympärillä oleva metallisäiliö, jolloin uurteet ohjaavat sirpaleiden muodostumista. Tämän tekniikan etuja ovat kyky tuottaa suunnilleen samankokoisia sirpaleita ja rakenteen tukevuus. Haittana tällä tekniikalla on kuitenkin sen kalleus ja se, että sirpalekoko riippuu metallisäiliön paksuudesta. Toinen tapa muodostaa ohjattuja sirpaleita on sijoittaa kolmion muotoisia metallikappaleita räjähdysaineen ja sitä ympäröivän sirpaloituvan ulkokuoren välille. Tässä edut ovat samanlaiset, mutta rakenne on yksinkertaisempi. Haitat ovat tässä tekniikassa samat. Näillä ohjatuilla sirpaloitumisella syntyviä sirpaleita kutsutaan myös räjäyttämällä syntyneiksi sirpaleiksi [16].

Luonnollisessa sirpaloitumisessa räjähteelle tai metallisäiliölle ei tehdä mitään toimenpiteitä, jolloin ennaltamääritettyjä sirpaleita ei muodostu. Tällä tekniikalla aiheutuvat sirpaleet ovat satunnaisen muotoisia ja lähes puolet räjähdysenergiasta kuluu pelkästään kuoren hajottamiseen. Lisäksi alle puolet muodostuneista sirpaleista on massaltaan ja muodoltaan tarkoituksenmukaisia. Luonnollisen sirpaloitumisen vaikutusta voidaan optimoida muotoilemalla räjähdysainetta ympäröivä kuori. Ohjuksissa yleisin käytetty muoto on suorasiivinen sylinteri. Tätä sylinteriä voidaan kovertaa sivuilta, mikäli halutaan sirpaleviuhka kapeammalle alueelle. Tästä tekniikasta käytetään nimitystä suunnattu sirpalevaikutus [16].



Taulukko 2. Sirpaleiden ja haulien hidastuvuus ilmassa, lähtönopeus 1200 m/s [1].

Pienet sirpaleet eivät kuitenkaan aina ole tehokkain vaihtoehto lentokonetta vastaan, sillä kone voi kyetä jatkamaan lentämistä. Sen sijaan sirpaleet, jotka kykenevät lävistämään ja repimään suuria kokonaisuuksia ja rakenteita, ovat tehokkaampia. Tästä johtuen kehitettiin sauvamaisia sirpaleita. Tällaista taistelulatausta kutsutaan tankotaistelulataukseksi. Tankotaistelulatauksen sirpaleet muodostetaan sauvamaiseen muotoon räjähteen ympärille, jolloin räjähteen räjähtäessä sirpaleet sinkoutuvat laaja-alaisesti. Ongelmana näissä sirpaleissa on kuitenkin se, että ne menettävät nopeutta nopeammin, saattavat vaappua ja mahdollisesti lentää nuolimaisesti. Tähän ongelmaan on kehitetty ratkaisu, jatkuvan ketjun sirpaleet. Sirpaleet muodostetaan kuten aiemmin, mutta ne liitetään toisiinsa eri päistä, jolloin räjähdys tapahtuessa sirpaleet muodostavat kiinteän ketjun, joka on yleensä renkaan muotoinen. Sauvamaiset sirpaleet voivat olla muodoltaan pyöreitä, suorakaiteen tai neliön muotoisia. Renkaan maksimipituus on noin 80 %:a sauvojen yhteenlasketusta pituudesta. Renkaan hajotessa sauvat alkavat vaappua ja voivat menettää alkuperäisen suuntansa, jolloin taistelulatauksesta tulee huomattavasti tehottomampi. Tämän järjestelmän haittapuolia ovat pieni lähtö- ja iskunopeus, rajoitettu ulottuvuus, monimutkaisuus, kalleus ja tehon riippuvuus kiinteän ketjun koossapysymisestä [16].

2.5 Sytytin

Jotta taistelulataus toimisi ja se saataisiin räjäytettyä, tarvitaan siihen sytytintä. Yksinkertaisimmillaan se koostuu seuraavista osista:

- Viritin
- Varmistin
- Räjäytin
- Heräteosa.

Näiden eri sytyttimien osien avulla voidaan sytyttimelle määrittää seuraavat viisi yksinkertaista tehtävää:

- Aseen turvallinen käsittely
- Aseen viritys
- Havaita tai tunnistaa kohde
- Aloittaa räjähdeketju ja siten räjäyttää taistelulataus
- Määrittää räjäytyssuunta.

Viritin ja varmistin muodostavat kokonaisuuden, joka tunnetaan nimellä varmistus- ja viritysjärjestelmä. Tämän järjestelmän tarkoituksena on turvata ohjuksen käyttö. Toisin sanoen sitä voidaan käsitellä ja kuljettaa turvallisesti. Tällä järjestelmällä suoritetaan myös niin sanottu ratavarmistus, joka virittää itsetuholaitteiston toimintavalmiiksi [6]. Tämä on erittäin tärkeää esimerkiksi ilmatorjuntaohjuksissa, sillä sen tulee räjähtää ennen kuin siitä tulee vaarallinen omille joukoille. Nykyään turvallisuus on erittäin suuressa asemassa, joten valmistajat pyrkivätkin saamaan näistä mahdollisimman turvallisia laitteita. Laitteiden turvallisuudesta kertoo myös se, että esimerkiksi yhdysvaltain laivaston käyttämien ohjuksien varmistus- ja viritinjärjestelmien epäonnistumisen todennäköisyys saa olla vain 1/106 [16, 37].

Viritintä ei voida erottaa varmistimesta, sillä virittimeen kuuluvat toiminnot virittävät varmistus- ja viritysjärjestelmän sellaisiin tilaan, jossa räjähdeketju voidaan käynnistää heräteosalla. Yleisin tapa virittymiselle on jousi- tai hitausvoimien vaikutus, mutta virityskomento voidaan lähettää myös erikseen lavetilta. Joissain varmistus- ja viritysjärjestelmissä viritys tapahtuu ohjuksen kiihtyvyyden perusteella, joka mitataan esimerkiksi moottorin perusteella. Ongelmana tässä on se, että mikäli ohjus tiputetaan sitä käsiteltäessä, saattaa se kokea koviakin g-

voimia, jolloin viritys saattaisi tapahtua. Jotta näin ei tapahtuisi, tulee kiihtyvyyden tapahtua jonkin tietyn ajan verran, esimerkiksi yhden sekunnin ajan [16, 37].

Varmistimen tehtävänä on pitää räjähdysketjun aloittava osa erillään räjäyttimestä. Se on yleensä mekaaninen laite, joka toimii jousivoiman avulla. Räjäytin puolestaan on osa räjähdysketjua ja siten myös osittain integroitu varmistus- ja viritysjärjestelmään. Jotta räjäytysketju toimii oikealla hetkellä ja oikealla etäisyydellä maalista, tarvitaan siihen heräteosa, joka antaa räjäytysketjulle aloite-energian. Sytyttimet usein nimetään juurikin heräteosan toimintatavan mukaisesti:

- Kosketustoiminen
- Lähitoiminen
- Aikatoiminen.

Kosketustoimiset heräteosat ovat useimmiten käytössä panssarintorjuntaohjuksissa, mutta niitä voidaan käyttää myös ilmatorjuntaohjuksissa yhdessä jonkin toisen menetelmän kanssa. Kosketustoimiset heräteosat voidaan jakaa isku- ja sähkösytyttimiin. Iskusytyttimessä kosketustoiminto on mekaanista, joka tarkoittaa sitä, että iskuri toimii joko välittömästi törmäyksestä tai siitä aiheutuvien hidastusvoimien vaikutuksesta. Sähkösytyttimissä sen sijaan toiminta perustuu sähköön, jonka avulla virtapiiri kytkeytyy päälle törmäyksen yhteydessä. Koska tämän tyyppin sytyttimet perustuvat törmäykseen, sytytin sijaitsee usein ohjuksen tai ammuksen kärjessä. Sytytin voi myös sijaita ammuksen pohjassa.

Isku- ja sähkösytyttimet voidaan luokitella kolmeen nopeusluokkaan, supernopeisiin, tavallisiin ja hidastettuihin sytyttimiin. Supernopeissa sytyttimissä räjähdysketju käynnistyy alle 100 μ s:ssa, kun taas tavallisissa sytyttimissä voi olla hyvin pieni viive sytyttimen ja asean komponenttien takia, vaikka mitään viivettä ei tietoisesti haetakaan. Hidastesytyttimissä on tarkoituksenmukaisesti tiettyjä osia, jotka hidastavat räjähdysketjun käynnistymistä törmäyksen jälkeen. On kuitenkin huomattava, että tämä hidaste on kuitenkin verrannollisen pieni, koska ammuksen tai ohjuksen vauhti on erittäin suuri. Usein hidastevaikutus on vain joitakin sekunnin osia. Hidastesytyttimille ominaista on myös se, että tätä hidasteaikaa voidaan säätää [17].

Lähitoimiset heräteosat ovat näistä kolmesta eri toimintatavoista kaikkein monimutkaisin, mutta myös erittäin paljon käytetty. Tämä sytytintyyppi kehitettiin jo toisen maailmansodan aikana lisäämään ilmatorjunnan tulen tehoa, sillä ilmatorjunnan tehokkuus perustui lähes yk-

sinomaan suoraan osumaan. Vaikka aikasytyttimiä oli tuohon aikaan käytössä, ne eivät silti olleet riittävän tehokkaita ja tarkkoja. Lähitoimisen heräteosan keksiminen johti siihen, että ilmatorjunnan tulen teho kymmenkertaistui. Lähitoimisen heräteosan toiminta perustuu siihen, että se havaitsee maalin ennen törmäystä. Toisin sanoen sytyttimen havaitessa maalin se sytyttää räjähdysketjun.

Heräteosat voidaan jakaa niiden toimintaperiaatteen mukaan joko aktiivisiin tai passiivisiin herätesytyttimiin. Aktiivisiin herätesytyttimiin kuuluvat tutkaherätesytyttimet ja laserherätesytyttimet, kun taas passiivisiin herätesytyttimiin kuuluvat magneettiset herätesytyttimet ja infrapunaherätesytyttimet. Lisäksi on olemassa komentosytyttimiä, joiden toiminta perustuu siihen, että sytytin toimii jonkin halutun ulkoisen toiminnan perusteella. Näitä tosin käytetään usein miinoissa [17, 37].

Tutkaherätesytytin mittaa lähetetyn ja vastaanotetun pulssin välisen ajan perusteella ohjuksen ja maalin etäisyyden toisiinsa nähden. Tämän perusteella sytytin aloittaa toimintansa, kun se on jollakin ennaltamääritetyllä etäisyydellä maalista. Tämä ennaltamääritetty etäisyys on useimmiten myös tehokkain etäisyys. Tässä sytyttimessä on myös mahdollista käyttää sellaista tekniikkaa, joka antaa sytyttimelle jonkin maksimietäisyysportin. Tämän tekniikan avulla sytytin ei ota vastaan jotakin tiettyä etäisyyttä kauempaa tulevia herätteitä. Toinen toimintapa tutkaherätesytyttimelle on doppler-heräte. Tällöin vastaanottimessa mitataan dopplertaajuuden muutosta. Tämä muutos on ohjuksen ja maalin välinen suhteellinen nopeus. Tämän ansiosta maaleja kyetään luokitella niiden nopeuksien mukaan, joka puolestaan edesauttaa maalin valintaa monen eri paikasta saapuneen signaalin välillä. Koska sytytin toimii kuten tutka, voidaan sitä myös häiritä. Jotta häirinnän vaikutus olisi mahdollisimman pieni, voi tutkaherätesytytin kytkeytyä päälle joko komennon perusteella tai jonkin tietyn ajan kuluttua [6, 37].

Laserherätesytytin toimii samalla periaatteella kuin tutkaherätesytytin, mutta eroja kuitenkin löytyy. Sytyttimessä on laserdiodi tai -diodeja, joiden tehtävänä on lähettää tietynmuotoista säteilykeilaa ohjuksen etusektoriin. Valodiodit, jotka toimivat vastaanottimina, ilmaisevat maalista aiheutuvan takaisinheijastuksen ja suorittavat sytytyksen, mikäli saapuvan säteilyn intensiteetti on riittävän suuri. Tällä tekniikalla saadaan myös se vaikutus, että taistelulataus räjähtää tehokkaalla etäisyydellä [6].

Ohjuksen terminaalivaiheeseen kuuluu paljon parametreja ja toisiinsa vaikuttavia asioita, jotka ovat riippuvaisia esimerkiksi ohjuksen ja maalin ominaisuuksista. Nämä aiheuttavat epävarmuutta muun muassa sytyttimen havaitsemisen ja taistelulatauksen räjäyttämisen aikavälille. Vaikka ohjus olisikin suunniteltu käsittämään niin suuret kuin pienet maalit, voi näiden maalien nopeusominaisuudet johtaa siihen, että aiemmin mainittu aikaväli on väärä, jolloin taistelulataus ei toimikaan tehokkaimmalla etäisyydellä. Tämä voi esiintyä sekä tutka- että laserherätesytyttimessä [6, 37].

Magneettiherätesytyttimien toiminta perustuu siihen, että ne mittaavat maan magneettikenttää ja toimivat, kun siihen tulee riittävän suuri muutos. Metallinen kappale on useimmiten se, joka aiheuttaa tämän muutoksen. Vaikka useimmat sytyttimet toimivat maalin ollessa paikallaan, voi joissakin sytyttimissä olla vaatimuksena se, että maali liikkuu. Magneettiherätesytyttimet ovat yleisimpiä miinoissa [6, 37].

IP-sytytin ja tutkaherätesytytin ovat yleisimmät käytössä olevat sytytintyytit. IP-sytyttimen toiminta perustuu siihen, että se havaitsee maalin siitä aiheutuvan lämpösäteilyn perusteella. Oikea etäisyys päätellään maalista aiheutuvan säteilyn intensiteetistä. Jotta tämä sytytin toimisi, on sytyttimen ympärille asetettu infrapuna-antureita. Nämä anturit toimivat pareittain ja ne ovat asetettu ohjuksen pituussuuntaan nähden erilleen toisistaan. Nämä anturit ovat myös suunnattu eri kulmaan toisiinsa nähden. Etummaisena anturina havaitessa säteilyn, esimerkiksi rynnäköpommittajan moottorin aiheuttamat palokaasut, se käynnistää ajastinpiirin. Mikäli takimmainen anturi havaitsee myös säteilyn ennen tietyn ajanjakson loppumista, maali on ohjuksen taistelulatauksen vaikutusalueella ja taistelulataus voidaan räjäyttää [6].

Ilmatorjuntaohjuksissa voi myös olla käytössä mekaaninen sytytin, koska voi olla tilanne, jossa ohjus kannattaa räjäyttää silloinkin, kun se on herätesytyttimen toimintasädeittä kauempana. Hyvä esimerkki tilanteesta on se, kun ohjus tekee riittävän jyrkän kaarron, jolloin ohjuksen sytytin päättelee, että se lentää maalin ohi. Inertiasytytin on yksi tällainen mekaaninen sytytin. Inertiasytyttimen toiminta perustuu siihen, että taistelulataus laukaistaan silloin, kun ohjuksen kulmanopeus kasvaa jonkin tietyn ennaltamääritetyn rajan yli [6].

Aikatoimiset sytyttimet toimivat jonkin tietyn määritetyn ajan kuluttua, joka on sidottu joko sytyttimen virittämiseen tai iskuun. Tällaisten aikatoimisten sytyttimien ajan mittaus voi perustua esimerkiksi sähköön tai mekaniikkaan. Tällaisia sytyttimiä käytetään esimerkiksi tykistöammuksissa, jolloin niillä saadaan haluttu, tarkoituksenmukainen vaikutus. Sytyttimen ajan

säädössä voi olla suurtakin vaihtelua, sekunnin osista jopa päiviin. Ilmatorjuntaohjuksissa aikatoiminen sytytin ei ole pääsääntöinen sytytin maalia vastaan, sillä ohjuksen ja maalin kohtaamista ei voida arvioida. Kuitenkin näitä sytyttimiä on mahdollista käyttää esimerkiksi ohjuksen itsetuhoon liittyen [17].

Sytytin voi koostua monista eri heräteosista ja niiden samanaikaisista, rinnakkaisista ja peräkkäisistä toiminnoista. Kun ohjuksessa käytetään eri sytyttimiä, kutsutaan sitä monitoimisytytimeksi. Tässä luvussa aiemmin mainittujen sytyttimien yhdistelmät kuuluvat myös näihin monitoimisytyttimiin. Sytyttimien tarkkuutta ja toimivuutta voidaan myös parantaa yhdistämällä ne ohjuksen hakupäähän. Tällöin molempien osakokonaisuuksien, hakupään ja sytyttimen, parhaat ominaisuudet ja tekniset ratkaisut voidaan ottaa hyötykäyttöön.

3 ILMATORJUNTAOHJUSJÄRJESTELMIEN TEKNIikka

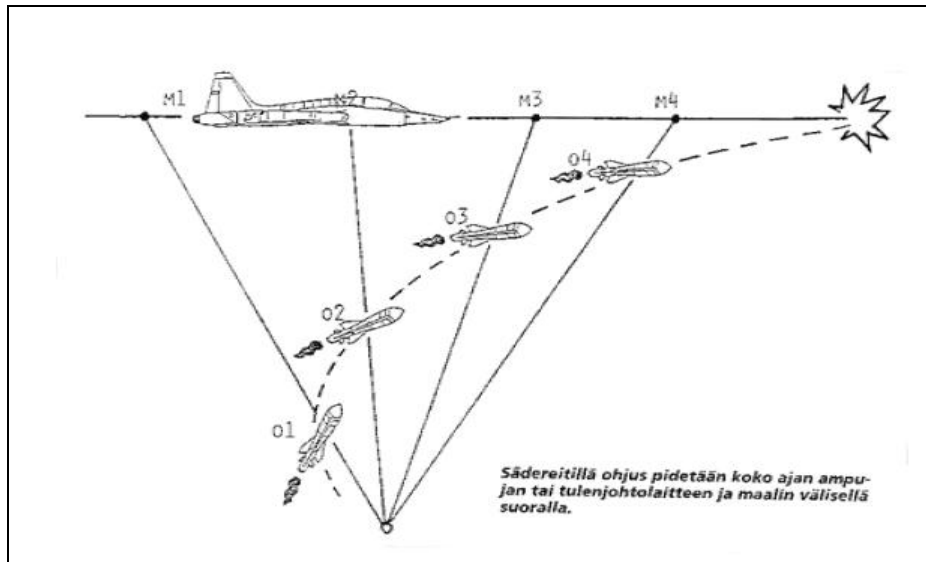
3.1 Reititysmenetelmät

Reititys tarkoittaa ohjuksen lentoreitin määrittämistä tietyn periaatteen mukaisesti. On ymmärrettävä, että ohjuksen lentoreitti on maaliinsa nähden kolmiulotteinen. Tämä tarkoittaa sitä, että risteilygeometrian matemaattinen käsittely on hyvin usein lähes mahdotonta. Ohjus voidaan laukaista joko valitun ennakon mukaiseen suuntaan tai suoraan maalia kohti. Reititysmenetelmän valinta riippuu aina ohjuksen käyttötarkoituksesta.

Toimintavyöhyke, joka määräytyy eri reititysmenetelmien ominaisuuksista, sisältää lukkiutumisen- ja laukaisuvyöhykkeet, joihin saattaa jäädä ammuntaa rajoittavia katvealueita. Häiriöt, jotka syntyvät laukaisun ja kiihdytysvaiheen aikana, johtuvat muun muassa kiihtyvyydestä, painopisteen muuttumisesta ja kiihdytysmoottorin epätasaisesta palamisesta. Kova tuuli saattaa myös aiheuttaa häiriöitä, erityisesti pienemmille ja kevyemmille ohjuksille. Nämä häiriöt vaikuttavat ohjuksessa siihen saakka, kunnes ohjus on saavuttanut riittävän nopeuden, jolloin ohjainpinnat alkavat vaikuttaa.

3.1.1 Suuntalinjareitti

Suuntalinjareitti, jota kutsutaan myös sädereitiksi, tarkoittaa sitä, että ohjus pidetään joko ampujan ja maalin tai tulenjohtolaitteen ja maalin välisellä suoralla. Ohjuksen ohjaus tapahtuu niin, että ohjuksen rungon suuntainen nopeusvektori osoittaa maalin eteen eikä maaliin. Tällöin suuntalinjareitille muodostuu ennakkokulma. Käytännön ohjautustapahtumaa haittaa se, ettei ohjus pysy lähtövaiheessa tähtäysviivalla. Vaikka ohjus lentää ennakon perusteella, ei se kuitenkaan lennä tiettyyn kiinteään ennakkopisteeseen. Sen sijaan koko ajan muuttuva ennakkopiste määrittää ohjukselle ainoastaan lentoreitin kaarevuuden. Erityisen tärkeää sädereitissä on oikea-aikainen laukaisuhetki, jotta ohjukseen kohdistuva poikittaiskiihtyvyys ei kasva liian suureksi [13].

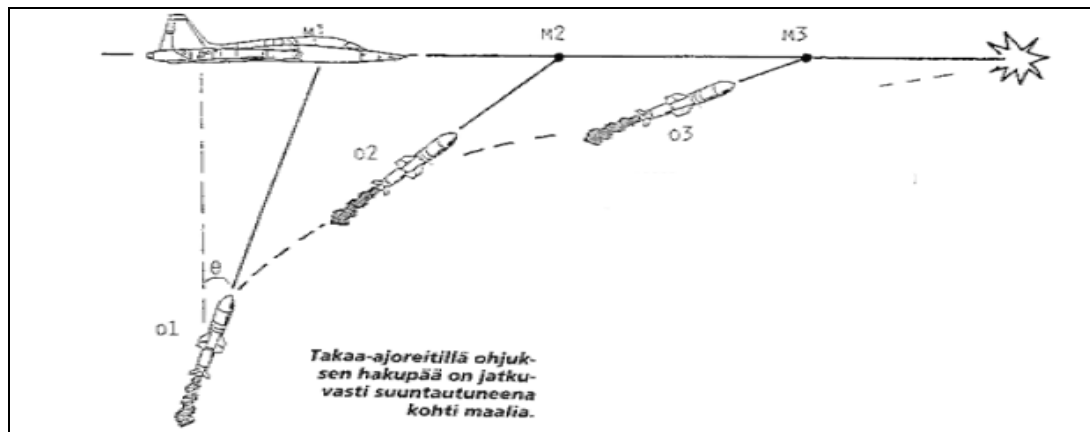


Kuva 4. Sädereitti [6].

3.1.2 Takaa-ajoreitti

Takaa-ajoreitti, joka tunnetaan myös koirakäyräreittinä, on käytössä itsenäisesti maaliin haakeutuvissa ohjuksissa. Tämän yksinkertaisen mallin mukaan ohjuksen hakupää seuraa maalia koko ajan ja sen lisäksi ohjuksen lentosuunta on jatkuvasti maali kohti. Ohjautustapa soveltuu ainoastaan maalin takasektorista tapahtuvaan ammuntaan. Tämä johtuu siitä, että jos ohjus ammuttaisiin maalin etusektorista, joutuisi ohjus kaartamaan niin voimakkaasti, että se g-voimien takia suistuisi radaltaan [6].

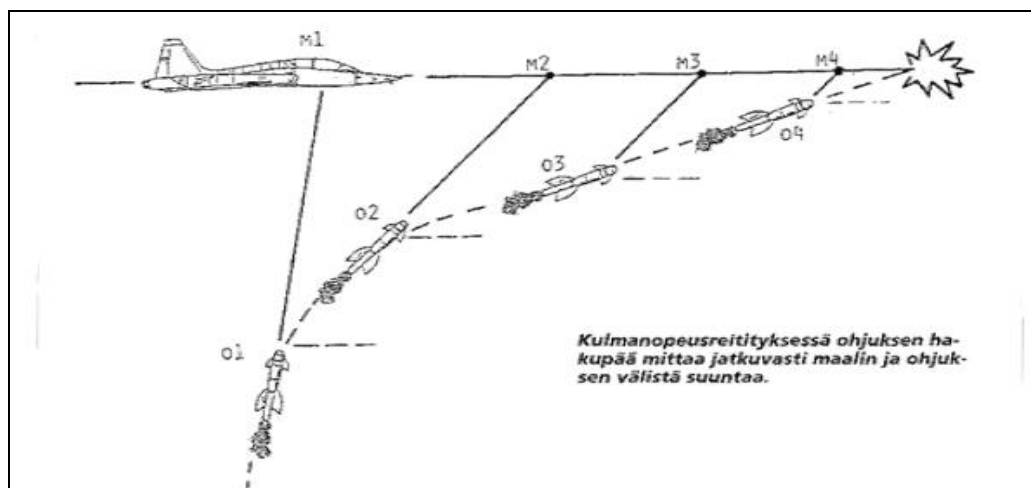
Takaa-ajoreitin ominaisuuksia voidaan osittain parantaa antamalla ohjukselle jokin tietty vakiosuuruinen ennakkokulma. Tämä tarkoittaa sitä, että lentoaika on lyhyempi ja lentoreitti on paljon suurempi. Tätä menettelytapaa kutsutaan vakioennakkokulmareitiksi. Tämän menetelmän haittana on se, että jos maalin ja ohjuksen nopeussuhde on suurempi kuin 2, niin poikittaiskiihtyvyys kasvaa rajatta eräässä vaiheessa. Tämä kyseinen menetelmä on kuitenkin suhteellisen vanha menetelmä ja on jo poistunut lähes kokonaan käytöstä, sillä sen teho/hyötysuhde on suhteellisen huono. Suomessa tätä menetelmää on edustanut käytöstä poistunut ilmatorjuntaohjusjärjestelmä Igla-86M.



Kuva 5. Takaajoreitti [6].

3.1.3 Kulmanopeusreitti

Tässä menetelmässä olennaista on se, että ohjuksen hakupää mittaa jatkuvasti ohjuksen ja maalin välistä suuntaa. Tarkoituksena on saattaa ohjus törmäysreitille maaliin nähden. Koska poikittaiskiihtyvyyks on suoraan verrannollinen tähtäysviivan muuttuvan kulmanopeuden kanssa, ohjuksen ja maalin välisen tähtäysviivan ja ohjuksen lentosuunnan välinen kulma on sama koko lennon ajan. Jos nopeussuhde on yli 1, johtaa kyseinen reitti törmäykseen ennemmin tai myöhemmin. Tämä on pienten ohjusjärjestelmien paras lentoreitti, koska se määrittää ennakkokulman, eikä silti edellytä etäisyydenmittausta [13].

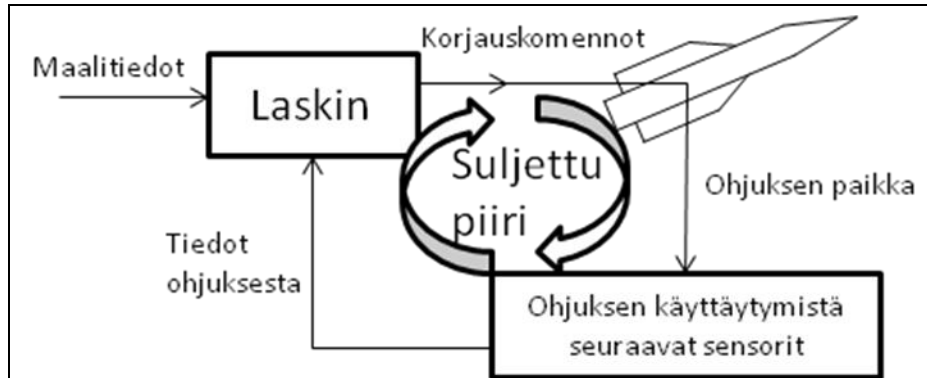


Kuva 6. Kulmanopeusreitti [6].

3.2 Ohjautusmenetelmät

Ohjautusjärjestelmällä saadaan lyhytviiveinen informaatio maalista ja ohjuksesta sekä niiden liiketilasta. Yksinkertaisimmallaan ohjautuksen tehtävänä on saada laukaistu ase osumaan

maaliin tai saattaa ase sen syyttimen ja taistelulatauksen toimintaetäisyydelle antamalla aseelle ohjaukskomentoja. Kaikissa ohjautusjärjestelmissä on käytössä niin sanottu suljetun piirin järjestelmä, joka on osoittanut tärkeytensä viimeisen 30 vuoden aikana. Kyseessä on tähtäinjärjestelmän, aseiden ja sensoreiden tiedon välitys, joka selviää alla olevasta kuvasta [22].



Kuva 7. Suljettu piiri [16].

Sensorit, jotka seuraavat ohjuksen käyttäytymistä, lähettävät muun muassa ohjuksen paikkatiedon tähtäinjärjestelmälle, joka laskee aseiden reitin uudelleen ja lähettää ne komentoina aseelle, jotta ohjus osuisi maaliin. Tähtäinjärjestelmässä itsessään on oltava myös tietoa halutusta aseiden reitistä, jotta nämä korjauskomennot voidaan laskea ja toteuttaa. Kun korjauskomennot ovat lähetetty ohjukselle, välittyvät ne muutoksina ohjuksen reittiin, joita ohjuksen käyttäytymistä seuraavat sensorit jälleen seuraavat ja tulkitsevat. Ohjautusmekanismit voidaan jakaa neljään pääluokkaan niiden toimintatapojen perusteella. Nämä pääluokat ovat suunnistus, komento-ohjaus, säteenseuranta ja autonominen hakeutuminen.

Suunnistukseen perustuvassa ohjautusmenetelmässä aseeseen ohjelmoidaan sen haluttu lento-reitti ja ase saatetaan kyseistä lentoreittiä pitkin ohjelmoituun maalipisteeseen. Mikäli ase käyttää inertiapaikannusta, voi se toimia täysin ilman ulkopuolista signaalia, mutta ajan kassa inertiapaikannuksen virhe kasvaa. Nykyään inertiapaikannusta käytetään rinnan joko satelliittipaikannusjärjestelmän (GPS, Global Positioning System) tai maastonseurantajärjestelmän osana. Inertiapaikannuksen merkitys on muuttunut, sillä nykyään sitä käytetään esimerkiksi ohjuksen loppulennon aikana, kun pääjärjestelmä ei toimi.

Suunnistuksesta on erityisesti hyötyä reittivaiheen aikana, sillä näköyhteyttä maaliin tai aseeseen ei tarvita. Kuitenkin näiden järjestelmien tarkkuus ei usein riitä terminaalivaiheen ohjautukseen. Koska suunnistavat järjestelmät perustuvat inertiapaikannukseen tai vastaavaan, ei niitä pystytä täysin hyödyntämään ilmatorjuntaohjuksien käytössä.

Säteenseurantajärjestelmissä lavetti muodostaa laser- tai tutkasäteen avulla kujan, jota ohjus seuraa ja pyrkii hakeutumaan sen keskipisteeseen. Ohjus kykenee itsenäisesti päättämään oman sijaintinsa ja laskemaan tämän perusteella korjauskomennot. Komento-ohjatuissa järjestelmissä sen sijaan korjauskomennot tulevat lavetilta. Ohjaus tapahtuu yleisimmin aseensuoraan näköyhteyksensä pitkin joko maaliin tai ennakkopisteeseen. Huomattavaa on kuitenkin, että lavetti seuraa sekä maalia että asetta. Autonomisesti hakeutuvissa järjestelmissä aseelle joko osoitetaan maali laukaisuvaiheessa tai ase kykenee itse havaitsemaan maalilin. Hakeutuminen maaliin perustuu maalista lähtevään herätteen.

3.2.1 Komento-ohjaus

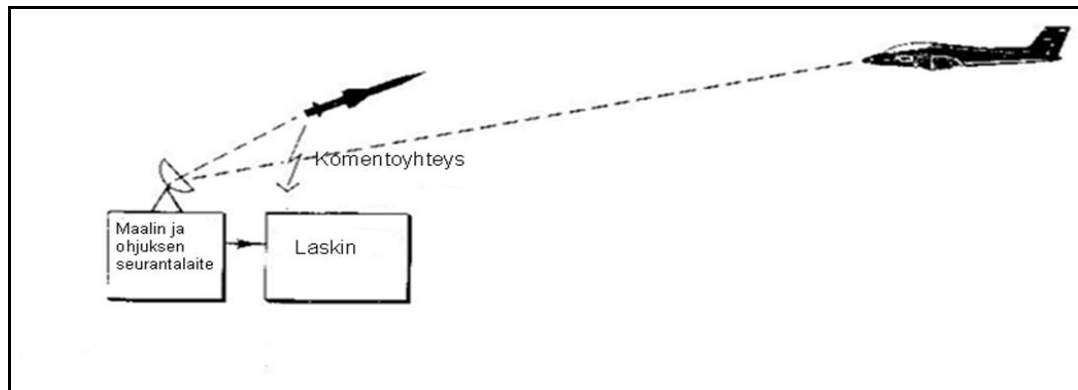
Ensimmäiset komento-ohjatut asejärjestelmät tarvitsivat ampujan, joka maalin lentoreittiä ja ohjuksen lentoreittiä seuraamalla teki manuaalisesti korjauksia ohjuksen lentoreittiin. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että ampuja itse joutuu arvioimaan tarvittavat korjauskomennot, jotta ohjus osuisi maaliin. Tästä käytetään nimitystä MCLOS, Manual Command to Line Of Sight. Tällaiset järjestelmät ovat yksinkertaisia, halpoja ja vaikeita häiritä, mutta vaativat ampujalta todella paljon taitoa ja paljon koulutusta.

Tekniikan sekä elektroniikan kehittyessä osa manuaalisesta toiminnasta pystyttiin automatisoimaan, jolloin ampujan ei enää tarvinnut seurata ohjuksen lentoreittiä. Ohjusta ja sen lentoreittiä seuraa goniometri, joka tunnistaa, mikäli ohjus ei ole linjassa tähtäimen ja maalin suhteen. Tällainen järjestelmä, jossa ampujan vastuulla on maalin seuranta, on nimeltään SACLOS, Semi-Automatic Command to Line Of Sight. Ampujalle siis riittää se, että hän seuraa maalia tutkan, valonvahvistimen, lämpötähtäimen tai kaukoputken läpi ja pystyy pitämään tähtäimen ristikon maalissa [16].

Ohjuksen korjauskomennot välitetään tähtäimen tietokoneen tai goniometrin avulla, joka laskee tähtäyspisteen ja ohjuksen sijainnin erotuksella kyseiset korjauskomennot ja lähettää ne ohjukselle. Ohjuksen peräosassa on lähetin, joka lähettää tarvittavan ohjuksen paikkatiedon ampujan tähtäimelle. Ohjuksen lähetin on vanhoissa järjestelmissä yksinkertainen ihmismälle näkyvä soihtu ja uusissa järjestelmissä pulssipaikkamodulaatiolla (PIM, Pulse Interval Modulation) koodattuja infrapunasäteilypulseja lähettävä laser. Pulssipaikkamodulaation ansiosta on mahdollista ampua ja seurata useampaa ohjusta samanaikaisesti [15].

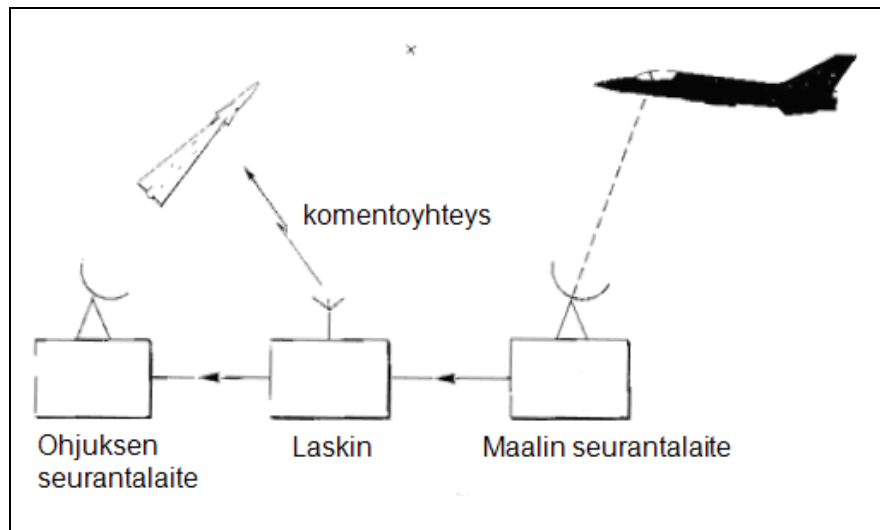
Järjestelmä, jossa on automaattinen maalinseuranta ja ohjaus, tunnetaan nimellä ACLOS, Automatic Command to Line Of Sight. Tässä järjestelmässä lavetilla oleva sensori kykenee itse-

näisesti ohjaamaan asetta ja seuraamaan maalia automaattisesti. Ohjusta ja maalia seuraavan sensorin ei välttämättä tarvitse olla yhdessä paikassa, vaan on mahdollista, että ohjusta seuraava sensori ja maalia seuraava sensori ovat eri paikassa. Operaattorin tehtävänä on maalin valinta tulitusehdotuksen ja sensorin tekemän uhka-analyysin perusteella. Lisäksi operaattori vahvistaa tulituspäätöksen ja tarvittaessa siirtää manuaalisesti tähtäyskeskipistettä parempaan paikkaan.



Kuva 8. ACLOS [16].

On olemassa myös ohjautustapa, jota on käytetty todella pitkään ja joka on tarkoitettu ilmatorjuntajärjestelmille, joilla pyritään saavuttamaan suuria korkeuksia. Tästä käytetään nimitystä COLOS (Command Off the Line of Sight System). Toisin kuin aikaisemmin mainituissa järjestelmissä, on tässä mahdollista se, että maalin seurantajärjestelmä ja ohjuksen seurantajärjestelmä katsovat aivan eri suuntiin. Olennaista on, että ohjuksen lentoreittiä ei ole määritetty ja tämän ansiosta ohjus voidaan ohjata kaikkein tehokkaimmalle reitille osuakseen maaliin. Ohjus itsessään sisältää lähettimen, joka antaa suurta signaalia ohjuksen seurantajärjestelmälle. Laskimelle riittää tieto maalin ja ohjuksen suunnasta ja etäisyydestä. Toisaalta tässä taas tulee esille häirinnän mahdollisuus, joka on suhteellisen helppoa. Tämän järjestelmän häirinnän väistämiseksi ja estämiseksi on kuitenkin mahdollista käyttää ylimääräisiä tutkia etäisyyden saamiseksi tai käyttää optista seuranta tutkaseurannan tilalta.

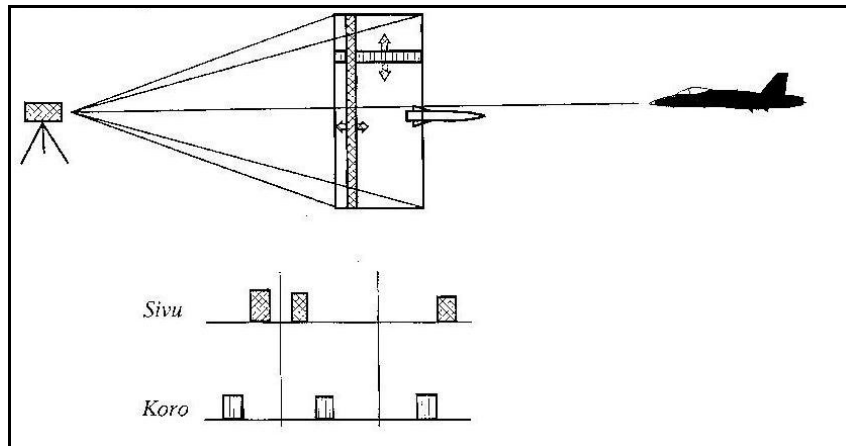


Kuva 9. COLOS [16].

Komennot sensorilta ohjukselle välitetään kuparikaapelilla, mikroaaltolinkillä tai uusimmissa järjestelmissä valo-kaapelia pitkin. Mikäli ohjuksen ohjaamisessa käytetään kupari- tai valo-kaapelia ja ohjuksen seurannassa passiivista sensoria, kuten lämpökameraa tai valonvahvistinta, voi maali saada ennakkovaroituksen ainoastaan omalta aktiiviselta sensorilta tai ohjuksen laukaisun tai kiihdytysvaiheen havaitsevalta ohjusvaroittimelta.

3.2.2 Säteenseuranta

Säteenseuraja (beam rider) nimitystä käytetään järjestelmästä, jossa tähtäinjärjestelmä lähettää ohjukselle paikkatietoja tutka- tai lasersignaaleilla. Lasersäde on pakotettu muodostamaan erittäin tarkan kuvion tähtäyslinjan ympärille. Tästä kuviosta, joka muodostuu ohjuksen ja lavetin välille käytetään usein nimitystä signaalikuja. Ohjus kykenee laskemaan koodatun signaalikujan perusteella oman sijaintinsa suhteessa kujaan sekä tekemään tarvittavat korjaukset lentoreittiinsä itse. Koska kyseessä on laser- tai tutkasignaaliin perustuva järjestelmä, maali kykenee havaitsemaan mahdollisen mittauksen varoittimien avulla. Kyseisiä säteenseuranta-järjestelmiä on kuitenkin hyvin vaikea häiritä, sillä häirinnän pitäisi kohdistua lavetin ja ohjuksen väliseen yhteyteen. Olennaisimpana erona verrattuna komento-ohjattuun ohjukseen on lentoa ohjaavan tietokoneen sijainti. Komento-ohjatuissa ohjuksissa se sijaitsee tähtäinjärjestelmässä kun taas beam rider- ohjuksissa tietokone on sijoitettuna ohjukseen. Hyvänä esimerkkinä säteenseurajasta on Suomessakin oleva RBS-70-järjestelmä.



Kuva 10. Säteenseuranta [22].

3.2.3 Seuranta ohjuksen avulla (track via missile)

Seuranta ohjuksen avulla perustuu puoliaktiivisen tutkahakeutumisen ja radio-ohjaamisen yhdistelmään. Tämä järjestelmä vaatii tutka-aseman, joka sijaitsee maassa ja vastaanottimen, joka sijaitsee ohjuksessa. Ohjuksen lähestyessä maalia Track Via Missile -järjestelmä aktivoituu ja ohjus ohjautuu kohti havaittua maalia [5, 11].

Olennaista on huomata, että vaikka nimestä voisi päätellä seurannan tapahtuvan pelkästään ohjuksen avulla, ei se kuitenkaan näin ole. Tämä järjestelmä hyödyntää kahden eri järjestelmän hyötyjä, jotta se voisi toimia mahdollisimman tehokkaasti. Tämä tehokkuus muodostuu siitä, että ohjuksen saamat tiedot maalista lähetetään maassa sijaitsevalle asemalle, joka laskee samanaikaisesti maalin ja ohjuksen paikkaa. Nämä kaksi tietoa yhdistetään tämän aseman toimesta ja tämä uusi saatu tieto lähetetään takaisin ohjukselle. Tämä tieto on paljon tarkempi kuin pelkästään puoliaktiivisen hakeutumisen tuottama tieto [5].

Track via missile -tekniikan ongelmia on ollut maassa sijaitseva tutka, jonka on pitänyt olla sekä seuranta- että valvontatutka. Aikaisemmin tutkan aloittaessa seurannan, se ei ole kyennyt samanaikaisesti valvontaan, jolloin se kykeni havaitsemaan ainoastaan yhden maalin. Tätä heikkoutta kyettiin osittain parantamaan sillä, että lisättiin tutkien määrää, jolloin seuranta oli mahdollista suorittaa useampaan maaliin. Nykypäivänä tähän ongelmaan on saatu ratkaisu, joka on vaiheohjattu antenniryhmä. Tämäntyyppinen tutka kykenee sen ominaisuuksien ja tekniikan avulla vaihtamaan roolia esimerkiksi aikajaksottaisesti, jolloin seuranta ja valvonta ovat vielä riittävän tehokasta ja jatkuvaa [5].

Vahvuuksia tällä järjestelmällä on muun muassa se, että ohjus itsessään ei lähetä mitään, joten maali ei tiedä varmasti, onko ohjus laukaistu. Toisaalta tutkan mittauksen takia maali kuitenkin tietää, että sitä mitataan. Järjestelmän ominaisuuksista johtuen tämä on myös erittäin joustava järjestelmä, sillä mikäli maali esimerkiksi suorittaa häirintätoimenpiteitä, voidaan asemalla valita, toimitaanko pelkästään puoliaktiivisen hakeutumisen, radio-ohjauksen vai näiden molempien yhdistelmällä [16, 26].

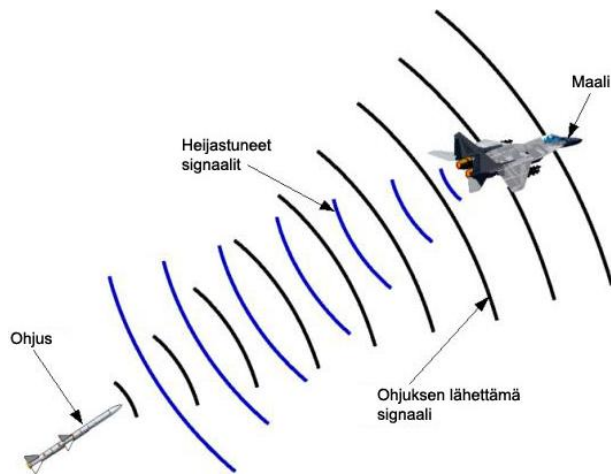
Ongelmia tällä järjestelmällä on kuitenkin muutamia. Ensinnäkin ohjuksen ja maassa sijaitsevan aseman välinen datalinkki voidaan periaatteessa tukkia häirinnän avulla. Toiseksi tutkan pitää olla koko ajan aktiivisessa tilassa, jolloin vastustaja voi käyttää tutkasäteilyyn hakeutuvia ohjuksia. Näiden lisäksi mikäli tutkan ja maalin väliin saadaan jonkinlainen este, ei maalista enää aiheudu heijastunutta säteilyä, jonka ohjus voisi havaita. Maali voi myös lentää tutkan tehokkaan kantaman ulkopuolelle, jolloin heijastunutta säteilyä ei enää synny [26].

Hyvinä esimerkkeinä tällaisista track via missile -järjestelmistä ovat jo aiemmin tässä tutkimuksessa mainittu amerikkalainen Patriot-ilmatorjuntaohjusjärjestelmä sekä venäläinen S-300-ilmatorjuntaohjusjärjestelmä. Näissä järjestelmissä on hyvin paljon samoja piirteitä ja keskeisiä parametreja, kuten esimerkiksi kantama. Koska nämä järjestelmät ovat suunniteltu samantyyppisistä vaatimuksista lähtien, voidaan nämä kaksi järjestelmää nähdä toistensa kilpailijoina muun muassa kolmansien maiden hankinnan osalta.

3.3 Maaliinhakeutumismenetelmät

3.3.1 Aktiivinen hakeutuminen

Aktiivisessa hakeutumisessa ohjuksessa itsessään on sensori, joka lähettää tutka- tai laservalaisua maaliin, josta heijastuvan kaiun perusteella se ohjautuu maaliin. Aktiiviseen hakeutumiseen perustuva ohjus vaatii suhteellisen ison ja painavan ohjuksen sensoreitten takia, vaikkakin ohjus pystyy toimimaan täysin itsenäisesti. Lisäksi tämän tyyppiset ohjukset ovat myös erittäin kalliita myös sen takia, että ohjus ja tutka ovat käytännössä kertakäyttöisiä.



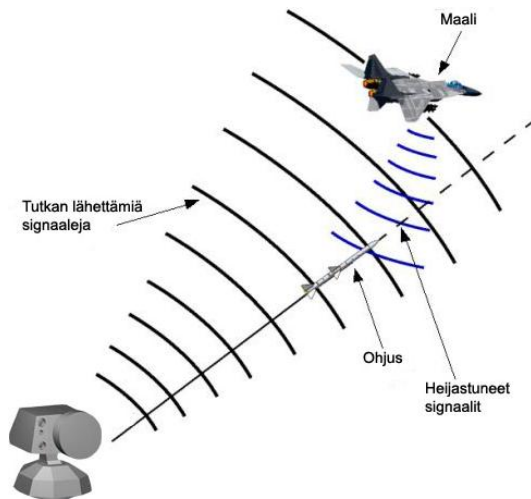
Kuva 11. Aktiivinen hakeutuminen [34].

Hyvin usein ohjuksen oma tutka kytkeytyy toimintaan vasta lähellä maalia, jotta ohjuksen hakupäätä ei pystyttäisi häiritsemään ennen kuin vasta viime hetkellä. Joissakin ohjuksissa on myös mahdollisuus vaihtaa aktiivisesta hakeutumisesta passiiviseen hakeutumiseen. Tämä tulee esille silloin kun ohjuksen omaa tutkaa häiritään. Tällöin vaihdetaan käyttöperiaatteeksi passiivinen hakeutuminen, jolloin mahdollisuus osua maaliin on parempi. Aktiiviseen hakeutumiseen perustuvat ohjukset kykenevät näkemään savun ja sumun läpi eikä lämpösäteily välttämättä häiritse ohjuksen toimintaa juuri ollenkaan.

Aktiivisesti hakeutuvia ohjuksia on paljon käytössä muun muassa hävittäjissä, jolloin ne ovat ilmataisteluohjuksia, mutta myös aktiiviseen hakeutumiseen perustuvia ilmatorjuntaohjusjärjestelmiä on olemassa. Esimerkkinä ilmataisteluohjuksesta on amerikkalainen AIM-120 AM-RAAM ohjus, jonka pohjalta on myös tehty maasta laukaistava ilmatorjuntaohjusversio SLAMRAAM. Tämä SLAMRAAM-ilmatorjuntaohjusjärjestelmä tosin käyttää aktiivista hakeutumista vasta maalin lähestymisvaiheessa [60].

3.3.2 Puoliaktiivinen hakeutuminen

Puoliaktiivisessa hakeutumisessa olennaisin asia on se, että ase tarvitsee ulkoisen valaisun. Tämä tarkoittaa sitä, että maalia voidaan valaista esimerkiksi laserin avulla, jolloin ase pyrkii suoraan kohti maalista heijastuvaan lasersäteilyyn. Aseessa oleva sensori on täysin passiivinen eli se ei lähetä mitään. Käytettävän lasersäteen teho on hyvin suuri ja valaisupulssijono on jatkuva. Suuresta tehosta johtuen on valaisu havaittavissa suhteellisen helposti laservaroitiminilla. Häirinnän erottamiseksi valaisusignaalia, käytetään valaisussa koodattua modulatiota.



Kuva 12. Puoliaktiivinen hakeutuminen [34].

Tällaiset laserpohjaiset järjestelmät ovat kustannustehokkaita ja usein myös tutkajärjestelmiä tarkempia kapean keilaleveyden ja lyhyen pulssin pituuden ansiosta. Laserin toimintaperiaatteesta ja rakenteesta johtuen laserissa ei ole myöskään sivukeiloja, joita pitkin häirintäsignaalia kyettäisiin lähettämään. Toisaalta mahdollisuudet muuttaa laserin aallonpituutta häirinnän väistämiseksi ovat hyvin rajalliset. Tämän lisäksi laser on herkempi reagoimaan sääilmiöille ja erilaisille epäpuhtauksille ilmakehässä. Häirinnän väistämiseksi on kehitetty erilaisia toimintatapoja aseelle, kuten esimerkiksi avaamalla hakupään vastaanotin sopivalla hetkellä ja koodaamalla oikea maalinvalaisusignaali valittavalla pulssijonolla. Toisaalta tämä vaatii myös valaisulaserilta vastaavan koodin toimiakseen oikein.

3.3.3 Passiivinen hakeutuminen

Passiivinen hakeutuminen perustuu maalin lähettämään luonnolliseen säteilyyn. Ohjuksessa sijaitseva sensori käyttää hyödyksi tätä säteilyä, jonka avulla se kykenee seuraamaan maalia. Ohjautumiseen kelpaa maalin lähettämä tutkasignaali tai moottorista ja palokaasuista emittoituva infrapuna- eli lämpösäteily. Tällaiset passiiviset järjestelmät ovat suhteellisen halpoja ja tehokkaita hakeutumisen suhteen. Nykyaikaiset lämpöhakupäät ovat syrjäyttämässä vanhemmat järjestelmät, jotka kykenivät vain aistimaan lämmön lähteen ja hakeutumaan siihen. Nykyään käytettävät lämpöhakupäät ovat 2-ulotteisia tuijottavia ilmaisimatriiseja. Näissä järjestelmissä voi olla kuviontunnistusjärjestelmät, jotka pystyvät tunnistamaan maalin siitä lähtevän infrapunasäteilyn perusteella. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että maalin lähettämän infrapunasäteilyn ja taustasäteilyn ero kyetään tunnistamaan ja tämän eron perusteella syntynyttä kuvaa verrataan järjestelmässä olevaan valmiiseen kuvaan [6].

Tutkasäteilyyn hakeutuvat ohjukset etsivät ja lukkiutuvat joko tutkan pääkeilan tai mahdollisuuksien mukaan sivukeilojen säteilyyn. Pyrkimys on, että ohjukset pystyisivät hakeutumaan myös sivukeilaan. Mikäli ohjus ei kykene hakeutumaan sivukeilaan, on sen ainoa mahdollisuus hakeutua tutkan säteilyyn silloin, kun pääkeila osoittaa ohjusta kohti. Tutkahakuisissa ohjuksissa on mahdollista myös käyttää kapeakaistaista etsintätilaa, joka tarkoittaa sitä, että tutkan lähetystaajuus tunnetaan etukäteen. Toinen mahdollisuus on käyttää laajakaistaista etsintätilaa, jolloin tutkan lähetystaajuutta ei tunneta etukäteen.

Vaikka tutkasäteilyyn hakeutuva ohjus kykeneekin paikantamaan säteilyn tulosuunnan, ei se voi tietää etäisyyttä. Tutkan paikantaminen on kuitenkin mahdollista lähestymällä sitä vinosti, jolloin ristisuuntimalla saadaan karkea paikka. Tämä tarkoittaa sitä, että ohjuksen on saatava tutkasignaali useita kertoja sekunnissa koko lentonsa ajan, mikä taas vaatii ohjukselta sen, että ohjuksen on kyettävä hakeutumaan tutkaan myös sen sivukeiloista. Mikäli tutka havaitsee ohjuksen ja lopettaa lähetyksen, ohjus ei kykene enää hakeutumaan säteilyyn.

Vaikka suurin osa tutkasäteilyyn hakeutuvista ohjuksista onkin tarkoitettu maamaaleja vastaan, ei niitä voida silti sulkea pois ilmatorjuntaohjuksien kannalta, sillä lentokoneissa on hyvin usein jonkinlainen tutka käytössä. Ilmatorjuntaohjusaseiden kannalta tutkasäteilyyn hakeutuva ohjus luo haasteita, sillä vaikka lentokoneiden tutkat toimivat samoilla perusteilla ja laskentakaavoilla kuin maassa sijaitsevat tutkat, eivät lentokoneiden tutkat toimi käytännössä samalla tavalla kuin maassa sijaitsevat tutkat. Esimerkiksi joissakin kiinteäsiipisissä koneissa tutka on sijoitettu koneen kärkeen ja sillä on vain tietty sektori, mihin se kykenee mittaamaan. Joissakin koneissa voi kuitenkin olla ympärisäteilevä tutka.

4 SUOMESSA OLEVIEN ILMATORJUNTAOHJUSJÄRJESTELMIEN VERTAILU

4.1 Ohjusjärjestelmien esittely

4.1.1 ItO 90 Crotale NG

Crotale ilmatorjuntaohjusjärjestelmä kehitettiin alun perin Ranskassa Thomson-Houstonin toimesta Etelä-Afrikkaa varten, sillä Iso-Britannia oli kieltäytynyt tukemasta Etelä-Afrikkaa ilmatorjuntaohjuksin. Ensimmäiset ballistiset prototyyppiohjukset ammuttiin jo vuonna 1965 ja koko järjestelmän kenttäkokeet alkoivat vuonna 1968, jotka saatiin valmiiksi vuonna 1971. Koska alkuperäisen Crotale-järjestelmän ominaisuudet ja havaitut saavutukset olivat niin hyviä, Ranskan asevoimat päättivät hankkia myös kyseisen järjestelmän. Crotale-järjestelmä suunniteltiin alun perin käytettäväksi maalla, mutta sen käyttöä merellä aloitettiin suunnitella jo vuonna 1966. Tällä merellä käytettävällä Crotale-järjestelmällä oli kuitenkin joitakin heikkouksia, kuten esimerkiksi paino ja huono kyky ohjusten torjuntaan, jotka lentävät lähellä merenpintaa. Tästä johtuen uudempi versio kehitettiin, joka oli kevyempi ja siinä oli käytössä infrapunaseurain [46].

Crotale NG (New Generation) on kehittyneempi versio alkuperäisestä järjestelmästä, jonka kehittäminen alkoi jo vuonna 1985. Crotale NG eroaa vanhasta järjestelmästä moneltakin osin. Esimerkiksi tässä uudessa järjestelmässä kaikki torjuntaan vaadittavat järjestelmät, kuten tutkat ja laskimet, ovat yhdellä alustalla. Lisäksi tämä versio käyttää uudempaa VT-1 ohjusta, jonka kehittäminen alkoi vain vuotta myöhemmin. Suomeen tämä ilmatorjuntaohjusjärjestelmä hankittiin vuonna 1990, vaikka hankinnat uudelle ilmatorjuntaohjusjärjestelmälle oli aloitettu jo 1980-luvun puolivälistä. Päätös tämän ilmatorjuntaohjusjärjestelmän ostamisesta tapahtui vuonna 1988. Suomi olikin tämän järjestelmän ensimmäinen ostaja ja käyttäjä. Suomeen hankittiin 20 tulyksikköä, jotka on sijoitettuna XA-180 ajoneuvoalustalle. Painoa yhdellä tällaisella järjestelmällä on 23 000 kg, joka ylittää lavetin standardimallin kantokyvyn. Tästä johtuen lavetin alustarakennetta on jouduttu kehittämään kestävämmäksi [39, 57].

Crotale NG-järjestelmän torniosaan kuuluu seuraavia osia:

- Pulssidoppleriin perustuva S-tutka-alueen valvontatutka
- Monopulssidoppleriin perustuva K_u -tutka-alueen tulenjohtotutka
- Infrapunakamera
- TV-kamera
- Infrapunasiippain.

Valvontatutkalla voidaan seurata aina 20 km saakka ja maksimi mittauskorkeus on noin 5 km. Tutkaa voidaan myös käyttää esimerkiksi sektorivalvonnassa tai kun ajoneuvo on liikkeessä. Lisäksi valvontatutkassa on sisäänrakennettu IFF-tunnistin. Tutka kykenee käsittelemään 20 maalia samanaikaisesti, joista 8 uhkaavinta maalia ovat seurannassa. Tulenjohtotutkan maksimi mittausetäisyys on noin 30 km ja sen keilanleveys on 1.20° . Lämpökameran maksimi mittausetäisyys on noin 19 km ja sillä voidaan käyttää joko laajaa näkökenttää ($8,1 \times 5,4^\circ$) tai kapeaa näkökenttää ($2.7 \times 1.8^\circ$). Mittausetäisyydessä on kuitenkin huomioitava maalin koko, joka vaikuttaa olennaisesti etäisyyteen ja havaitsemiseen. TV-kameran maksimietäisyys on noin 15 km ja sen näkökenttä on $2.4 \times 1.8^\circ$. Infrapunasiippainta käytetään ohjuksen seuraamiseen ensimmäisten sekuntien aikana, jonka jälkeen ohjusta seurataan joko kameroiden avulla tai tulenjohtotutkan avulla [35, 39, 57]. Crotale NG -ilmatorjuntaohjusjärjestelmän ohjuksen ominaisuudet ovat alla olevassa taulukossa.

Crotalen perusohjus	
Paino	75 kg (huom. laukaisukotelon kera 95 kg)
Pituus	2290 mm
Halkaisija	165 mm
Siipien kärkiväli	540 mm
Nopeus	3,5 Mach
Ohjautusmenetelmä	Komento-ohjaus
Ampumaetäisyys	Maksimi 11,000 m, minimi 500 m
Maalin maksimikorkeus	6,000 m
Moottori	Kiinteä, savuton polttoaine
Sytytin	Komentolinkkiin perustuva sytytin ja iskusytytin
Taistelukärki	13 kg suunnattu räjähdde
Kääntyvyys	35 g

Taulukko 3. Crotalen perusohjuksen ominaisuudet [39, 57].
Kuvia järjestelmästä löytyy internet-linkkeinä liitteestä 1.

Crotale NG -järjestelmällä voidaan ampua kaksi ohjusta yhteen maaliin, mikäli maali on riittävän kaukana. Lisäksi ohjusvaunuja voidaan käyttää siten, että yksi niistä toimii johtovaunu-

na, jolloin se käyttää ainoastaan omaa valvontatutkaansa ja lähettää tiedot muille ohjusvaunuille. Kaikki ohjusvaunut kykenevät lähettämään omat mittaustietonsa muille vaunuille, vaikka johtovaunua ei olisikaan. Crotale NG -järjestelmän latausaika ja uudelleenampuminen kestää noin 10 minuuttia. Lataamisella tarkoitetaan yhden kasetin (sisältää neljä ohjusta) vaihtaminen uuteen kasettiin [39].

Suomessa Crotale NG -ilmatorjuntaohjusjärjestelmää voidaan käyttää lentotukikohdan suojaamiseen, rannikkoalueen ja meripuolustuksen kohteiden suojaamiseen, yhtymän suojaamiseen, panssariprikaatin suojaamiseen tai siirtojen ja kuljetusten suojaamiseen [9].

Nämä eri tehtävät voivat erota toisistaan hyvinkin paljon, sillä esimerkiksi ilmavihollinen voi toimia eri tavalla aiemmin mainittuja kohteita vastaan. Ominaista näille kaikille on kuitenkin se, että useimmiten tätä ilmatorjuntaohjusjärjestelmää käytetään alueryhmitysperiaatteella, koska järjestelmän kantama on suhteellisen pitkä. Esimerkiksi lentotukikohdan suojaamisessa Crotale-vaunut sijoitetaan riittävän etäälle toisistaan ja usein myös mahdolliseen uhkasuuntaan, vaikka tämä voi vaihdella tilanteen mukaan.

4.1.2 ItO 91 Mistral

Kuten Crotale-ilmatorjuntaohjusjärjestelmä, myös Mistral-ilmatorjuntaohjusjärjestelmä on kehitetty Ranskassa. Mistral-järjestelmän kehittäminen alkoi oikeastaan vuonna 1977, jolloin Ranskassa tutkittiin sekä ammusilmatorjuntaa että ohjusilmatorjuntaa. Tämä johti siihen, että vuonna 1979 tutkimus päättyi siihen tulokseen, että uusi kolmannen sukupolven ohjus on paras vaihtoehto. Jo seuraavana vuonna valittiin pääkehittäjäksi Matra, joka sai suoritettua ohjuksen testiammunnat vuosien 1983–1988 välillä. Suomeen tämä järjestelmä hankittiin merivoimille vuonna 1991 ja se on tarkoitettu Hämeenmaa- ja Rauma-luokan veneiden ilmatorjuntaan [55].

Mistral-ilmatorjuntaohjusjärjestelmä on jalusta-asenteinen ja käyttää hyödyksi passiivista infrapunahakeutumista. Tämä ilmatorjuntaohjusjärjestelmä sisältää kolmijalan, ohjuksen ja sen laukaisuputken, elektroniikkaosan, paristo- ja viilennysosan, päivätähtäimen ja mahdollisesti lämpökameran. Paristo- ja viilennysosan tarkoituksena on jäähdyttää hakupää, jotta ohjus ylipäättensä toimisi oikein. Kun tämä osa laitetaan päälle, se toimii maksimissaan 45 sekunnin ajan, jonka jälkeen tämä osa on vaihdettava [55].

Mistral-ilmatorjuntaohjusjärjestelmä on suunniteltu samalla tavalla kuin muutkin kannettavat ilmatorjuntaohjusjärjestelmät, toisin sanoen kun ampujalle ei aiheudu vahinkoa laukaisun aikana. Mistral-järjestelmässä ohjus lähtee laukaisuputkesta ulosheittomoottorin ansiosta ja saavuttaa vauhdin, joka on noin 40 m/s. Kun ohjus on noin 15 metrin päässä, ulosheittomoottori tippuu pois ja matkamoottori syttyy. Matkamoottori palaa vain 2,5 sekuntia, mutta se on riittävä aika, jotta ohjus saavuttaa maksiminopeutensa [55].

Mistral-ilmatorjuntaohjusjärjestelmästä on olemassa eri versioita. Pelkällä mistral-versiolla tarkoitetaan järjestelmää, jossa on vain yksi ohjus/ampumalaitte. Simbad-versiolla tarkoitetaan järjestelmää, jossa ampumalaitteella on kaksi ohjusta. Tetral-järjestelmässä on neljä ohjusta ja Sadral-järjestelmässä kuusi ohjusta ampumalaitetta kohti. Suomessa on käytössä Sadral-versio, vaikkakin siitä käytetään yleisesti nimitystä Mistral-ilmatorjuntaohjusjärjestelmä. On huomattava, että ampumajalusta voi vaihdella versioiden mukaan. Esimerkiksi Suomessa tämä jalusta on suurikokoinen ja hyrrävakavoitu [23, 55]. Mistral-ilmatorjuntaohjusjärjestelmän ohjuksen ominaisuudet ovat seuraavassa taulukossa.

Mistral-1	
Paino	18,7 kg (huom. laukaisukotelon kera 24 kg)
Pituus	1860 mm
Halkaisija	92,5 mm
Siipien kärkiväli	180 mm
Nopeus	2,5 Mach
Hakeutumismenetelmä	Infrapuna, passiivinen
Ampumaetäisyys	Maksimi 5,000–6,000 m maalista riippuen, minimi 300 m
Maalin maksimikorkeus	3,000 m
Maalin minimikorkeus	5 m
Moottori	Ulosheitto- ja matkamoottori kiinteällä polttoaineella
Sytytin	Laserherätesytytin ja iskusytytin
Taistelukärki	3 kg, jossa 1600 volframihaulia (haulien paino n. 2 kg)
Hakupää	Jäähdytetty kaksikanavainen 2–5 µm:n taajuusalue, hakusektori ±38°

Taulukko 4. Mistral-1-ilmatorjuntaohjuksen ominaisuudet [55].
Kuvia järjestelmästä löytyy internet-linkkeinä liitteestä 2.

4.1.3 ItO 96 Buk-M1

Neuvostoliittolaisen Buk-ilmatorjuntaohjusjärjestelmän kehittäminen on alkanut 1970-luvun alussa ja se tapahtui Neuvostoliiton maavoimien ja merivoimien välisenä yhteistyönä. Tämän järjestelmän tarkoituksena oli aikaisempien järjestelmien, SA-4 ja SA-6, korvaaminen. Tarve tälle järjestelmälle oli kohtalainen, sillä esimerkiksi SA-4-ilmatorjuntaohjusjärjestelmä oli vaikeasti huollettava, kun taas SA-6-ilmatorjuntaohjusjärjestelmän ongelmana oli se, että jokainen ohjusvaunu tarvitsi oman tutkan. Buk-järjestelmä tuli operatiiviseen käyttöön vuonna 1979, mutta vasta vuonna 1982 sitä alettiin käyttää laajemmassa mittakaavassa. Tämän ensimmäisen version nimi oli 9K37 Buk. Koska tällä järjestelmällä oli kuitenkin paljon ongelmia, jouduttiin siitä kehittämään paranneltu versio. Tämä uudempi versio tuli käyttöön vuonna 1983 ja sen nimi on Buk-M1. Tämä järjestelmä käytti hyödyksi uutta 9S18M1-tutkaa ja sen häirinnänsietokykyä oli paranneltu [49, 59].

Suomessa oli aikaisemmin käytössä Petshora-ilmatorjuntaohjusjärjestelmä, jonka seuraajan etsiminen alkoi vuonna 1993. Seuraajaksi valittiin Buk-M1-ilmatorjuntaohjusjärjestelmä ja Suomi olikin tämän järjestelmän ensimmäinen ulkomainen ostaja. Suomeen tämä järjestelmä saatiin vuonna 1996. Tämä järjestelmä on tarkoitettu yksinomaan pääkaupunkiseudun ilmatorjuntaan, mutta mikäli tilanne niin vaatii, voidaan sitä käyttää myös muualla [40].

Buk-M1-ilmatorjuntaohjusjärjestelmään kuuluu tavallisesti ohjusvaunu, johtokeskusvaunu, tutkavaunu ja latausvaunu. Vaunu on kaikissa sama, GM 569 tela-ajoneuvo. Maksiminopeus tiellä tällä vaunulla on 65 km/h ja maastossa 45 km/h. Ajoetäisyys yhdellä tankkauksella on noin 500 km. Ohjusvaunuun kuuluu tulenjohtotutkan lisäksi maksimissaan neljä ohjusta ja vaunun sisällä on ampumiseen tarvittavat elektroniikat ja laskimet. Ohjusvaunun etsintä-, seuranta- ja valaisututka on jatkuvaan monopolssiin perustuva tutka, joka käyttää C/X-tutka-aluetta (6–10 GHz) hyväksi. Tutkan maksimi mittausetäisyys on 85 km ja pienin mittausetäisyys on 3 km. Lukituksen se voi saada maksimissaan 70 km:n päästä. Ohjusvaunuun kuuluu myös laseretäisyysmittari ja tv-kamera [40, 49, 59].

Johtokeskusvaunussa on tulenjohtolaskin, jonka avulla vaunu kykenee muun muassa automaattiseen maalinjakoon ja ohjuksen sekä maalin tietojen käsittelyyn. Laskin kykenee käsittelemään maksimissaan 75 eri maalia ja 15 automaattiseurantaan, jotka se on saanut tutkavaunulta. Vaunussa on myös tarvittavat viestivälitteet yksikön johtamista varten [49, 59].

Tutkavaunussa on vaiheohjattu antenniryhmä, jonka avulla maalista saadaan etäisyys, korkeus ja nopeus selville. Tällä vaiheohjatulla antenniryhmällä muodostetaan kapea keila, jota elektronisesti ohjaamalla saadaan korkeus, kun taas suunta saadaan kääntämällä lavettia. Tämä 3D-tutkan tutka-alueita ei ole suoraan annettu, mutta aallonpituus on senttimetri-luokkaa. Maksimi mittausetäisyys on noin 160 km ja maksimi mittauskorkeus on noin 25 km. Kaiken kaikkiaan tämä tutka kykenee käsittelemään 100 maalia kerralla [40, 64].

Latausvaunu on tarkoitettu ohjusvaunun lataamiseen ja se kykeneekin kantamaan maksimissaan 8 ohjusta, joista neljä on laukaisuvalmiina. Tämä tarkoittaa sitä, että nämä neljä ohjusta voidaan laukaista suoraan latausvaunulta tarvittaessa. Koska latausvaunulla ei ole omaa tutkaa, latausvaunu määritetään orjalavetiksi, jotta ampuminen olisi mahdollista [40, 49].

Ohjuksessa itsessään on Agat 9E50 -hakupää, jossa on inertiamuisti signaalin katoamisen takia. Seuraavasta taulukosta löytyy perusohjuksen ominaisuudet ja kuvia Buk-M1-ilmatorjuntaohjusjärjestelmästä löytyy internet-linkkeinä liitteestä 3.

9M38M1 (BUK)	
Paino	685 kg
Pituus	5550 mm
Halkaisija	400 mm
Siipien kärkiväli	860 mm
Nopeus	2,5 Mach
Hakeutumismenetelmä	Puoliaktiivinen tutkahakeutuminen
Ampumaetäisyys	Maksimi 32,000 m, minimi 3000 m
Maalin maksimikorkeus	22,000 m
Maalin minimikorkeus	15 m
Maalin nopeus	Lähenevä: 850 m/s Loittoneva: 300 m/s
Moottori	Yksivaiheinen kiinteä polttoaine
Sytytin	Tutkaherätesytytin ja iskusytytin
Taistelukärki	70 kg
Kääntyvyys	10 g

Taulukko 5. 9M38M1-ohjuksen ominaisuudet [59].

4.1.4 ItO 2004 Umkhonto-IR

Umkhonto-ilmatorjuntaohjuksen suunnittelu lähti käyntiin 1980-luvun loppupuolella Etelä-Afrikan halusta korvata aikaisempi Crotale-ilmatorjuntaohjusjärjestelmä. Korvaajaksi ei kuitenkaan tullut uutta järjestelmää, vaan pikemminkin SAHV-3-ilmatorjuntaohjus, joka on

elektronisesti ja mekaanisesti yhteensopiva Crotale-järjestelmän kanssa. Vasta vuonna 1997 aloitettiin tämän järjestelmän kehittäminen merivoimien aluksiin sopivaksi. Vuoteen 2001 mennessä järjestelmästä oli tehty pystylaukaistava ja testiammunnat aloitettiin. Vuoteen 2003 mennessä järjestelmä oli hyväksytty, vaikkakin viimeiset suoritettavat ammunnat toteutettiin vuonna 2005 [48, 54].

Alun perin tämän merivoimille tarkoitetun järjestelmän nimi oli SAHV-IR, mutta lopulliseksi nimeksi tuli Umkhonto. Umkhonto-ilmatorjuntaohjusjärjestelmästä on kaksi eri versiota, Umkhonto-R ja Umkhonto-IR. Umkhonto-R perustuu aktiiviseen tutkahakeutumiseen, kun taas Umkhonto-IR perustuu passiiviseen infrapunahakeutumiseen. Suomi allekirjoitti sopimuksen Umkhonto-IR-ilmatorjuntaohjusjärjestelmän hankkimisesta vuonna 2002 ja järjestelmän nimeksi tuli ItO 2004. Ensimmäiset testiammunnat suomalaisesta aluksesta suoritettiin vuonna 2005 lähellä Cape Townia ja ensimmäiset ammunnat Suomessa suoritettiin vuonna 2006 Lohtajalla. Suomi on tällä hetkellä ainoa Euroopan maa, jolla tämä järjestelmä on otettu palveluskäyttöön. Ruotsi on seuraamassa perässä ja aloittanut hankintatoimet Umkhonto-R-version suhteen [48, 51].

Umkhonto-IR-ilmatorjuntaohjusjärjestelmään kuuluu ohjus ja laukaisuputki, laskin, viestijärjestelmä ja kaasujärjestelmä. Lisäksi aluksilla on omat tutkat, joiden avulla maali havaitaan ja osoitetaan ohjukselle. Suomessa on käytössä esimerkiksi TRS-3D-tutka, joka perustuu vaiheohjattuun antenniryhmään ja käyttää hyödyksi G-tutka-aluetta (4 – 6 GHz). Tavallisella versiolla maksimi mittausetäisyys on noin 90 km ja parannetulla versiolla maksimi mittausetäisyys on jopa 180 km [48, 65]. On huomattava, että suomalaisissa aluksissa on tietoverkko, johon on liitetty aluksen eri sensorit. Tämän integroinnin johdosta asejärjestelmillä ei ole suoranaisesti omia sensoreita.

Umkhonto-IR-ilmatorjuntaohjusjärjestelmällä on monimaalikyky, jolloin järjestelmä kykenee tulittamaan neljää maalia yhtä aikaa. Suomessa tämä järjestelmä on asennettu Hamina- ja Uusimaa-luokan veneisiin, joissa kummassakin on kahdeksan ohjusta. Tällöin järjestelmä kykenee ampumaan kaksi ohjusta/maali. Tarvittaessa toinen alus tai kiinteä tutka voi myös välittää maalin tiedot ampuvalle yksikölle. Tämä järjestelmä on tarkoitettu näiden aluksien omasuojailmatorjuntaan, mutta ne kyetään liittämään osaksi ilmapuolustusta. Tämän ansiosta niitä kyetään käyttämään myös ilmatorjuntatehtäviin eri alueilla [38, 48].

Ohjus on ensimmäinen passiiviseen infrapunahakeutumiseen perustuva ohjus, joka käyttää hyödyksi pystylaukaisua. Ohjuksessa on LOAL (Lock On After Launch) -toiminto, inertiaohjaus, yksisuuntainen komentolinkkipäivitys ja digitaalinen automaattiohjaus. Toisin sanoen ohjus saa alukselta maalin paikkatietoja aina siihen asti, kunnes ohjuksen oma hakupää avautuu. Hakupään avautuminen riittävän lähellä maalia vaikeuttaa ohjuksen häirintää. Ohjus käyttää jäähdytettyä indiumantimonide-hakupäätä, joka toimii kahdella taajuudella [38, 48]. Ohjuksen ominaisuudet selviävät seuraavasta taulukosta.

Umkhonto-IR	
Paino	127 kg
Pituus	3320 mm
Halkaisija	180 mm
Siipien kärkiväli	500 mm
Nopeus	2,5 Mach
Ohjautusmenetelmä	Joka suunnan infrapunahakeutuminen, ammu ja unohda
Ampumaetäisyys	Maksimi 12,000 m, minimi 800 m
Maalin maksimikorkeus	10,000 m
Moottori	Yksivaiheinen kiinteä polttoaine
Sytytin	Herätesytytin
Taistelukärki	23 kg
Hakupää	Jäähdytetty kaksikanavainen hakupää
Kääntyvyys	40 g

Taulukko 6. Umkhonto-IR-ohjuksen ominaisuudet [30, 48].

Kuvia järjestelmästä löytyy internet-linkkeinä liitteestä 4.

4.1.5 ItO 2005 Asrad-R

Asrad-ilmatorjuntaohjusjärjestelmä on kehitetty Rheinmetall Defence Electronics -yhtiön toimesta eikä sen kehittelyn taustalla ole minkään valtion asettamaa kilpailua tai pyyntöä. Uudempi versio, Asrad-R, on kehitetty yhteistoiminnassa Saab Bofors Dynamics of Sweden -yhtiön kanssa ja ensimmäinen prototyyppi valmistettiin vuonna 1998. Tämä asejärjestelmä voidaan asentaa erilaisten ajoneuvojen päälle, mutta esimerkiksi Suomessa tämä järjestelmä on konttiasenteinen ja se on asennettu Unimog 5000 -keskiraskaan kuorma-auton päälle. Tämä järjestelmä on käytössä valmiusprikaatien ilmatorjuntaan, mutta sitä voidaan käyttää myös pääkaupunkiseudun ilmatorjuntaan. Asrad-R-ilmatorjuntaohjusjärjestelmään kuuluu ohjustorin lisäksi Oerlicon Contraves Kanadan johtamisjärjestelmä ja Ericsson Microwave Systemin paranneltu Hard 3D -valvontatutka. Nämä järjestelmät ovat kaikki sijoitettuna ohjusvaunuun. Ominaista Asrad-R-järjestelmälle on se, että se kykenee ampumaan eri ohjuksia, kuten esi-

merkiksi Bolide-ohjuksen, Stinger-ohjuksen tai vaikkapa Mistral-ohjuksen. Yksi ohjusvaunu kykenee kuljettamaan neljä ampumavalmista ohjusta kerrallaan [58, 62].

Ohjusvaunuun kuuluu ohjusjalusta, joka liikkuu pysty- ja vaakasuunnassa, jalustan elektronikkaosat ja ohjausosat, tutka ja laskin. Tarvittaessa tätä ohjusvaunua voidaan myös etäkäyttää aina 100 metrin päästä kaapelin avulla. Ohjusvaunussa on lisäksi laseretäisyysmittari, lasersäteen lähetin, tv-kamera ja lämpökamera (8–12 μm), joita hyödynnetään ohjuksen ampumiseen ja maalin havaitsemiseen. Ohjusvaunun Hard 3D -tutka perustuu pulssidoppleriin ja käyttää hyväksi X-tutka-aluetta. Lisäksi tutkassa on sisäänrakennettu IFF-tunnistin. Tämä tutka on LPI (Low Probability of Intercept) -tutka, joka tarkoittaa sitä, että tutka lähettää signaalia hyvin pienellä teholla. Tällöin tutkaa on vaikea havaita jopa nykyaikaisilla tiedusteluvälineillä. Tällä tutkalla kyetään mittaamaan aina 20 km:n etäisyydelle maalista riippuen ja seurannassa voi olla 20 maalia ja 5 häirintävektoria kerrallaan [52, 58, 62].

Kun kyseessä on 3D-tutka, josta tämä järjestelmä saa tiedot maalista, järjestelmä osaa automaattisesti suunnata nämä kamerat oikeaan suuntaan. Mikäli käytössä olisi tavallinen tutka, joutuisi operaattori itse etsimään maalin korkeussuunnassa. Kun operaattori havaitsee maalin monitorissaan, seurantaportti siirretään tämän maalin päälle, jotta automaattiseuranta saa lukituksen. Kun operaattori valitsee maalin ja ottaa sen seurantaan, laskin laskee automaattisesti laukaisuun tarvittavat tiedot ja samalla aktivoi yhden ohjuksen. Maalin ollessa ohjuksen kantaman sisällä, laskin ilmoittaa tämän operaattorille äänellä ja monitorilla. Koska tämä järjestelmä on kuitenkin säteenseurantaan perustuva, ei yhdellä vaunulla ole monimaalikykyä [58, 62].

Asrad-R-ilmatorjuntaohjusjärjestelmä on suunniteltu siten, että yksi ohjusvaunu voi toimia aina johtajana, jolloin se voi komentaa muita ohjusvaunuja. Koska näillä kaikilla ohjusvaunuilla on oma tutka, voidaan ohjusvaunujen tutkan tietoa lähettää toistensa välillä. Tämän tiedon perusteella ohjusvaunu, joka ei mittaa, voi ottaa maalin seurantaan kameroillaan. Suomen käytössä oleva Asrad-R-ilmatorjuntaohjusjärjestelmä käyttää hyödyksi Bolide ohjusta, joka on ruotsalaisvalmisteinen. Koska ohjuksen korjauskomentojen vastaanotin sijaitsee ohjuksen takaosassa, on sen häirintä lähes mahdotonta. Käytännössä häirintälähete pitäisi saada ohjuksen ja ohjusvaunun välille. Ohjuksen ominaisuudet selviävät seuraavasta taulukosta.

Bolide	
Paino	16,5 kg (huom. laukaisukotelon kera 26,5 kg)
Pituus	1320 mm
Halkaisija	106 mm
Siipien kärkiväli	320 mm
Nopeus	2 Mach
Ohjautusmenetelmä	Lasersäteenseuranta, aallonpituus 0,9 µm
Ampumaetäisyys	Maksimi 8,000 m, minimi 250 m
Maalin maksimikorkeus	5,000 m
Moottori	Ulosheitto- ja matkamoottori kiinteällä, savuttomalla polttoaineella
Sytytin	Laserherätesytytin ja iskusytytin
Taistelukärki	1,1 kg suunnattu räjähdde, jossa 3000 volframihaulia
Kääntyvyys	25 g
Tuhoamistodennäköisyys	>90 % kohtaamisectorissa

Taulukko 7. Bolide-ohjuksen ominaisuudet [63].

Kuvia järjestelmästä löytyy internet-linkkeinä liitteestä 5.

4.1.6 ItO 2005M RBS 70

Vuonna 1967 Ruotsin puolustusvoimat aloitti tutkimuksen, jonka tarkoituksena oli selvittää ilmapuolustuksen vaatimukset ja siihen vaadittava kalusto. Se johti siihen, että vuonna 1969 tehtiin sopimus Saab Bofors Dynamicsin kanssa RBS 70 -ilmatorjuntaohjusjärjestelmän kehittämistä. Järjestelmän tehokkuuden ja toimivuuden parantamiseksi tehtiin myös sopimus Pi-69 IFF -tunnistimen ja PS-70/R Giraffe 40 -tutkan liittämistä järjestelmään. Vaikka tutka liitettiin järjestelmään, ei se siihen kuitenkaan suoranaisesti kuulu. Toisin sanoen kun puhutaan RBS 70 -ilmatorjuntaohjusjärjestelmästä, tarkoitetaan sillä ainoastaan ohjusjärjestelmää. RBS 70 -ilmatorjuntaohjusjärjestelmän koeammunnat suoritettiin vuosien 1974 ja 1975 välillä ja ensimmäiset järjestelmät saatiin operatiiviseen käyttöön vuonna 1976 Ruotsissa. Tosin tutka saatiin vasta vuonna 1979. Tämä ensimmäinen RBS 70 -ilmatorjuntaohjusjärjestelmä oli erilainen kuin mitä se tänä päivänä on. Esimerkkeinä eroista mainittakoon Rb70-ohjus ja järjestelmän toiminta pelkästään päivänvalossa. 1980-luvun puolivälissä aloitettiin RBS 70 -ilmatorjuntaohjusjärjestelmän parantaminen, mikä johti siihen, että järjestelmään tuli nyt myös kyky toimia yöllä lämpökameran toimesta ja järjestelmä sai uudemman tutkan (Giraffe 75) [56].

RBS 70 -ilmatorjuntaohjusjärjestelmä ei vaadi tutkaa toimiakseen, mutta tällöin ennakkovaroitus on saatava jollain muulla tavalla. Suomeen hankittiin pelkästään ohjuslavetteja, koska Suomella on käytössä Giraffe Mk IV -tutka. RBS 70 -ilmatorjuntaohjusjärjestelmä voi olla joko ajoneuvoasenteinen tai vaikkapa kolmijalka-asenteinen, joista jälkimmäinen on käytössä Suomessa. RBS 70 -järjestelmään kuuluu ohjus ja sen laukaisuputki, BORC-lämpökamera, päivätahtäin, ampumajalusta ja IFF-laite, joka tosin ei ole Suomeen hankitussa versiossa. BORC-lämpökamera on kolmannen sukupolven lämpökamera, joka käyttää hyödyksi 8–9 µm:n aluetta ja näkökenttä on $12 \times 9^\circ$. Lämpökameran ilmaisimen koko on 320×240 pikseliä ja lämpökamera jäähdytetään mikrojäähdyttimen toimesta. Kiinteäsiipiset koneet kyetään havaitsemaan 10 km:n päästä ja helikopterit noin 6 km:n päästä [53, 56].

RBS 70 -ilmatorjuntaohjusjärjestelmä pystyy ampumaan ruotsalaisvalmisteisia Mk 2 -ilmatorjuntaohjuksia ja sen uudempaa versiota, Bolide-ohjusta. Koska järjestelmä on kolmijalalla ja siinä on vain yksi ohjus, on laukaisuputki kertakäyttöinen. Järjestelmän käyttöönkuntolaitto kestää noin 30 sekuntia ja lataaminen ja uudelleenlaukaisu noin 7 sekuntia. Suomessa järjestelmää käytetään valmiusprikaatien ilmatorjuntaan ja näitä järjestelmiä käytetään hyvin usein pataljoonien taisteluun liittyen. Tarvittaessa näitä järjestelmiä voidaan myös käyttää esimerkiksi lentotukikohdan suojaamiseen. Tätä järjestelmää varten on myös käynnistetty nostolavahanke, jotta järjestelmän ominaisuuksia kyettäisiin hyödyntämään mahdollisimman paljon [56]. Kuvia järjestelmästä löytyy liitteestä 6.

4.2 Ohjusjärjestelmien vertailu

Näiden Suomessa olevien ilmatorjuntaohjusjärjestelmien vertailu suoritetaan tässä tutkimuksessa järjestelmistä annettujen julkisten tietojen perusteella. Tekniikoiden lisäksi tässä käsitellään osittain myös niiden taktista käyttöä, jonka tekniikka mahdollistaa. Vaikka tässä tutkimuksessa onkin merivoimien aluksien ilmatorjunta ja maavoimien ilmatorjunta mukana, pyritään niiden välillä myös suorittamaan vertailua, vaikka alustat ja ympäristö eroavat toisistaan todella paljon.

Suomessa on sekä hakeutumiseen että ohjautukseen perustuvia järjestelmiä, joiden välillä on eroja. Crotale NG -ilmatorjuntaohjusjärjestelmä on esimerkiksi komento-ohjaukseen perustuva, joten se tarvitsee tutkan toimiakseen. Toisaalta esimerkiksi Buk-M1-ilmatorjuntaohjusjärjestelmä vaatii myös tutkan, koska se perustuu puoliaktiiviseen hakeutumiseen. Jo pelkästään tutkan käyttö muodostaa suuria eroja järjestelmien välille. Tutkaa kyetään häiritsemään monella eri tapaa, joka voi johtaa siihen, että esimerkiksi yhteys ohjukseen

menetetään. Hakeutumiseen perustuvien järjestelmien osalta tutkaa ei välttämättä tarvita, mutta se ei tarkoita sitä, ettei hakupäitä kyettäisi häiritsemään. Häirinnästä johtuen ohjuksien tekniikka on edistynyt siten, että esimerkiksi tutkat voivat olla LPI-tutkia, joilla on pieni lähetysteho ja niitä ei havaita helposti. Lämpösäteilyyn hakeutuviissa ohjuksissa puolestaan on kaksikanavaisia hakupäitä, joten soihujen merkitys on pienentynyt. Tällä hetkellä häirinnän kannalta parhaat ilmatorjuntaohjusjärjestelmät ovat Asrad-R ja RBS 70. Koska nämä perustuvat lasersäteenseurantaan, on niiden häirintä erittäin vaikeaa. Toisaalta kuitenkin lasersäteily havaitaan helposti, jolloin lentäjä tietää, että sitä valaistaan.

Ilma-aseen käyttö on muuttunut paljon ja ilmasta-maahan ammuttavien aseiden etäisyys on kasvanut hyvin paljon, jolloin aseiden laukaisu tapahtuu koneen ollessa hyvinkin kaukana kohteesta. Toki on ymmärrettävä, että kaikkia kohteita vastaan ei välttämättä käytetä näin teknisiä aseita vaan myös perinteinen pommitus on yhä vaihtoehto, koska se on halpa ja massamainen. Joka tapauksessa ilma-aseen kehitys aiheuttaa ilmatorjunnalle yhä suurempia haasteita. Ohjuksien kantaman tulisi olla riittävä, jotta kohteita kyetään suojaamaan tehokkaasti. Lisäksi niiden on kyettävä toimimaan myös esimerkiksi risteilyohjuksia vastaan. Suomen kauaskantoisin ilmatorjuntaohjusjärjestelmä on tällä hetkellä Buk-M1-ilmatorjuntaohjusjärjestelmä, jolla on riittävä kantama esimerkiksi kiinteäsiipisiä koneita vastaan, joiden aseistuksena voi olla ohjatut pommit. Toisaalta Umkhonto-IR-ilmatorjuntaohjusjärjestelmä ja osittain myös Mistral-ilmatorjuntaohjusjärjestelmä ovat hyviä esimerkiksi pääkaupunkiseudun puolustamiseen, sillä näitä aluksia kyetään viemään kauas pääkaupunkiseudun alueelta. On kuitenkin muistettava, että näillä kyetään puolustamaan ainoastaan merellä.

Suomessa olevien ilmatorjuntaohjusjärjestelmien ohjukset ovat myös ohjaukseltaan erilaisia, joissakin on käytössä etusiivekkeet ja joissakin on käytössä takasiivekkeet. Nämä vaikuttavat siihen, miten ohjusta ohjataan. Mistral- ja Crotale NG -ilmatorjuntaohjusjärjestelmien ohjuksissa on käytössä etusiivekkeet, kun taas Buk-M1- ja Umkhonto-IR -ilmatorjuntaohjusjärjestelmissä on siivekkeet, jotka alkavat noin ohjuksen puolivälistä ja jatkuvat aina perään asti. Bolide-ilmatorjuntaohjuksessa puolestaan perässä 4 siivekettä ja noin ohjuksen puolivälissä 4 siipeä. Buk-M1- ja Umkhonto-IR-ilmatorjuntaohjusjärjestelmien ohjukset ovat kooltaan suurimpia ja niiden reagointi ohjauksikomentoihin on hiukan hitaampi kuin muiden ohjuksien. Ohjauksikomentojen kannalta RBS 70 -ilmatorjuntaohjusjärjestelmä on vaativin, sillä ohjauksikomennot perustuvat ampujan kykyyn pitää maali tähtäimessä.

Taistelukärjen koko vaihtelee 1,1–70 kg:n välillä. Pienin, 1,1 kg:n taistelukärki, on Bolide-ilmatorjuntaohjuksessa. Tämä taistelukärki on suunnattu räjähdde ja sisältää 3000 volframihaulia, joten se on todella tehokas. Tämä kuitenkin vaatii sen, että ohjus riittävän lähellä maalia. Mistral-1-ilmatorjuntaohjuksessa on 3 kg:n taistelukärki joka sisältää 1600 volframihaulia, mutta tietoa ei ole, onko tämä suunnattu räjähdde. Tämä kuitenkin kyetään räjäyttämään hiukan kauempaa maalista kuin Bolide-ohjus. Crotale NG -ilmatorjuntaohjusjärjestelmän perusohjus sisältää 13 kg:n suunnatun sirpaleräjähteen, mutta sirpaleiden määrästä ei ole tietoa. Umkhonto-IR-ilmatorjuntaohjusjärjestelmän taistelukärki painaa 23 kg, mutta tarkempaa julkista tietoa siitä ei ole käytettävissä. On otaksuttavissa, että se perustuu myös suunnattuun sirpalevaikutukseen, joka on käytössä saman kokoluokan järjestelmissä. Buk-M1-ilmatorjuntaohjusjärjestelmän ohjuksen taistelukärki painaa 70 kg ja se perustuu sekä sirpaloitumiseen että osittain myös painevaikutukseen. Taistelukärjen koko vaihtelee ohjuksen koon mukaan, mitä isompi ohjus, sitä isompi taistelukärki siihen on mahdollista sijoittaa. Kuitenkin pienemmilläkin taistelukärjillä on mahdollista saada tehokas vaikutus.

Ilmatorjuntaohjusjärjestelmissä on otettava huomioon myös ympäristö ja sää. Säällä on erilainen vaikutus eri järjestelmiin, sillä esimerkiksi todella rankka räntäsade aiheuttaa hankaluuksia ilmatorjuntaohjuksille, jotka perustuvat infrapunahakeutumiseen. Ympäristö osalta suurimpia vaikuttavia asioita ovat puusto ja erilaiset mäet. Asrad-R- ja RBS 70 -ilmatorjuntaohjusjärjestelmät ovat sijoitettava siten, että niillä on mahdollisimman vähän katveja. Suomessa olevat ilmatorjuntaohjusjärjestelmät ovat tekniikan osalta jokasään toimintakykyisiä, mutta sää kuitenkin rajoittaa niiden käyttöä. Esimerkiksi RBS 70 -ilmatorjuntaohjusjärjestelmää ei kyetä käyttämään, mikäli maalia ei nähdä.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä tutkielmassa esitettyihin tutkimuskysymyksiin on vastattu eri luvuissa. Päättökysymykseen on pyritty vastaamaan niin, että lukija ymmärtää mitä eri tekniikoita on olemassa ja käytössä tällä hetkellä. Kysymykseen ei ole pyritty vastaamaan erittäin yksityiskohtaisesti vaan pikemminkin yleisellä tasolla, jotta nämä tekniikat voisi ymmärtää paremmin. Moottoreiden osalta kysymykseen on vastattu monipuolisesti ja luotu myös kuvaa siitä, minkälaisia vaihtoehtoja on mahdollista käyttää ylipäättänsä ohjuksissa. Lisäksi moottorien toimintaperiaatteita on pyritty avaamaan. Hakupäiden ja ohjautus- ja maaliinhakeutumisjärjestelmien osalta tekniikka on käsitelty niin, että toimintaperiaatteet ovat tulleet selviksi ja samalla käsitelty myös niitä reunaehtoja, joita eri järjestelmille on olemassa. Suomessa olevien ilmatorjuntaohjusjärjestelmien osalta on pyritty tuomaan hiukan järjestelmien historiaa, jotta ymmärtää, minkälainen kehityskaari jollakin järjestelmällä on ja minkälaisia teknisiä ratkaisuja on tehty.

Ilmatorjuntaohjusjärjestelmät ja ilmatorjuntaohjukset ovat erittäin teknisiä laitteita, jotka muodostuvat monista vaativista kokonaisuuksista. Nämä kokonaisuudet käsittävät muun muassa moottorin, hakupään ja siivekkeiden ohjauksen. Ohjuksiin kohdistuu myös suuret voimat ja rasitukset. On tärkeää ymmärtää nämä rasitukset ja voimat, jotta ylipäättänsä voi suunnitella esimerkiksi uutta ohjusta. Lisäksi on kyettävä valitsemaan, minkälaiset vaatimukset halutaan sekä ohjukselle että järjestelmälle. Juuri nämä ominaisuudet ovat ratkaisevassa osassa siinä, minkälainen ohjus halutaan. Esimerkiksi ohjuksen osalta tekniikoiden valinta on aina tasapainottelua erilaisten reunaehtojen kanssa, kuten esimerkiksi siivekkeiden osalta. Mikäli halutaan ohjaukseltaan hyvin reagoiva ja nopea ohjus, voidaan valita etusiivekkeet. Tämä puolestaan aiheuttaa kuitenkin sen, että esimerkiksi hakupäälle ei välttämättä jää niin paljon tilaa.

Ilmatorjuntaohjusjärjestelmät ovat myös riippuvaisia osittain ympäristöstään, sillä esimerkiksi RBS 70 -ilmatorjuntaohjusjärjestelmä vaatii suoran näköyhteyden maaliin. Tällöin tämän järjestelmän tulisi olla riittävän korkealla tai aukealla paikalla, jotta näköyhteys maaliin kyetään pitämään. Pystysuoraan ammuttavat ohjukset ovat yksi ratkaisu ympäristön merkityksen pienentämiseen, mutta ohjautustavasta tai maaliinhakeutumistavasta riippuen sekään ei välttämättä riitä. Ohjukset, jotka käyttävät passiivista tai aktiivista hakeutumista, ovat periaatteessa parhaimpia ympäristön kannalta, sillä kun ohjukset ammutaan, ei ampujan tarvitse enää pitää maalia tähtäimessä.

Suomessa olevat ilmatorjuntaohjusjärjestelmät ovat erilaisia, joka voidaan luetella joko vahvuudeksi tai heikkoudeksi. Vahvuutena on se, että ei ole vain yhtä järjestelmää, joten vastus-

taja joutuu ottamaan tämän huomioon toiminnassaan. Heikkoutena sen sijaan on se, että on paljon erilaisia osia ja laitteita, joita tulisi huoltaa. Ympäristö asettaa näille järjestelmille tietyn haasteen, mutta näiden järjestelmien oikealla käytöllä ympäristön merkitystä kyetään pienentämään hyvin paljon. Järjestelmien suorituskyky on hyvä ja niillä kyetään kiistämään ilmaherruus vähintään paikallisesti.

Aiemmin mainittujen asioiden perusteella seuraava ilmatorjuntaohjusjärjestelmä voisi olla esimerkiksi SAMP/T-ohjusjärjestelmä, joka voi todennäköisesti käyttää sekä Aster 15- että Aster 30 -ilmatorjuntaohjusta. Näistä ohjuksista jälkimmäinen on alun perin tarkoitettu tähän järjestelmään maavoimien suojaksi. Järjestelmään voisi kuulua myös Arabelin X-tutka-alueen 3D-tutka, jolla maksimi mittausetäisyys tyypilliseen ilmatorjuntakohteeseen on noin 100 km. Aster 15 -ohjuksen nopeus on noin 3,0 M ja Aster 30 -ohjuksen nopeus noin 4,5 M. Ohjuksen hakupää on pulssidoppleriin perustuva AD4A-tutkahakupää, jossa käytetään K_u -aluetta. Myös herätesytytin toimii K_u -tutka-alueella. Ohjuksen taistelukärjen paino on 15 kg ja se on muotoiltu suunnattuun sirpalevaikutukseen. Ohjuksen valinnasta riippuen järjestelmän maksimi torjuntakantama on joko 30 km tai 100 km. On huomattava, että tiedot voivat vaihdella lähteestä riippuen [47].

SAMP/T-ohjusjärjestelmä on joiltakin osin hyvin samanlainen kuin Umkhonto-ilmatorjuntaohjusjärjestelmä. Esimerkiksi Aster-ohjuksien taistelukärki on lähes samanpainoinen Umkhonto-järjestelmän ohjuksen kanssa ja taistelukärjen tehokkuus perustuu suunnattuun sirpalevaikutukseen. Lisäksi ohjukset ovat kooltaan samaa suuruusluokkaa, vaikka Aster-ohjukset ovat painavampia. Aster 15 -ohjuksen ja Umkhonto-järjestelmän ohjuksen osalta maalin maksimikorkeus on samaa luokkaa, kun taas Aster 30 -ohjuksen osalta maalin maksimikorkeus on samaa luokkaa kuin Buk-M1-ilmatorjuntaohjusjärjestelmän perusohjuksella. Mikäli tämä järjestelmä hankitaan Aster 30 -ohjuksen kanssa, luo se kokonaan uuden ulottuvuuden Suomen ilmatorjuntaan sen kantaman takia. On otaksuttavissa, että tätä järjestelmää käytettäisiin pääkaupunkiseudun suojaamiseen tai kriittisten kohteiden suojaamiseen. Järjestelmän taktiikka tulisi olemaan samanlaista kuin Buk-M1-ilmatorjuntaohjusjärjestelmässä, mutta erojakin voi löytyä.

6 TULEVAISUUSNÄKYMÄT

Tekniikan kehittyminen nykypäivänä on erittäin nopeaa. Jo muutamassa vuosikymmenessä esimerkiksi tietokoneiden koko on pienentynyt ja niiden laskentateho on moninkertaistunut. Nämä samat asiat pätevät myös sotilaspuolelle. Sotilas- ja siviilipuoli kulkevat tällä hetkellä lähes käsi kädessä ja tulevaisuudessa yhteistoiminta voi olla vieläkin tiiviimpää. On ymmärrettävä, että kumpikin puoli voi hyötyä toisesta ja saada näin esimerkiksi lisää kustannustehokkuutta.

Ilmatorjuntaohjuksien elektroniikkaosat tulevat pienenevään tulevaisuudessa, jonka ansiosta ohjuksiin on mahdollista sijoittaa entistä suurempi matkamoottori. Tällöin kantamaa saadaan kasvatettua jonkin verran. Keskipitkän ja pitkän kantaman ilmatorjuntaohjusjärjestelmien ulottuvuuden kasvun takia tulee ohjuksiin inertia- ja komento-ohjauksen lisäksi jonkinlainen hakeutumisympäristelmä. Nykyään on hyvin yleistä käyttää maalin valaisuun perustuvaa hakeutumista, mutta tulevaisuudessa aktiiviset tutkahakupäät tulevat yleistymään.

Komento-ohjatuista järjestelmistä MCLOS-järjestelmät tulevat katoamaan tulevaisuudessa, sillä laskimien käyttö on tehokkaampaa ja tarkempaa. Lisäksi koska järjestelmistä pyritään tekemään hyvin yksinkertaisia ja käyttäjäystävällisiä, eivät tämänlaiset järjestelmät ole kannattavia. Sen sijaan muut komento-ohjatut järjestelmät tulevat säilyttämään paikkansa tulevaisuudessa niiden erilaisten ominaisuuksien ja tarkoituksien ansiosta. Kuitenkin ACLOS-järjestelmät tulevat kehittymään ja yleistymään tulevaisuudessa eniten, sillä tämän järjestelmän vahvuuksia ovat käyttäjäystävällisyys ja tekniikan kehityksen hyödyntäminen esimerkiksi laskimissa.

Räjähteitä pyritään kehittämään yhä tehokkaammiksi ja samalla niiden herkkyttä pyritään myös alentamaan, jotta ne olisivat turvallisempia. Tämä vaikuttaa myös esimerkiksi ohjuksien moottoreiden tehoon, joka tulee paranemaan tulevaisuudessa. Rakettimoottorien lisäksi myös ilmareaktiomoottorit tulevat paranemaan. Pyrkimyksenä on saada tehokkaampi työntövoima [19].

Säteenseurantaan perustuvat järjestelmät tulevat säilyttämään paikkansa tulevaisuudessa niiden häirinnäsietokyvyn ansiosta. Käytännössä häirintälähetin pitäisi saada laskimen ja ohjuksen väliselle suoralle, jotta häirinnästä olisi hyötyä. Toisaalta taas säteenseurantaan perustuvat järjestelmät on helppo havaita lentokoneista laserveroittimien ansiosta. Säteenseurantaan

perustuvia järjestelmiä pyritään jatkossa kehittämään tarkemmiksi, mitä suuremmille etäisyyksille mennään.

Sensorien kehittyminen on joiltakin osin nopeaa, mutta esimerkiksi jäähdytettyjen infrapunailmaisimien herkkyyttä ei kyetä enää juurikaan kasvattamaan. Lähi-infrapunan alueen sensorien käyttö sen sijaan tulee todennäköisesti lisääntymään tulevaisuudessa, sillä tämän alueen sensoreilla on ominaisuuksia, joiden avulla on mahdollista nähdä joidenkin suojasavujen ja osittain myös sääilmiöiden läpi.

Infrapunailmaisimien koko ja matriisien pikselimäärät tulevat kasvamaan, ja samalla myös yleinen laskentateho kasvaa, mikä käytännössä tarkoittaa sitä, että infrapunasensorijärjestelmien erottelukyky paranee. Samalla näkökentän leveyttä voidaan kasvattaa, mikä parantaa IP-sensoreiden yleistä käyttökelpoisuutta ja käyttäjän tilannetietoisuutta. Ilmaisimien koko ja matriisien pikselimäärät kasvavat tulevaisuudessa hyvinkin paljon ja niiden herkkyys paranee [11, 19].

Ilmaisimien kehityksessä on havaittavissa aallonpituuskaistojen hyväksikäyttö mahdollisimman tehokkaasti. Toisin sanoen kaksi- ja moniväri-ilmaisimet tulevat olemaan tulevaisuudessa hyvinkin oleellisia, sillä näiden avulla on mahdollista käyttää useampaa aallonpituuskaistaa samanaikaisesti. Ilmatorjuntaohjuksien kannalta vieläkin oleellisempaa on se, että soihtuhäirinnän vaikutus ohjuksien hakeutumiseen heikkenee, sillä juuri näiden kaksi- tai moniväri-ilmaisimien avulla kyetään erottamaan soihtut esimerkiksi lentokoneen moottorin pakokaasujen ulostuloaukosta.

Tutkien kehitystä ohjaavana tekijänä on oikeastaan maalien tutkakaikupinta-alojen kehitys. Miehittämättömiä aluksia tullaan käyttämään yhä enenevässä määrin ja lisäksi häiveteknologiaa pyritään kehittämään mahdollisimman tehokkaasti. Tutkien yleisenä ongelmana on niiden helppo havaittavuus, joten sen sijaan, että tutkat olisivat suuria, tehokkaita ja hitaita liikuttaa, on kehitys menossa päinvastaiseen suuntaan. Tutkista pyritään kehittämään hyvin liikuvia ja nopeasti käyttökuntoonlaitettavia, joka edesauttaa esimerkiksi ilmatorjunnan taistelutoimintaa. Lisäksi tutkasäteilyyn hakeutuvat ohjukset kykenevät tulevaisuudessa hakeutumaan paljon tarkemmin esimerkiksi miehittämättömiin maaleihin. Tutkasäteilyyn perustuvat ohjukset kykenevät mahdollisesti hakeutumaan myös stealth-koneisiin, mikäli tutkalla saadaan lukitus kyseiseen maaliin. On kuitenkin muistettava, että häiveteknologia kehittyy siinä missä muutkin.

Tulevaisuuden ilmatorjuntaohjuksissa on mahdollista käyttää myös eri hakeutumisen yhdistelmiä. Toisaalta on myös mahdollista, että komento-ohjautuksen ja hakeutumisen yhdistelmiä tullaan käyttämään. Erittäin lyhyen ja lyhyen kantaman ilmatorjuntajärjestelmissä tullaan luultavasti käyttämään tulevaisuudessa vielä yhden järjestelmän hakeutumista tai ohjautusta, sillä ohjuksen kantama pysyy kuitenkin jonkin tietyn järjestelmän käyttöperiaatteiden sisällä. Tällä tarkoitetaan sitä, että esimerkiksi säteenseurantaan perustuvien lyhyen ilmatorjuntajärjestelmien ohjukset pysyvät sen etäisyyden sisällä, millä on mahdollista vielä käyttää säteenseurantaa tehokkaasti. Mahdollista on kuitenkin se, että esimerkiksi laseria kehitetään tarkemmaksi ja tehokkaammaksi, joten kantama tällaisella ohjukselle voi kasvaa tämän puitteissa.

Keskipitkän ja pitkän kantaman ilmatorjuntaohjusjärjestelmissä sen sijaan on hyvin todennäköistä, että käytetään kahden järjestelmän hyötyjä hyväksi. On nähtävissä, että lentovaiheen aikana on mahdollista esimerkiksi käyttää komento-ohjausta, mutta terminaalivaiheen aikana käytetäänkin jotakin hakeutumismenetelmää. Hyvänä esimerkkinä tällaisista järjestelmistä on aktiiviseen hakeutumiseen perustuvat järjestelmät. Tällä hetkellä ohjuksen matkalentoon käytetään esimerkiksi komento-ohjausta ja vasta ohjuksen terminaalivaiheessa käytetään aktiivista hakupäätä.

Joka tapauksessa tulevaisuuden järjestelmät pyrkivät kuitenkin käyttämään eri järjestelmien hyödyn mahdollisimman tehokkaasti ja käyttämään jotakin järjestelmää esimerkiksi varajärjestelmänä. Kuitenkin niiden yleistymistä rajoittaa kustannustehokkuus. Tällaiset monia järjestelmiä käyttävät ohjukset ovat huomattavasti kalliimpia kuin yhtä järjestelmää käyttävät. Lisäksi on selvitettävä, saadaanko esimerkiksi lämpöhakupään tehokkuus yhtä toimivana ja tehokkaana johonkin ohjukseen, joka käyttää montaa järjestelmää.

LÄHTEET

1. JULKAISEMATTOMAT LÄHTEET

- [1] Asejärjestelmärakenteet -kurssi, Insinööriereverstiluutnantti Tuovinen, 2008 viikot 35 ja 36
 [2] Strategian oppitunnin esityskalvot, Majuri Mäkelä, 2006 viikot 38 ja 39

2. JULKAISTUT LÄHTEET

- [3] Bailey, A. Murray, S. Explosives, Propellants and Pyrotechnics.
 Brassey's (UK) Ltd, Exeter 1989.
- [4] Friedman, Richard, Miller, David. Advanced technology warfare.
 Salamander Books Ltd, Lontoo 1985.
- [5] Hall, P. Garland-Collins, T. Picton, R. Lee, Geoffrey. Radar.
 Brassey's (UK), Exeter 1991.
- [6] Heiskanen, Seppo. Ohjustekniikan perusteita.
 AR-Kustannus Oy, Kangasala 1993.
- [7] Hirsjärvi, Sirkka, Remes, Pirkko, Sajavaara, Paula. Tutki ja kirjoita.
 Gummerus Kirjapaino Oy, Jyväskylä 2005.
- [8] Hovanessian, Shahan. Introduction to sensor systems.
 Artech House, inc. 1988.
- [9] Ilmatorjunnan taistelutekninen opas VII.
 Pääesikunta, Helsinki 1994.
- [10] Ilmatorjuntaopas 1.
 Puolustusvoimien koulutuksen kehittämiskeskus, Vammala, 2002.
- [11] Ilmatorjuntaupseeri 1/2005.
 Ilmatorjuntaupseeriyhdistys ry, Tuusula 2005.
- [12] Ilmatorjuntaupseeri 4/2008.
 Ilmatorjuntaupseeriyhdistys ry, Tuusula 2008.
- [13] Ilmatorjunta-ampumaoppi.
 Pääesikunta, Helsinki 1982.
- [14] Kakkola, Timo. Valonvahvistimet ja lämpökamerat.
 Tekniikan laitos, Helsinki 2001.
- [15] Kosola, Jyri, Solante, Tero. Digitaalinen taistelukenttä.
 Maanpuolustuskorkeakoulu, Helsinki 2003.

- [16] Lee, Geoffrey, Hartley, Frank. Guided Weapons.
Brassey's Defence Publishers Ltd, Exeter 1988.
- [17] Margiotta, Franklin. Brassey's encyclopedia of land forces and warfare.
Brassey's Inc, 1996.
- [18] Puolustusvoimien määritelmärekisteri
- [19] Sotatekninen arvio ja ennuste 2025, Teknologian kehitys, osa 1.
Puolustusvoimien teknillinen tutkimuslaitos, julkaisusarja 14, 2008.
- [20] Tekniset tutkimusmenetelmät Maanpuolustuskorkeakoulussa
Tekniikan laitos, Helsinki 2004.
- [21] Tieteen kuvalehti 2/2009.
- [22] Yleinen ase- ja asejärjestelmäopas.
Puolustusvoimien koulutuksen kehittämiskeskus, Vammala 2001.

3. MUUT LÄHTEET

Internet-lähteet ovat haettu tai uudelleentarkastettu aikavälillä 1.10.2008 – 2.3.2009.

- [23] http://en.wikipedia.org/wiki/Mistral_missile
- [24] <http://en.wikipedia.org/wiki/Ramjet>
- [25] http://en.wikipedia.org/wiki/Specific_impulse
- [26] <http://en.wikipedia.org/wiki/Track-via-missile>
- [27] http://en.wikipedia.org/wiki/Tsiolkovsky_rocket_equation
- [28] <http://en.wikipedia.org/wiki/Turbofan>
- [29] <http://en.wikipedia.org/wiki/Turbojet>
- [30] http://en.wikipedia.org/wiki/Umkhonto_missile
- [31] <http://www.aerospaceweb.org/question/aerodynamics/q0151.shtml>
- [32] <http://www.aerospaceweb.org/question/propulsion/q0246.shtml>
- [33] <http://www.aerospaceweb.org/question/weapons/q0158.shtml>
- [34] <http://www.aerospaceweb.org/question/weapons/q0187.shtml>
- [35] <http://www.army-technology.com/projects/crotale/specs.html>
- [36] <http://www.braeunig.us/space/index.htm>
- [37] <http://www.fas.org/man/dod-101/navy/docs/fun/part14.htm>
- [38] http://www.ilmatorjuntaupseeriyhdistys.fi/3_2003/tekstit/meriv.htm
- [39] <http://www.mil.fi/maavoimat/kalustoesittely/index.dsp?level=54&equipment=75>
- [40] <http://www.mil.fi/maavoimat/kalustoesittely/index.dsp?level=54&equipment=77>

- [41] http://www.suomensotilas.fi/artikkelit_ilmatorjunta.php
- [42] http://www.vm.fi/vm/fi/05_hankkeet/02_tuottavuusohjelma/ohjelmat2005/97436_version%3D1.pdf
- [43] <http://science.howstuffworks.com/rocket.htm>
- [44] https://www.milnet.fi/www8.janes.com/Search/documentView.do?docId=/content1/janes_da-ta/binder/jalw/jalw3583.htm@current&pageSelected=allJanes&backhttp://search.janes.com/Search&Prod_Name=JALW&keyword=
- [45] https://www.milnet.fi/www8.janes.com/Search/documentView.do?docId=/content1/janes_da-ta/binder/jalw/jalw3617.htm@current&pageSelected=allJanes&backhttp://search.janes.com/Search&Prod_Name=JALW&keyword=
- [46] https://www.milnet.fi/search.janes.com/Search/documentView.do?docId=/content1/janes_da-ta/binder/jnws/jnws0480.htm@current&pageSelected=allJanes&keyword=Crotale%20NG&backPath=https://www.milnet.fi/search.janes.com/Search&Prod_Name=JNWS&
- [47] https://www.milnet.fi/www8.janes.com/Search/documentView.do?docId=/content1/janes_da-ta/binder/jnws/jnws0482.htm@current&pageSelected=allJanes&backPath=http://search.janes.com/Search&Prod_Name=JNWS&keyword=
- [48] https://www.milnet.fi/search.janes.com/Search/documentView.do?docId=/content1/janes_da-ta/binder/jnws/jnws0853.htm@current&pageSelected=allJanes&keyword=umkhonto&backPath=https://www.milnet.fi/search.janes.com/Search&Prod_Name=JNWS&
- [49] https://www.milnet.fi/search.janes.com/Search/documentView.do?docId=/content1/janes_data/binder/jsws/jsws0180.htm@current&pageSelected=allJanes&keyword=bukml&backPath=https://www.milnet.fi/search.janes.com/Search&Prod_Name=JSWS&
- [50] https://www.milnet.fi/search.janes.com/Search/documentView.do?docId=/content1/janes_da-ta/binder/jsws/jsws0520.htm@current&pageSelected=allJanes&keyword=akash&backPath=https://www.milnet.fi/search.janes.com/Search&Prod_Name=JSWS&
- [51] https://www.milnet.fi/search.janes.com/Search/documentView.do?docId=/content1/janes_da-ta/mags/jmr/history/jmr2005/jmr01538.htm@current&pageSelected=allJanes&keyword=ito%202004&backPath=https://www.milnet.fi/search.janes.com/Search&Prod_Name=JMR&

- [52]https://www.milnet.fi/search.janes.com/Search/documentView.do?docId=/content1/janes_data/yb/jc4i/jc4i0535.htm@current&pageSelected=allJanes&keyword=hard%203-d&backPath=https://www.milnet.fi/search.janes.com/Search&Prod_Name=JC4I&
- [53]https://www.milnet.fi/search.janes.com/Search/documentView.do?docId=/content1/janes_da-ta/yb/jeos/jeos8370.htm@current&pageSelected=allJanes&keyword=borc&backPath=https://www.milnet.fi/search.janes.com/Search&Prod_Name=JEOS&
- [54]https://www.milnet.fi/search.janes.com/Search/documentView.do?docId=/content1/janes_da-ta/yb/jeos/jeos9001.htm@current&pageSelected=allJanes&keyword=umkhonto&backPath=https://www.milnet.fi/search.janes.com/Search&Prod_Name=JEOS&
- [55]https://www.milnet.fi/search.janes.com/Search/documentView.do?docId=/content1/janes_da-ta/yb/jlad/jlad0009.htm@current&pageSelected=allJanes&keyword=mistral&backPath=https://www.milnet.fi/search.janes.com/Search&Prod_Name=JLAD&
- [56]https://www.milnet.fi/search.janes.com/Search/documentView.do?docId=/content1/janes_da-ta/yb/jlad/jlad0024.htm@current&pageSelected=allJanes&keyword=rbs%2070&backPath=https://www.milnet.fi/search.janes.com/Search&Prod_Name=JLAD&
- [57]https://www.milnet.fi/search.janes.com/Search/documentView.do?docId=/content1/janes_da-ta/yb/jlad/jlad0078.htm@current&pageSelected=allJanes&keyword=crotale%20ng&backPath=https://www.milnet.fi/search.janes.com/Search&Prod_Name=JLAD&
- [58]https://www.milnet.fi/www8.janes.com/Search/documentView.do?docId=/content1/janes_da-ta/yb/jlad/jlad0081.htm@current&pageSelected=allJanes&backPath=http://search.janes.com/Search&Prod_Name=JLAD&keyword=
- [59]https://www.milnet.fi/search.janes.com/Search/documentView.do?docId=/content1/janes_da-ta/yb/jlad/jlad0109.htm@current&pageSelected=allJanes&keyword=buk&backPath=https://www.milnet.fi/search.janes.com/Search&Prod_Name=JLAD&
- [60]https://www.milnet.fi/search.janes.com/Search/documentView.do?docId=/content1/janes_da-ta/yb/jlad/jlad0131.htm@current&pageSelected=allJanes&keyword=slamraam&backPath=https://www.milnet.fi/search.janes.com/Search&Prod_Name=JLAD&

- [61]https://www.milnet.fi/search.janes.com/Search/documentView.do?docId=/content1/janesdata/yb/jlad/jlad0242.htm@current&pageSelected=allJanes&keyword=patriot&backPath=https://www.milnet.fi/search.janes.com/Search&Prod_Name=JLAD&
- [62]https://www.milnet.fi/search.janes.com/Search/documentView.do?docId=/content1/janesdata/yb/jlad/jlad0532.htm@current&pageSelected=allJanes&keyword=asrader&backPath=https://www.milnet.fi/search.janes.com/Search&Prod_Name=JLAD&
- [63][https://www.milnet.fi/search.janes.com/Search/documentView.do?docId=/content1/janesda-
ta/yb/jlad/jlad0666.htm@current&pageSelected=allJanes&keyword=bolide&backPath=https://www.milnet.fi/search.janes.com/Search&Prod_Name=JLAD&](https://www.milnet.fi/search.janes.com/Search/documentView.do?docId=/content1/janesdata/yb/jlad/jlad0666.htm@current&pageSelected=allJanes&keyword=bolide&backPath=https://www.milnet.fi/search.janes.com/Search&Prod_Name=JLAD&)
- [64]https://www.milnet.fi/search.janes.com/Search/documentView.do?docId=/content1/janesdata/yb/jrew/jrew0215.htm@current&pageSelected=allJanes&keyword=buk-ml&backPath=https://www.milnet.fi/search.janes.com/Search&Prod_Name=JREW&
- [65][https://www.milnet.fi/www8.janes.com/Search/documentView.do?docId=/content1/janesda-
ta/yb/jrew/jrew0289.htm@current&pageSelected=allJanes&backPath=http://search.janes.com/Search&Prod_Name=JREW&keyword=](https://www.milnet.fi/www8.janes.com/Search/documentView.do?docId=/content1/janesdata/yb/jrew/jrew0289.htm@current&pageSelected=allJanes&backPath=http://search.janes.com/Search&Prod_Name=JREW&keyword=)
- [66][https://www.milnet.fi/search.janes.com/Search/documentView.do?docId=/content1/janesda-
ta/yb/jrew/jrew0525.htm@current&pageSelected=allJanes&keyword=active%20seeker&backPath=https://www.milnet.fi/search.janes.com/Search&Prod_Name=JREW&](https://www.milnet.fi/search.janes.com/Search/documentView.do?docId=/content1/janesdata/yb/jrew/jrew0525.htm@current&pageSelected=allJanes&keyword=active%20seeker&backPath=https://www.milnet.fi/search.janes.com/Search&Prod_Name=JREW&)
- [67][https://www.milnet.fi/search.janes.com/Search/documentView.do?docId=/content1/janesda-
ta/yb/jrew/jrew2019.htm@current&pageSelected=allJanes&keyword=radar%20seeker&backPath=https://www.milnet.fi/search.janes.com/Search&Prod_Name=JREW&](https://www.milnet.fi/search.janes.com/Search/documentView.do?docId=/content1/janesdata/yb/jrew/jrew2019.htm@current&pageSelected=allJanes&keyword=radar%20seeker&backPath=https://www.milnet.fi/search.janes.com/Search&Prod_Name=JREW&)

LIITTEET

- Liite 1 Crotale NG -ilmatorjuntaohjusjärjestelmä

- Liite 2 Mistral-ilmatorjuntaohjusjärjestelmä

- Liite 3 Buk-M1 -ilmatorjuntaohjusjärjestelmä

- Liite 4 Umkhonto-IR –ilmatorjuntaohjusjärjestelmä

- Liite 5 Asrad-R –ilmatorjuntaohjusjärjestelmä

- Liite 6 RBS 70 -ilmatorjuntaohjusjärjestelmä

Crotale NG VT-1-ohjus:

<https://www.milnet.fi/search.janes.com/janesdata/binder/jsws/images/p0517746.jpg>

Crotale NG -ilmatorjuntaohjusjärjestelmä XA-180 ajoneuvoasenteisena:

<https://www.milnet.fi/search.janes.com/janesdata/yb/jlad/images/p0080361.jpg>

Crotale NG -ilmatorjuntaohjusjärjestelmän kreikkalainen versio:

<https://www.milnet.fi/search.janes.com/janesdata/yb/jrew/images/p1034957.jpg>

Crotale NG operaattorin konsoli:

<https://www.milnet.fi/search.janes.com/janesdata/yb/jlad/images/p0080362.jpg>

Mistral-1-ohjus ja sen laukaisuputki:

<https://www.milnet.fi/search.janes.com/janesdata/binder/jnws/images/p0513987.jpg>

Mistral-1-ohjuksen ja Mistral-2-ohjuksen erot:

<https://www.milnet.fi/search.janes.com/janesdata/binder/jnws/images/g0033920.jpg>

Sadral asennettuna Rauma-luokan alukseen:

<https://www.milnet.fi/search.janes.com/janesdata/binder/jnws/images/p0513990.jpg>

Buk-M1-ilmatorjuntaohjusjärjestelmän perusohjus:

<https://www.milnet.fi/search.janes.com/janesdata/binder/jsws/images/p0517566.jpg>

Buk-M1-ilmatorjuntaohjusjärjestelmän perusohjuksen AGAT 9E50 -hakupää:

<https://www.milnet.fi/search.janes.com/janesdata/binder/jsws/images/p0044958.jpg>

Buk-M1-ilmatorjuntaohjusjärjestelmän ohjusvaunu:

<http://www.mil.fi/maavoimat/kalustoesittely/popup.dsp?id=200>

Buk-M1-ilmatorjuntaohjusjärjestelmän latausvaunu:

<https://www.milnet.fi/search.janes.com/janesdata/yb/jlad/images/p0080435.jpg>

Buk-M1-ilmatorjuntaohjusjärjestelmän tutkavaunu:

<https://www.milnet.fi/search.janes.com/janesdata/binder/jsws/images/p0044959.jpg>

Buk-M1-ilmatorjuntaohjusjärjestelmän komentovaunu ja tutkavaunu:

<https://www.milnet.fi/search.janes.com/janesdata/yb/jlad/images/p0080388.jpg>

Umkhonto-IR-ilmatorjuntaohjusjärjestelmän ohjus:

<https://www.milnet.fi/search.janes.com/janesdata/yb/jeos/images/p0088176.jpg>

Umkhonto-ilmatorjuntaohjusjärjestelmä ajoneuvoasenteisena (luonnos):

<https://www.milnet.fi/search.janes.com/janesdata/mags/jdw/history/jdw2008/images/p1308104.jpg>

Umkhonto-IR-ilmatorjuntaohjusjärjestelmän ohjuksen laukaisu Hamina-luokan ohjusveneestä:

<https://www.milnet.fi/search.janes.com/janesdata/yb/jeos/images/p1155239.jpg>

Bolide-ilmatorjuntaohjus:

<https://www.milnet.fi/search.janes.com/janesdata/yb/jlad/images/g0095040.jpg>

Asrad-R-ilmatorjuntaohjusjärjestelmä asennettuna Unimog 5000 -ajoneuvon päälle:

<http://www.mil.fi/maavoimat/kalustoesittely/popup.dsp?id=462>

Asrad-R-ilmatorjuntaohjusjärjestelmän kontti:

<http://www.mil.fi/maavoimat/kalustoesittely/popup.dsp?id=463>

Asrad-R-ilmatorjuntaohjusjärjestelmä naamioituna:

<https://www.milnet.fi/search.janes.com/janesdata/mags/jmr/history/jmr2008/images/p1331142.jpg>

HARD 3D -tutkan viitteellinen kantama:

<http://www.army-technology.com/projects/leflasys/leflasys7.html>

RBS 70 -ilmatorjuntaohjusjärjestelmä:

http://tietokannat.mil.fi/maavoimat_kuvapankki/include/thumbnail2.php?id=154&width=640

RBS 70 -ilmatorjuntaohjusjärjestelmän mahdollisia nostolavoja:

http://susi1.net/e107_files/public/1200570204_2046_FT153038_nostolava.jpg

<http://altair.com.pl/files/news/2008/06/i-i08-06-048mslp2.jpg>