

MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU

**MERITORJUNTAOHJUKSEN TUTKA- JA INFRAPUNAHAKUPÄÄN  
SOVELTUVUUS SUOMEN RANNIKON TOIMINTAYMPÄRISTÖÖN**

Pro gradu -tutkielma

Yliluutnantti

Aleksi Rantanen

SM 5

Merisotalinja

Huhtikuu 2016

## MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU

Kurssi Sotatieteiden maisterikurssi 5	Linja Merisotalinja
Tekijä Yliluutnantti Aleksi Rantanen	
Tutkielman nimi MERITORJUNTAOHJUKSEN TUTKA- JA INFRAPUNAHAKUPÄÄN SOVELTUVUUS SUOMEN RANNIKON TOIMINTAYMPÄRISTÖÖN	
Oppiaine, johon työ liittyy Sotatekniikka	Säilytyspaikka Maanpuolustuskorkeakoulun kirjasto
Aika Huhtikuu 2016	Tekstisivuja 64                      Liitesivuja 5
<b>TIIVISTELMÄ</b> <p>Meritorjuntaohjuksissa on perinteisesti suosittu tutkahakupäitä, sillä niillä saavutetaan hyvä joka sään suorituskyky. Sensoritekniikan kehittymisen myötä myös kuvantavalla infrapunahakupäällä varustettuja meritorjuntaohjuksia on otettu käyttöön. Tässä tutkimuksessa vertailtiin meritorjuntaohjusten tutka- ja infrapunahakupäiden soveltuvuutta Suomen rannikon sääolosuhteisiin. Tutkimuksen teoriaosassa selvitettiin kirjallisuusselvityksenä tyypillisiä meritorjuntaohjusten teknisiä ominaisuuksia, erilaisten hakupäatekniikoiden toimintaperiaatteita, maalin vaikutusta hakupään suorituskykyyn aluksen omien herätteiden ja sen suorittamien mahdollisten häirintätoimenpiteiden kannalta sekä erilaisten sääolosuhteiden vaikutusta hakupäiden suorituskykyyn.</p> <p>Tutkimuksen soveltavassa osassa suoritettiin vertailu käyttämällä analyttistä hierarkiaprosessia. Vertailu suoritettiin parivertailuna hakupäatekniikoiden välillä käyttämällä kriteereinä sään vaikutusta, häivetekniikan vaikutusta, hakupään häirittävyyttä sekä muita hakupäatekniikan ominaisuuksia. Kriteereiden väliset painoarvot ja vaihtoehtojen hyvyysluvut kriteereiden suhteen perusteltiin tutkimusraportin teoriaosan havainnoilla. Suoritetun vertailun perusteella tutkahakupää todettiin hieman soveltuvammaksi vaihtoehdoksi Suomen rannikon olosuhteisiin. Tulosten perusteella voidaan kuitenkin todeta, että kriteereiden painotuksilla on ratkaiseva vaikutus tutkimustuloksiin, sillä eri hakupäatekniikat olivat lopputuloksissa käytännössä lähes tasavertaisia, vaikka infrapunahakupää todettiin suurimmassa osassa toteutettuja parivertailuja paremmaksi vaihtoehdoksi.</p>	
<b>AVAINSANAT</b> meritorjuntaohjus, hakupää, tutkahakupää, infrapunahakupää, sääilmiöt	

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
1.1. Tutkimusmenetelmät	4
1.2. Käsitteiden määrittely	6
2. OHJUSTEN JAOTTELU	7
2.1. Meritorjuntaohjukset	11
2.1.1. Esimerkkejä meritorjuntaohjuksista	13
3. HAKUPÄÄTYYPIT	18
3.1. Infrapunahakupää	19
3.1.1. Infrapunasäteily	19
3.1.2. Infrapunailmaisimet	22
3.1.3. Häirittävyys	30
3.2. Tutkahakupää	31
3.2.1. Radiotaajuinen säteily	31
3.2.2. Tutka	33
3.2.3. Häirittävyys	40
4. MAALIN VAIKUTUS HAKUPÄÄN TOIMINTAAN	44
4.1. Nykyaikaisen sota-aluksen herätteet	44
4.2. Pinta-alukset Itämeren alueella	47
5. OLOSUHDEANALYYSI	52
5.1. Sään vaikutus hakupäiden toimintaan	54
6. VERTAILU	58
7. JOHTOPÄÄTÖKSET	62
LÄHTEET	65
LIITTEET	71

# **MERITORJUNTAOHJUKSEN TUTKA- JA INFRAPUNAHAKUPÄÄN SOVELTUVUUS SUOMEN RANNIKON TOIMINTAYMPÄRISTÖÖN**

## **1. JOHDANTO**

Vuodesta 1967 lähtien maailmassa on taistelutilanteessa laukaistu 241 meritorjuntaohjusta. Näistä ohjuksista 127 on torjuttu harhamaaleilla tai häirinnällä ja vain yksi on torjuttu tuhoamalla ohjus. [1] Ohjuksilla on upotettu kahdeksan ja vaurioitettu viittä taistelualusta. Loput ohjukset ovat menneet ohi tai ne ovat osuneet siviilialuksiin. Kaikille meritorjuntaohjuksille tuotetuille tappioille on yhteistä se, että ne on aiheutettu tutkahakupäällä varustetulla ohjuksella. [2; 3] Meritorjuntaohjuksissa on suosittu tutkahakupäitä johtuen tutkataajuisten säteilyn hyvästä etenemisestä merellisessä toimintaympäristössä. Sensoritekniikan kehityksen myötä kilpailevaksi hakupäätetekniikaksi meritorjuntaohjuksiin ollaan ottamassa käyttöön kuvantavia infrapunahakupäitä. Kehittyneet infrapunasensorit tuovat meritorjuntaohjuksiin uusia ominaisuuksia, kuten esimerkiksi kyvyn tunnistaa maaleja niiden muodon perusteella.

Tässä tutkimuksessa vertaillaan meritorjuntaohjusten yleisimpiä hakupäätyyppisiä, infrapuna- ja tutkahakupäitä sekä niiden soveltuvuutta suomalaiseen toimintaympäristöön. Tutkimuksen teoriaosassa luodaan taustatietoa vertailuun kirjallisuusselvityksellä. Soveltavassa osassa vertaillaan tutka- ja infrapunahakupäitä teoriaosan havaintojen perusteella luotujen kriteerien ja painokertoimien avulla. Tutkimusongelmana on laatia soveltuvuusarvio tutka- ja infrapunahakupäätyyppistä Suomen rannikon merialueiden toimintaympäristössä. Tutkimusongelmaa tarkennetaan seuraavilla tutkimuskysymyksillä, joihin selvitetään vastaus tutkimusraportin teoriaosuudessa:

1. Millainen on tyypillinen meritorjuntaohjus?
2. Mitkä ovat tutka- ja infrapunahakupäiden toimintaperiaatteet?

3. Miten maali vaikuttaa ohjuksen hakupään suorituskykyyn?

4. Miten Itämeren sääolosuhteet vaikuttavat ohjuksen hakupään suorituskykyyn?

Tutkimuksen tulosten perusteella voidaan tehdä johtopäätöksiä eri hakupääteknikoiden soveltuvuudesta Suomen rannikon sääolosuhteisiin.

Tutkimusraportin toisessa luvussa määritellään ohjuksiin yleisesti liittyviä käsitteitä sekä eri ohjustyyppien jaottelua. Tässä luvussa käsitellään yleisimmät ohjusten ohjautusmenetelmät sekä tarkastellaan meritorjuntaohjuksia yleisesti, että kahden esimerkkiohjusmallin avulla. Kolmannessa luvussa käsitellään sähkömagneettista säteilyä infrapunasäteilyn sekä tutkataajuisten radiosäteilyn osalta. Lisäksi luvussa esitellään infrapuna- ja tutkahakupäiden toimintaperiaatteet sekä pohditaan niiden häiritävyyttä. Neljännessä luvussa tarkastellaan nykyaikaisen sota-aluksen aiheuttamia herätteitä tutkittavien hakupäiden näkökulmasta sekä aluksissa käytettäviä tekniikoita herätteiden pienentämiseksi. Tarkastelussa käytetään esimerkkinä saksalaista K130 Braunschweig -luokan korvettia sekä venäläistä Steregushchy -luokan korvettia, jotka ovat häiveominaisuuksiltaan ja kooltaan tyypillisiä moderneja Itämeren alueen sota-aluksia. Viidennessä luvussa selvitetään Suomen rannikolle tyypillisiä sääolosuhteita sekä niiden aiheuttamia vaikutuksia sähkömagneettisen säteilyn etenemiseen. Sääolosuhteissa keskitytään hakupäiden suorituskykyyn vaikuttaviin tekijöihin, kuten esimerkiksi ilmakehän kosteuteen ja sademäärään. Tarkasteluun valittu Suomen rannikolta kolme mittauspistettä, joiden säätilastojen perusteella arvioidaan ilmakehän kosteuden ja sateen vaikutuksia hakupäiden suorituskykyyn. Kuudennessa luvussa suoritetaan hakupäätyyppien vertailu analyttisen hierarkiaproessin avulla. Tässä luvussa määritellään vertailuun tarvittavat kriteerit, niiden painoarvot sekä vertailtavien vaihtoehtojen hyvyysluvut. Määrittely toteutetaan aiemmissa luvuissa tuotetun tiedon perusteella. Varsinainen vertailuprosessi toteutetaan Expert Choice Comparion Suite -ohjelmistolla.

Tutkimuksessa käsitellään pitkän kantaman meritorjuntaohjuksia, joissa käytetään tutka- tai infrapunatekniikalla toteutettua hakupäätä. Lyhyen kantaman ohjukset on rajattu tutkimuksen ulkopuolelle. Tällaisia ohjuksia ovat esimerkiksi rannikko-ohjukset sekä lyhyen kantaman merimaali-ohjukset, jotka on suunniteltu ensisijaisesti asymmetristä uhkaa vastaan. Edellä mainittujen lisäksi tutkimuksen ulkopuolelle rajataan tutkaan hakeutuvat ohjukset, sillä niiden varsinaisena maalina on merellä toimittaessa aluksen tutka, eikä niinkään alus itsessään.

Tämän tutkimuksen aihetta ei ole aikaisemmin tutkittu meritorjuntaohjusten näkökulmasta, mutta vastaavia aiheita on käsitelty sivuavissa tutkimuksissa. Kadetti Lauri Nummela on kandidaatintutkielmassaan (SK1678) tutkinut kuvantavan infrapunahakupään häirintää soihduilla ja suunnatulla infrapunahäirintälaitteella. Tutkimuksessa esitellään kummankin häirintämenetelmän toimintaperiaatteet sekä arvioidaan niiden soveltuvuutta kuvantavan infrapunahakupään häirintään. Nummelan tutkimuksesta ei voida vetää suoranaisia johtopäätöksiä tähän tutkimukseen, sillä tutkittava toimintaympäristö on erilainen. Meritorjuntaohjusten hakualue on ilmataisteluojuksista poiketen käytännössä kaksiulotteinen, jolloin ohjus lähestyy maalia lähes pinnassa eikä korkeuselementti ole yhtä ratkaiseva tekijä kuin ilmataisteluojuksissa. Lisäksi maalien koko ja liikenopeudet ovat erilaisia kuin ilmataistelussa. Kadetti Aarno Kolehmainen on tutkinut Pro gradu -tutkielmassaan (SM550) meritorjuntaohjusten torjuntaa ohjusveneellä. Kolehmainen on laatinut matemaattisen mallin, jossa tarkastellaan kohti tulevan meritorjuntaohjusten havaitsemis- ja torjuntatodennäköisyyksiä Hamina -luokan ohjusveneen sensori- ja asekalustolla.

Tässä tutkimuksessa käytettävä lähdemateriaali koostuu pääosin sensori- ja asetekniikkaa käsittelevästä kotimaisesta ja ulkomaisesta kirjallisuudesta. Tutkimusmenetelmien esittelyssä käytettävä kirjallisuus koostuu pääosin Maanpuolustuskorkeakoulun kokoelmateoksista. Analyttisen hierarkiaproessin esittelyssä käytetään lisäksi prosessin kehittäjän laatimaa alkuperäislähdettä. Hakupäättekniikoihin on käytetty kirjallisuuden lisäksi internetistä löytyviä julkisia tutkimuksia, sotatekniikan alan lehtien artikkeleita sekä australialaista ilmasodankäynnin tekniikkaan liittyvää sivustoa, jossa on julkaistu useita ohjustekniikkaa käsitteleviä artikkeleita. Ohjusmallien ja alusluokkien esittelyssä on käytetty Jane's -kustantamon tietokannasta löytyviä artikkeleita sekä laitevalmistajien esitteitä. Olosuhdeanalyysissä käytetään Ilmatieteen laitoksen laatimia tilastoja Suomen säästä sekä kirjallisia sensoritekniikan lähteitä sään vaikutuksen arvioimiseen. Tutkimuksessa hyödynnetään vain julkisia lähteitä ja tästä johtuen tutkittavaa aihetta käsitellään yleisellä tasolla, eikä keskitytä tiettyyn ohjusmalliin tai analysoida jonkin tietyn valtion aluksia maaleina. Yksittäisiä ohjusmalleja ja alustyyppöjä tarkastellaan vain esimerkkeinä.

Monissa lähteissä käsitellään meritorjuntaohjusten sijaan ilmataisteluojusten hakupäitä. Tekniikka on kuitenkin yleistettävissä huomioiden toimintaympäristön muutoksen aiheuttamat vaikutukset hakupään toimintaan. Laitevalmistajien materiaalia ei ole suoranaisesti käytetty teknisten tietojen keräämiseen, vaan ainoastaan ohjusten yleisten ominaisuuksien selvittämiseen. Teknisten tietojen hankintaan on käytetty Jane's -kustantamon

tietokantaa, joka on yleisesti arvostettu. Tietokannan tiedot kuitenkin hyvin todennäköisesti perustuvat laitevalmistajien tai käyttäjämuiden ilmoituksiin, mainosmateriaaliin sekä muihin julkaisuihin. Julkisista lähteistä ei kuitenkaan ole saatavilla tarkempaa tietoa, joten tietokannan ilmoittamia tietoja voidaan pitää riittävän tarkkoina.

## 1.1. Tutkimusmenetelmät

Tässä tutkimuksessa käytetään tutkimusmenetelminä kirjallisuusselvitystä sekä analyttistä hierarkiaprosessia. Kirjallisuusselvitystä käytetään tutkimuksen teoriaosassa etsittäessä, analysoitaessa ja luokiteltaessa aiemmin tuotettua tietoa, jonka perusteella pyritään luomaan taustatietoa. Taustatiedon avulla myös selkeytetään tutkimuskysymysten asettelua ja tutkimuksen rajauksia. Samalla perehdytään syvällisesti tutkittavaan aihealueeseen sekä aiemmin tehtyihin tutkimuksiin. [4, s. 42] Tätä luotua taustatietoa hyödynnetään analyttisellä hierarkiaprosessilla toteutettavassa vertailussa tutkimuksen soveltavassa osassa. Tässä tutkimuksessa käytetään deduktiivista lähestymistapaa, jolla tarkoitetaan lähdemateriaalin käyttämistä eri teorioiden tunnistamiseen, joiden oikeellisuutta testataan kerätyllä tutkimusaineistolla [5]. Lähdemateriaalista tunnistetaan teknisiä toimintaperiaatteita ja rajoitteita, joita sovelletaan vertailussa.

Analyttinen hierarkiaprosessi on Thomas L. Saatyn kehittämä päätöksenteon tukijärjestelmä ja valmisteluprosessin rakenne, jossa päätös valittavasta vaihtoehdosta riippuu useista kriteereistä. Sen avulla ongelmia voidaan analysoida tekemällä oletuksia ja johtamalla ratkaisuja tehtyjen oletusten pohjalta. [6, s. 53; 7, s. 1] Ongelmasta muodostetaan hierarkiapuun, jonka jälkeen määritetään hierarkiapuun osien painoarvot. Lopuksi tarkistetaan prosessin looginen johdonmukaisuus. Hierarkiapuun muodostaminen aloitetaan jakamalla ongelma osatekijöihin, jotka jaetaan edelleen pienempiin osatekijöihin. Koko prosessi perustuu asioiden välisten yhteyksien havaitsemiseen loogisella tavalla sekä samankaltaisten asioiden vertailuun. Hierarkiapuun ylimpänä tasona on päätavoite, joka on käytännössä prosessin päätutkimuskysymys. Ratkaisu tutkimuskysymykseen syntyy johtopäätöksenä prosessin tuloksia tulkitsemalla ja se on jokin hierarkiapuun alaoksien vaihtoehdoista. [7, s. 4]

Analyttinen hierarkiaprosessi on monikriteerimenetelmä, jossa eri vaihtoehdoille muodostetaan hyvyysluku, joka koostuu osakriteerien saamista pisteistä. [6, s. 53] Hyvyysluku muodostuu keskinäisen parivertailun perusteella. Kriteerien tärkeyden on oltava verrattavissa toisiinsa tavoitteen saavuttamiseksi. Kriteereillä voi olla myös osakriteerejä, joilla vastataan ensimmäisen tason kriteerin vaatimukseen. Kriteereille määritetään

painokertoimet, jotka ilmaisevat kriteerin täyttymisen tärkeyden ylemmän tason kriteereiden ja lopulta päämäärän saavuttamisessa. Kunkin vaihtoehdon hyvyys ilmaistaan kriteerin kannalta hyvyysluvulla, joiden summa on 1. Kokonaishyvyys lasketaan painotettuna keskiarvona. Hyvyysluvut voidaan synnyttää vertailemalla keskenään kahta vaihtoehtoa tietyn kriteerin suhteen. [6, s. 53] Hyvyyslukuja voidaan vertailla laadullisilla tai määrällisillä asioilla. [7, s. 5]

Parivertailussa vaihtoehdon paremmuus suhteessa toiseen määritetään Saatyn kehittämän viisiportaisen asteikon mukaisesti: 1 - yhtä hyvä, 3 - hieman parempi, 5 - selvästi parempi, 7 - erittäin selvästi parempi, 9 - äärimmäisen selvästi parempi. Paremmuus voi sijoittua myös asteikon portaiden väliin. Kullakin hierarkian tasolla suositellaan käytettäväksi enintään seitsemää vaihtoehtoa. Psykologisesti perusteltuna ihmisten aivoille arvioidaan liian monen vaihtoehdon vertailun olevan vaikea hahmottaa. Liian monen vaihtoehdon tutkimuksessa painoarvot ja hyvyysluvut ovat lähellä toisiaan, jolloin menetelmän tuottama tulos on epävarma. Samasta syystä tulisi välttää parivertailussa paremmuuksien arviointia viisiportaisen asteikon väleihin. [6, s. 53; 8]

Paremmuuksien tulisi noudattaa johdonmukaisuusperiaatetta. Esimerkiksi jos ensimmäinen vaihtoehto on hieman parempi (Saatyn asteikolla 3) kuin toinen vaihtoehto ja toinen vaihtoehto taas on hieman parempi kuin kolmas vaihtoehto, niin ensimmäisen vaihtoehdon paremmuuden tulisi olla suhteessa kolmanteen vaihtoehtoon aiempien paremmuuksien tulo (Saatyn asteikolla  $3 \cdot 3 = 9$  eli äärimmäisen selvästi parempi). Tämä johdonmukaisuusperiaate ei kuitenkaan välttämättä käytännössä toteudu. Saatyn mukaan käyttökelpoisten tuloksien saaminen analyyttisellä hierarkiaprosessilla vaatii aina tietyn määrän epäjohdonmukaisuutta. Tulosten johdonmukaisuus arvioidaan laskemalla suhdeluku (engl. consistency ratio), joka kuvaa todennäköisyyttä siitä, että parivertailut on tehty täysin sattumanvaraisesti. Suurin sallittu suhdeluku on 0,1. [7, s. 5, 8]

Analyyttisen hierarkiaprosessin käyttämää parivertailua on kritisoitu siitä, ettei se ole sopiva menetelmä paremmuuksia vertaillessa. On väitetty, että hierarkian elementtien keskinäisen riippuvuuden vuoksi prosessia ei tulisi kuvata hierarkkisena vaan verkostona. Analyttinen hierarkiaprosessi ei sovellu sellaisten ongelmien ratkaisuun, joissa on paljon elementtejä, sillä parivertailujen määrä kasvaa tällöin liian suureksi. Prosessin muokattavuus voi myös käänntyä haitaksi: Jos prosessiin lisätään uusia ratkaisuvaihtoehtoja, alkuperäisten vaihtoehtojen paremmuusjärjestys saattaa muuttua. Tämä ei kuitenkaan muodostu ylitsepääsemättömäksi ongelmaksi, sillä analyyttisen hierarkiaprosessin päätarkoituksena on kuitenkin tuottaa paras



ratkaisuvaihtoehto, vaikka se tarjoaa myös paremmuusjärjestyksen muiden vaihtoehtojen osalta. [7, s. 6]

Tässä tutkimuksessa rakennetaan hierarkiapuu luvuissa 3, 4 ja 5 havaittujen ohjuksen toimintaympäristöön vaikuttavien tekijöiden perusteella. Varsinainen vertailu, hierarkiapuu sekä painoarvot perusteluineen käsitellään luvussa 6. Vertailussa käytetään Saaty viisiportaista asteikkoa välttämällä asteikon väliin sijoittuvien arvojen käyttöä, jotta eri kriteerien ja vaihtoehtojen välille saadaan eroa. Varsinainen vertailu suoritetaan syöttämällä luvussa 6 määritellyt arvot Expert Choice Comparion -ohjelmaan, joka suorittaa vertailussa tarvittavan laskennan.

## 1.2. Käsitteiden määrittely

**Meritorjuntaohjuksella** tarkoitetaan pitkän kantaman (yli 100 km) ohjuksia, joita käytetään merimaaleja vastaan.

**Ohjautusjärjestelmällä** tarkoitetaan niitä keinoja ja menetelmiä, joista saadun tiedon perusteella ohjus muuttaa reittiään. Ohjautusjärjestelmä voi saada syötteitä esimerkiksi hakupäältä ja inertipaikannusyksiköitä.

**Ohjautusjärjestelmällä** tarkoitetaan niitä ohjuksen osia, joita ohjus käyttää suuntansa muuttamiseen, kuten esimerkiksi siivekkeet.

**Kvantavalla infrapunahakupäällä** (engl. Imaging Infrared Seeker, IIR) tarkoitetaan infrapunasensoriin perustuvaa hakupäätä, joka kykenee tunnistamaan maalin sen muodon perusteella.

**Tutkahakupäällä** tarkoitetaan sellaista ohjuksen hakupään tutkaa, jonka käyttämä taajuus ei ulotu millimetrialueelle ( $f < 30$  GHz).

## 2. OHJUSTEN JAOTTELU

Ohjattavat asejärjestelmät voidaan jakaa kahteen pääluokkaan: Ohjuksiin (engl. missile) ja täsmäaseisiin (engl. precision guided munition). Ohjukset ovat taistelulatausta tai muuta hyötykuormaa kuljettavia taisteluvälineitä, jotka saavat liike-energiansa reaktiomoottorista ja liikkuvat kohteeseensa joko ohjattuna tai hakeutuen ennalta ohjelmoidulla tai jatkuvasti mitattavalla reitillä. [9, s. 1] Toisen määritelmän mukaan ohjus on taisteluväline, joka liikkuu ulkoapäin tulevien tai sisäisten laitteiden antamien signaalien perusteella [10, s. 13].

Ohjuksen pääosat ovat ohjautusjärjestelmä, taisteluosa, autopilotti, ohjausjärjestelmä sekä propulsiojärjestelmä [11, s. 288]. Ohjautusjärjestelmä (engl. guidance system) on ohjuksen merkittävin osa. Sillä saadaan informaatiota maalista ja sen liikkeistä sekä sillä muodostetaan komennot ohjuksen ohjaukseen. [9, s. 15] Ohjautusjärjestelmä sisältää antennin tai elektro-optisen laitteen eli hakupään, joka on suojattu aerodynaamisella kuorella. Lisäksi se sisältää ohjautuselektroniikan, joka laskee maalista hakupään saamien tietojen mukaan tarvittavat korjaukset autopilotille. Taisteluosa muodostuu taistelulatauksesta, sytyttimistä sekä viritys- ja varmistuskoneistosta. Taisteluosan tarkoituksena on tuottaa vaikutus maalissa oikealla hetkellä. Autopilotti antaa ohjauksen komennot ohjuksen lentorataan vaikuttaviin osiin, joita ovat esimerkiksi moottori sekä ohjauspinnat ja -siivekkeet. Propulsiojärjestelmä mahdollista ohjuksen liikkeen. Se koostuu moottorista sekä polttoaineesta. Ohjausjärjestelmä säätelee ohjuksen ohjauspintoja ja -siivekkeitä autopilotin antamien käskyjen mukaan. [11, s. 289]

Ohjuksen lentorata voidaan jakaa kolmeen vaiheeseen: Laukaisuvaiheeseen, matkalentovaiheeseen sekä loppulähestymis- eli terminaalivaiheeseen. Laukaisuvaihe (engl. boost/initial phase) alkaa laukaisukomennosta ja päättyy, kun ohjus aloittaa tasaisen lennon maalia kohti. Laukaisuvaihe kestää yleensä lähtömoottorin paloajan verran, jonka jälkeen lähtömoottori irrotetaan muusta ohjuksesta. Laukaisuvaiheen aikana ohjus täytyy ohjata sellaiseen paikkaan lentoradalla, jotta se voi vastaanottaa ohjautusjärjestelmältä ohjautussignaaleja. Matkalentovaihe (engl. midcourse phase) on yleensä kestoajaltaan pisin. Sen aikana ohjus ylläpitää suunnitellun lentoratansa kohti maalia. Matkalentovaihe päättyy terminaalivaiheeseen. Kaikilla ohjuksilla ei välttämättä ole matkalentovaihetta. Terminaalivaiheessa (engl. terminal phase) ohjus tekee viimeiset korjaukset lentorataansa kohti maalia. Tässä vaiheessa se saattaa joutua toimimaan suorituskykynsä ääri rajoilla. Terminaalivaiheessa hakeutuvat ohjukset lähestyvät maalia hakupään tuottamien ohjaussignaalien ohjaamana. [11, s. 300–301] Ohjukset korjaavat lentorataansa kohti maalia tietyn logiikan mukaisesti. Erilaiset hakeutumislentoradat vaihtelevat riippuen ohjuksen

ohjautusmenetelmästä ja hakupäästä. Hakeutumislentorata voi esimerkiksi perustua saman suuntiman ylläpitämiseen ohjuksen ja maalin välillä, ohjuksen pysymiseen maalinosoituslaitteen ja maalin välissä (engl. line-of-sight) tai suhteelliseen navigointiin, jolloin maalista lasketaan kulmanopeuden muutosta. [11, s. 301–304]

Ohjukset voidaan luokitella käytettävän ohjautusmenetelmän perusteella ohjattaviin, hakeutuviin ja suunnistaviin ohjuksiin [9, s. 15]. Ohjattavat ohjukset saavat ohjauskomennot ohjuksen ulkopuoliselta järjestelmältä, hakeutuvat saavat tarvittavat ohjauskomennot maalista ja suunnistavat käyttävät sähköisiä laitteita luonnollisten kohteiden seuraamiseen [11, s. 304]. Ohjuksia voidaan myös luokitella esimerkiksi lentoradan, maalin ja lavetin sijainnin, käyttötarkoituksen tai ulottuvuuden mukaan [9, s. 2]. Lentoradan tai lentoreitin perusteella ohjukset voidaan jakaa aerodynaamisiin ja ballistisiin ohjuksiin. Aerodynaamisten ohjusten koko lentorata on ilmakehässä ja ballistisilla ohjuksilla lentorata on pääsääntöisesti aerodynaaminen kiihdytyksessä ja maaliin hakeutumisessa, mutta ilmakehän ulkopuolella ballistinen [12, s. 379]. Poikkeuksen muodostavat ballististen ohjusten ja satelliittien torjuntaan käytettävät ohjukset, jotka eivät hyödynnä ballistista lentorataa ilmakehän ulkopuolella vaan niiden koko lentorata on aerodynaaminen. Ohjattavien asejärjestelmien jako ohjuksiin ja täsmäaseisiin ei ole yksiselitteinen, sillä myös hakeutuvat pommit voidaan varustaa moottorilla, jolloin ne voidaan laskea ohjuksiksi [12, s. 28].

Myöskään ohjusten jaottelu ei ole yksiselitteinen, sillä yksittäisessä ohjuksessa voi olla useita ohjautus- ja hakeutumismenetelmiä. Menetelmät voivat lisäksi sopia useamman kattokäsitteen alle. Ohjautus- ja hakeutumismenetelmän yleistäminen tietyn tyyppisten ohjusten käyttötarkoitukseen on myös haastavaa, vaikka joitain tyypillisiä piirteitä onkin havaittavissa.

Ohjattavat ohjukset (engl. guided missile) perustuvat säteenseurantaan tai komento-ohjaukseen. Tällaisissa ohjuksissa ei itsessään ole maalin seurantajärjestelmää, vaan ne saavat perusteet liikkeen muutoksille ohjauskomentoina muulta ohjusjärjestelmältä. [9, s. 15] Komento-ohjauksessa ohjusjärjestelmä seuraa sekä maalia, että ohjusta ja laskin määrittää ohjuksen reitille tarvittavat korjaukset. Säteenseuranta on yksi komento-ohjauksen alamuoto, jossa ohjus lentää tutkan tai laserin osoittamaa keilaa pitkin. Ohjus mittaa paikkaansa keilan keskiakselilla ja suorittaa itsenäisesti tarvittavat korjaukset reitillä. [10, s. 37; 11, s. 305] Komento-ohjauksen ohjauskomennot välitetään joko johtimilla, valokuidulla, radiolähtetillä, koodattuna tutkasäteilynä tai lasersäteilynä. [9, s. 16; 11, s. 304] Komento-ohjaukseen perustuvat ohjukset ovat tyypillisesti panssaritorjuntaohjuksia tai lyhyen

kantaman ilmatorjuntaohjuksia. Näiden ohjusten kantama on verrattain lyhyt, sillä ampujalla on oltava näköyhteys maaliin.

Hakeutuvat ohjukset (engl. homing missile) tekevät liikkeen muutokset itsenäisesti hakupään mittaamien tietojen perusteella. Hakeutuvat ohjukset voidaan jakaa passiivisiin, puoliaktiivisiin tai aktiivisiin ohjuksiin hakeutumismenetelmänsä perusteella. [9, s. 16] Passiivisesti hakeutuvat ohjukset mittaavat maalin omaa luonnollista säteilyä, kuten esimerkiksi lämpöä tai maalin itsensä lähettämää säteilyä, kuten esimerkiksi tutkan signaalia [9, s. 16; 12, s. 289]. Passiivisten ohjusten etuna on niiden vaikeampi havaittavuus verrattuna aktiiviseen ohjukseen [11, s. 307]. Passiivisesti lämpöherätteeseen hakeutuvat ohjukset ovat tyypillisesti lyhyen kantaman ilmataistelu- ja ilmatorjuntaohjuksia, sillä ne vaativat yleensä lukkiutumisen ennen laukaisua.

Puoliaktiivisesti tutkalla hakeutuvat ohjukset määrittävät maalin paikan mittaamalla maalista heijastuvaa tulenjohtojärjestelmän suorittamaa valaisua [12, s. 289; 9, s. 16]. Maali valaistaan tutka- tai lasersäteilyllä. Puoliaktiivisesti tutkalla hakeutuvat ohjukset vaativat ulkopuolisen maalinosoituksen. Ratkaisun etuna on ohjuksen halvempi hinta, sillä maalin seurantaan tarvittava laitteisto voidaan pääosin sijoittaa ampuvalle lavetille. Ohjuksen koko ei myöskään aseta rajoituksia maalia seuraavalle tutkalle. [10, s. 39] Tämä mahdollistaa suuremman tehon ja monipuolisemmat taajuusvaihtoehdot. Sen haittapuolena on bistaattinen rakenne. Maali ei välttämättä heijasta valaisevan tutkan säteilyä optimaalisesti sitä vastaanottavan ohjuksen suuntaan. Track-via-missile -ohjautusmenetelmä on passiivisen hakeutumisen ja komento-ohjauksen välimuoto. Puoliaktiivinen hakupää mittaa maalista heijastuvaa säteilyä ja lähettää sen koodattuna maalia valaisevalle lavetille. Tulenjohtolaitteisto voi hyödyntää korjauskomentojen laskemisessa itse mittaamansa maalin paikkaa, ohjuksen omaa paikkaa sekä ohjuksen mittaamaa tietoa maalista. [11, s. 307] Puoliaktiivisesti tutkalla hakeutuvat ohjukset ovat tyypillisesti keskipitkän tai pitkän kantaman ilmatorjuntaohjuksia.

Aktiivisesti hakeutuvat ohjukset mittaavat maalin paikan lähettämällä ja vastaanottamalla itse esimerkiksi tutkasignaalia [9, s. 17]. Aktiivisten ohjusten hakupäiden monostaattinen rakenne johtaa melko lyhyisiin seurantaetäisyyksiin, sillä ohjusten suhteessa pieni fyysinen koko rajoittaa tutkan yleensä melko korkeataajuiseksi ja pienitehoiseksi [9, s. 306]. Käytännössä aktiivisesti hakeutuvat ohjukset sisältävät aina myös jonkin toisen hakeutumisen- tai ohjautusmenetelmän. Ohjukset suorittavat matkalentovaiheen perustuen inertiaipaikannukseen, komento-ohjaukseen tai puoliaktiiviseen hakeutumiseen. Aktiivista hakeutumista käytetään vain lähellä maalia ohjuksen lentoradan loppuvaiheessa. [10, s. 38] Aktiivisesti hakeutuvat

ohjukset ovat tyypillisesti keskipitkän tai pitkän kantaman ilmatorjunta- tai ilmataisteluohjuksia. Myös meritorjuntaohjukset ovat pääsääntöisesti aktiivisesti hakeutuvia. Passiiviset ja aktiiviset hakupäät mahdollistavat ammu ja unohda -periaatteen mukaisen toiminnan, jolloin laukaisun jälkeen voidaan keskittyä seuraavaan maaliin ammutun ohjuksen toimiessa täysin itsenäisesti. Lisäksi niillä voidaan ampua maaleja, joiden valaisu tai seuraaminen ampuvalta lavetilta ei ole mahdollista.

Tutkasäteilyyn hakeutuva ohjus lukkiutuu maalin tutkan säteilyyn [13, s. 376]. Ohjus pyrkii lukkiutumaan tutkan pääkeilan lisäksi myös sivukeiloihin, jotta se saisi mahdollisimman usein vastaanotettua maalin tutkan signaalia ja täten päivitettyä maalin paikkaa. Nykyaikaiset tutkasäteilyyn hakeutuvat ohjukset jatkavat hakeutumista maaliin muistiseurannan perusteella, vaikka maalin tutkan lähetys lopetettaisiin. Jotkut ohjustyyppit voivat siirtyä leijuntatilaan odottamaan ja etsimään tutkalähetettä. Tutkasäteilyyn hakeutuvissa ohjuksissa voidaan käyttää myös satelliittipaikannusta tai optista hakupäätä varmentavana tai toissijaisena hakeutumismenetelmänä. [13, s. 376] Tutkasäteilyyn passiivisesti hakeutuvia ohjuksia käytetään tyypillisesti ilmapuolustuksen lamauttamisoperaatioissa (engl. Suppression of Enemy Air Defence, SEAD) tuhoamaan valvontatutkia ennen laajempaa ilmahyökkäystä.

Suunnistavat tai paikantavat ohjukset lentävät ennalta ohjelmoitua reittiä lähtöpisteestä asetettuun ennakkopisteeseen hyödyntäen joko inertiasuunnistusta, satelliittipaikannusta tai maastonseurainta. [9, s. 17; 10, s. 38]. Inertiapaikannusjärjestelmä perustuu asentohyriin ja kiihtyvyyssantureihin, jotka mittaavat ohjuksen liiketiloja [9, s. 17]. Satelliittipaikannus perustuu maapalloa ympäröivään satelliittiverkkoon sekä paikannusta hyödyntävissä laitteissa oleviin vastaanottimiin. Vastaanottimien paikka määritetään kolmiomittauksella mittaamalla radiosignaalin kuluaikaa eri satelliiteilta vastaanottimelle, jossa kuluaikoja verrataan paikan määrittämiseksi. Satelliitit lähettävät kantoaaltoa kahdella eri taajuudella, L1 ja L2, joiden signaali on moduloitu. GPS -satelliittipaikannusjärjestelmässä aikaerojen mittaamisessa käytetään eri satelliittien ja vastaanottimen yksilöllisiä Pseudo Random Noise- eli PRN -koodeja. Paikannustarkkuuden saavuttamiseksi GPS -järjestelmä vaatii tarkkoja kelloja, joiden on oltava täsmälleen samassa ajassa. Satelliittien kellot ovat atomikelloja, joiden käyntivirhe on hyvin pieni. Vastaanottimien kellot synkronoidaan atomikellojen aikaan paikannussignaalin sisältämän korjaussanomien avulla. [14, s. 9–14]

Kantoaaltoon koodattua signaalia voidaan Anti Spoofing - eli AS -moodissa salata muokkaamalla ns. P -koodi P(Y) -koodiksi. AS -moodia käyttäviä vastaanottimia käytetään sotilaallisissa sovelluksissa estämään satelliittien lähettämän koodin kopiointia ja siten väärää

koodia lähettämällä tehtävää häirintää. AS -moodia käyttäviä vastaanottimia on käytössä Yhdysvalloilla ja heidän liittolaisillaan. Ei-salatus, differentiaalikorjatun, GPS -signaalin tarkkuus on noin 1–5 metriä. Differentiaalikorjaus perustuu maa-asemien laskemiin satelliittidatan korjaustietoihin. Salatus AS -moodin tarkkuuden arvioidaan olevan vähintään sama tai parempi kuin differentiaalikorjatun GPS:n. [14, s. 9–14]

Suunnistavat ohjukset voivat hyödyntää paikantamisessaan taivaankappaleita tai niille ohjelmoidaan karttaan perustuva reitti etukäteen, jota ne seuraavat tutkalla tai kameralla [10, s. 38]. Terrain Contour Matching eli TERCOM -menetelmää käyttävät ohjukset vertaavat korkeusmittarilta saatua tietoa ohjuksen muistiin tallennettuun korkeustietomatriisiin tietoihin. TERCOM -menetelmää käyttävien ohjusten muistiin tallennetaan ennalta määritettyjä referenssipisteitä, joiden korkeustietoa se vertaa oman korkeusmittarinsa tuottamaan tietoon. Korkeustietoa verrataan myös referenssipisteen vieressä oleviin korkeustietoihin, jolloin voidaan määrittää ohjuksen paikkaa suunnitellun lentoreitin suhteen. [11, s. 310] Digital Scene Matching Area Correlation (DSMAC) -menetelmää hyödyntävät ohjukset kuvaavat maastoa kameralla ja vertaavat otettuja kuvia ohjuksen muistiin ennalta syötettyihin kuviin. [15, s. 78] Suunnistavat ohjukset ovat yleensä pitkän kantaman ballistisia ohjuksia tai risteilyohjuksia [9, s. 17].

On kuitenkin huomioitava, että useissa ohjuksissa käytetään eri ohjautusmenetelmiä lennon eri vaiheissa. Yleinen ohjautusmenetelmien yhdistelmä on esimerkiksi inertiasuunnistuksen käyttö matkalennon aikana, jonka jälkeen ohjus hakeutuu maaliin hakupään avulla. Tällainen yhdistelmä on tyypillinen pidemmän kantaman ilmatorjuntaohjuksissa sekä meritorjuntaohjuksissa. Nykyaikana useat monimutkaisemmat ohjusjärjestelmät on varustettu datalinkillä, jolla ohjukselle päivitetään maalin paikkaa. Tämä tosin tapahtuu yleensä automaattisesti, eikä vaadi käyttäjältä erillisiä toimenpiteitä.

## 2.1. Meritorjuntaohjukset

Meritorjuntaohjukset laukaistaan kohti maalia tyypillisesti kaukaa horisontin takaa. Ne lentävät yleensä hyvin lähellä meren pintaa, joka vaikeuttaa niiden havaitsemista tutkalla johtuen radiohorisontista sekä meren pinnan ja maalin aiheuttamasta tutkasignaalin monitietoisuudesta. [16, s. 2–3] Meritorjuntaohjukset voidaan laukaista alukselta, lentokoneesta, maista tai sukellusveneestä. [12, s. 380] Suomessa on lisäksi käytössä lyhyemmän kantaman ohjuksia, joita kutsutaan rannikko-ohjuksiksi. Maailmalla on käytössä myös aluksista laukaistavia lyhyen kantaman merimaaliohjuksia pieniä alusmaaleja vastaan, kuten

esimerkiksi Raytheonin AGM-176A Griffin -ohjuksen aluksesta laukaistava versio sekä MBDA:n Brimstone -ohjuksen Sea-SPEAR -versio [17, s. 56–59]. Nämä ohjukset ovat tyypillisesti panssaritorjuntaohjuksista kehitettyjä. Alukset ovat verrattain kovia maaleja, jolloin meritorjuntaohjusten taistelukärjen tulee olla läpäisevä sekä räjähdemäärältään suuri. Sirpaloituva lataus räjähtää vasta kyljen läpäisyn jälkeen vaikutuksen maksimoimiseksi aluksen rakenteissa. Meritorjuntaohjusten maalit ovat yleensä arvokkaita ja siitä syystä hyvin suojattuja. Tästä syystä ohjuksen suunnittelussa kiinnitetään huomiota maalin omasuojajärjestelmien läpäisyyn, vaikeaan havaittavuuteen, reittisuunnitteluun, liikkuvuuteen sekä eri lentokorkeuksien käyttöön reitin eri vaiheissa. [18, s. 400, 469]

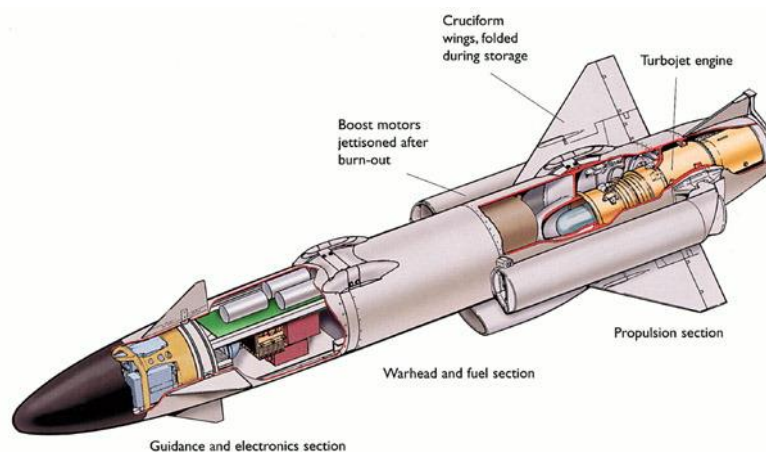
Meritorjuntaohjuksissa kehitystä tapahtuu kantaman kasvuna, reittilennon monipuolistumisessa sekä hakeutumisessa ja maalinvalinnassa. Kehitys pyritään saavuttamaan kasvattamatta ohjuksen kokoa ja massaa. Muotoilussa pyritään välttämään ylimääräisiä ulokkeita, jolloin ohjuksen tutkapoikkipinta-ala saadaan minimoitua. Ohjuksen kokoa saadaan edelleen pienennettyä käyttämällä tehokkaampia polttoaineita, entistä pienempää elektroniikkaa sekä tehokkaampia räjähdysaineita. Ohjusten paikanmääritys tehdään inertiasuunnistuksen lisäksi satelliittipaikannuksella sekä maastoseurannalla vertaamalla korkeusmittarin tietoa digitaaliseen kartta-aineistoon. Meritorjuntaohjuksista tulee entistä monikäyttöisempiä, eivätkä niiden maalit enää rajoitu aluksiin, vaan ohjuksia voidaan käyttää myös maalla olevia maaleja vastaan. [19, s. 198–199; 20, s. 63] Meritorjuntaohjuksia tultaneen tulevaisuudessa varustamaan kaksisuuntaisella komentolinkillä maalin päivitystä varten. [20, s. 63]

Tulevaisuudessa meritorjuntaohjuksissa tulee yleistymään monitoimihakupäät, joissa yhdistyy kaksi tai useampi eri sensoritekniikka. Meritorjuntaohjuksissa kehitystrendinä on erityisesti tutka- ja infrapunahakupään yhdistäminen. Tällöin voidaan valita sääolosuhteisiin ja maalitilanteeseen paremmin soveltuva hakupää tai yhdistää molempien sensoreiden tiedot, jolloin ohjuksen häirintä on vaikeampaa. [19, s. 199; 20, s. 47, 59] Erilaisia hakupäatekniikoita voitaisiin myös hyödyntää hakeutumisen eri vaiheissa. Ohjus voisi esimerkiksi etsiä ja tunnistaa maalin ensin passiivisesti infrapunasensorilla, tämän jälkeen määrittää maalin nopeuden ja etäisyyden tutkalla sekä suorittaa lopullisen osumakohdan valinnan infrapunasensorilla. Osumakohdan valinnalla mahdollistetaan maksimaalisen hyödyn saaminen ohjuksen rajoitetusta taistelulatauksesta kohdentamalla vaikutus maalin toiminnan kannalta elintärkeisiin osiin [20, s. 64]. Kauempana tulevaisuudessa ohjukset voivat kehittyä yhteistoimintaisiksi, joka mahdollistaisi useamman ohjuksen maalitiedon jakamisen keskenään. Tällä tekniikalla useamman ohjuksen salvolaukaisussa vain yhden

ohjuksen tarvitsee aktiivisesti mitata maalia, jonka jälkeen se voi jakaa paikkatiedon muille passiivisena lentäville ohjuksille. [20, s. 58]

### 2.1.1. Esimerkkejä meritorjuntaohjuksista

RBS15 on ruotsalaisen Saab Dynamicsin valmistama aktiivisella tutkahakupäällä varustettu alisooninen meritorjuntaohjus, jolla voidaan vaikuttaa maa- ja merimaaleihin. Sen ensimmäisen version kehitystyö on aloitettu vuonna 1979 [21]. Ohjuksen uusin versio on saatavilla sekä alukselta ja maalavetilta laukaistavana (RBS15 Mk3), että ilmasta laukaistavana varianttina (RBS15F ER). [22; 23] Uusimmassa versiossa ohjuksen muotoilu poikkeaa aiemmista versioista pienemmän tutkapoikkipinta-alan johdosta. Lisäksi ohjukseen on uusittu autopilotti, inertiasuunnistussyksikkö, aallokon huomioiva korkeusmittari sekä Ku - alueen tutkahakupää. [24] Ohjuksen kantama on yli 200 km, lentonopeus noin 0,9 Mach ja sen lentorataan voidaan suunnitella useita kolmiulotteisia reittipisteitä. Matkalennon aikana paikannus toteutetaan inertiasuunnistuksella, GPS -paikannuksella sekä radiokorkeusmittarilla. GPS -vastaanotin on Rockwell Collinsin valmistava ja se kykenee vastaanottamaan P(Y) -koodattua sotilaskäyttöön tarkoitettua signaalia. [22; 23; 25] Radiokorkeusmittari on FMCW -periaatteella toimiva tutka, joka mahdollistaa lentämisen jopa 1 m korkeudessa merenpinnasta [21]. Ohjuksen paine- ja sirpalevaikutteinen taistelulataus on kooltaan 200 kg, joka voidaan räjäyttää hidasteisena iskusytytyksellä tai herätesytytyksellä. RBS15 Mk3 on tulossa palveluskäyttöön Saksassa ja Puolassa. [22; 23] Valmistaja kehittää ohjuksesta Mk4 -versiota, jossa tulisi olemaan osumakohtaan valintaan kykenevä yhdistetty FMCW -tutka- ja kuvantava infrapunahakupää, entistä pidempi kantama, maastonseurantakyky matkalennon aikana sekä kaksisuuntainen datalinkki [21; 24]. RBS15 Mk3:n halkileikkaus on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. RBS15 Mk3 -ohjuksen halkileikkaus. [26]



RBS15:n hakupäässä on Saab Systemsin (aikaisemmin Philips Elektronikindustrier AB) valmistama 9GR400 -monopulssitutka [21; 24]. Tutkan pulssin pituudeksi arvioidaan 0,2–1,0  $\mu$ s, pulssintoistotaajuudeksi 1–4 kHz ja huipputehoksi 65–100 kW. Tutkan hakualueen leveydeksi arvioidaan  $35^\circ$  ja korkeudeksi  $15^\circ$ . Tutka kykenee lukkiutumaan myös häirintälähettimeen. [21] Valmistajan mukaan laajan taajuuskaistan omaava Ku -alueen tutka suurella antennilla mahdollistaa erinomaisen etäisyserottelukyvyn sekä hyvät häirinnänväistöominaisuudet. [27]

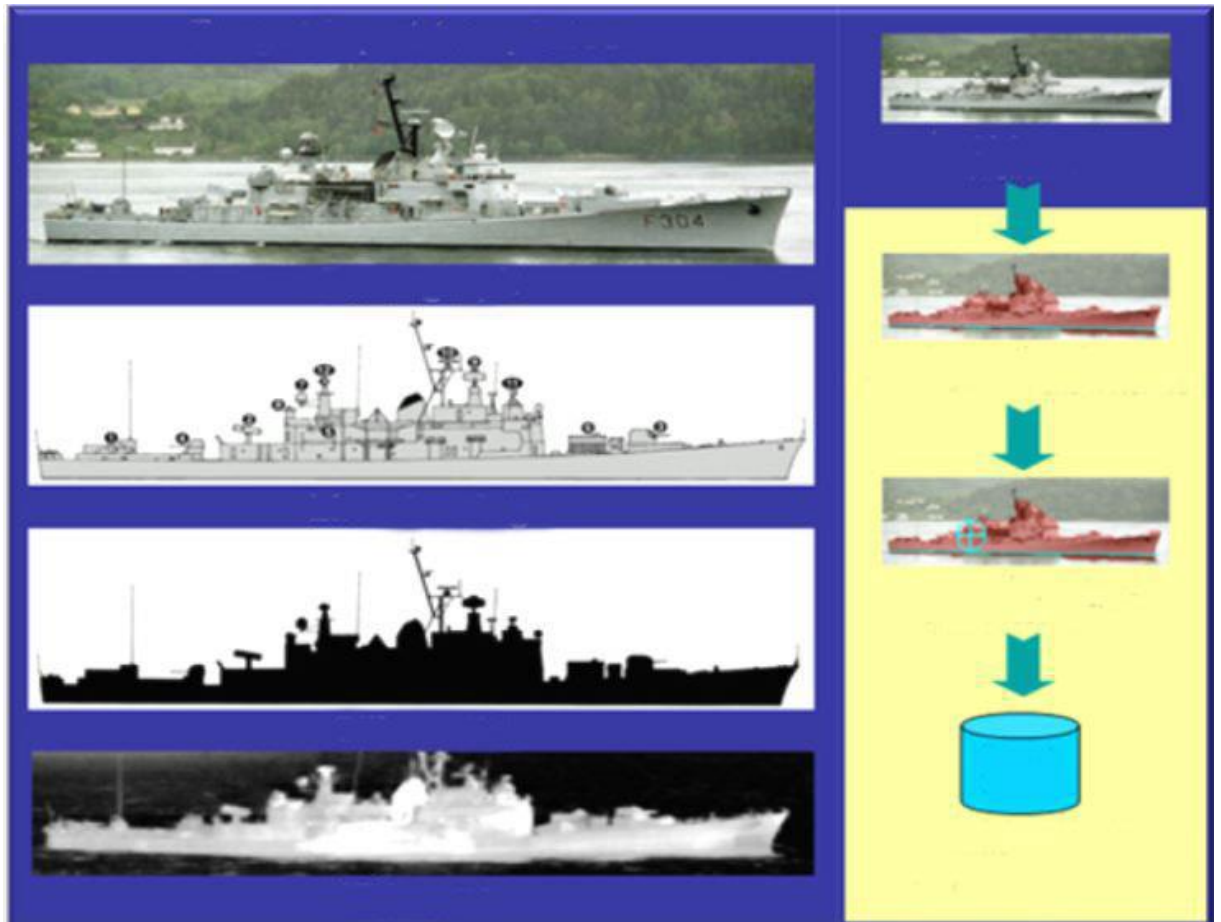
Naval Strike Missile on norjalaisen Kongsbergin valmistama kuvantavalla infrapunahakupäällä varustettu alisooninen meritorjuntaohjus, jonka kehitystyö on aloitettu vuonna 1996 [28]. Ohjus on alukselta tai maalavetilta laukaistava ja se on palveluskäytössä Norjassa sekä Puolassa. Siitä on kehitetty myös ilmasta laukaistava variantti, Joint Strike Missile, joka on suunniteltu mahtumaan F-35 -hävittäjän sisäiseen asekuiluun. Kummassakin ohjussmallissa on sama hakupää, ohjelmisto, tehtäväsuunnittelusovellus, taistelukärki sekä moottori. [29] Joint Strike Missile -ohjukselta on kehitteillä pystysuoraan laukaistava versio, joka voitaisiin integroida länsimaisissa aluksissa yleisesti käytössä olevaan Mk 41 VLS -laukaisujärjestelmään sekä sukellusveneen 533 mm:n torpedoputkesta laukaistava versio [28]

Naval Strike Missilen kantama on yli 200 km ja sillä kyetään vaikuttamaan maa- ja merimaaleihin. Sen hakupää kykenee tunnistamaan maalin alusluokan ja valitsemaan halutun osumakohdan. Matkalentovaiheessa ohjukselle voi antaa 200 reittipistettä ja se suunnistaa inertipaikannuksella sekä sotilassignaalia vastaanottavalla GPS -paikannuksella. Maaston seurannassa laserkorkeusmittarin tietoa verrataan ohjuksen muistissa olevaan digitaaliseen kartta-aineistoon. [28; 29; 30] Sen ohjelmoitavalla sytyttimellä varustettu sirpale- ja painevaikutteinen titaanipäällysteinen taistelulataus on kooltaan 100 kg TNT -ekvivalenttina. [29; 31] Ohjuksen runko on valmistettu komposiitista, jotta se olisi mahdollisimman vaikeasti havaittavissa tutkalla. Rungon suunnittelussa on kiinnitetty huomiota mahdollisimman pieniin herätetasoihin sekä tutka-, että infrapuna-alueella [28]. Valmistajan mukaan tutkahakupää olisi ollut liian helposti häiritävissä eikä tunnistettavissa oleva tutkahakupään lähete ei soveltuisi ohjuksen rungon kehittyneisiin häiveominaisuuksiin [27].

Ohjuksen lentorata voidaan suunnitella manuaalisesti tai automaattisesti. Automaattisesti lentorata on valmis alle 5 sekunnissa. Automaattiseen lentoradan suunnitteluun voidaan vaikuttaa antamalla ammunnanhallintajärjestelmälle rajoitteita, kuten esimerkiksi haluttuja hyökkäys- ja hyökkäyskieltoalueita, lentokieltoalueita sekä korkeusrajoituksia. Lisäksi sille

voidaan antaa taktisia ehtoja, kuten esimerkiksi pienin lentoaika maaliin, vaikeimmin havaittava lentoreitti, suurin mahdollinen hakualue tai haluttu lähestymissuunta kohti maalia. Manuaalisessa lentoreitin suunnittelussa operaattori voi määrittää 200 horisontaalista reittipistettä, halutun iskuhetken useamman ohjuksen laukaisuun sekä osumakohdat ohjuksille. Automaattisesti luotuja lentoratoja voidaan myös muokata. Hätäratkaisuna ohjus voidaan myös ampua suuntiman perusteella, jolloin se lentää valittuun suuntaan, kunnes havaitsee maalin. [28]

Ohjuksen etuosa on erotettu muusta rungosta ja se pysyy ohjuksen kaartaessa vakautettuna horisonttiin, jotta hakupää pystyisi keilaamaan pinnan tasossa mahdollisimman laajassa sektorissa. Hakupää sijaitsee ohjuksen etuosan alaosassa ja sen sensorit on suojattu valoa läpäisemättömällä ikkunalla. Hakupään taakse ohjuksen etuosaan on sijoitettuna myös kaksi laserkorkeusmittaria. [28] Naval Strike Missilen hakupää on jäädytetty, keski- ja kaukoinfrapuna-alueella toimiva kuvantava infrapunahakupää. Hakupää keilaa vain vaakasuunnassa ja se on mekaanisesti vakautettu horisonttiin. Keilattava alue jaetaan kulmaportteihin harhamaalien suodattamiseksi. Hakupää kykenee tunnistamaan maalinsa alusluokan ja erottelemaan alukset toisistaan sekä ympärivöistä maasta. Automaattinen maalintunnistusjärjestelmä (engl. Automatic Target Recognition, ATR) luokittelee sensorin havaitsemat maalit joko vihollisiksi tai neutraaleiksi. ATR mahdollistaa tietyn osumakohdan valinnan aluksesta jopa 0,6 metrin tarkkuudella. [28; 29; 30] Kuvassa 2 on havainnollistettu osumakohdalla varustetun maalitiedon luominen ohjuksen uhkakirjastoon siluettikuvan, valokuvan tai lämpökameran kuvan perusteella.



Kuva 2. Osumakohtalla varustetun maalitiedon tuottaminen uhkakirjastoon kuvan perusteella [29]

Taulukossa 1 on listattu edellä esiteltyjen ohjusten ominaisuuksia. Ominaisuuksia vertaamalla voidaan havaita, että tämän kokoluokan alisooniset meritorjuntaohjukset ovat teknisiltä ominaisuuksiltaan varsin samankaltaisia. Tyypillistä on usean, toisiaan tukevan, ohjausmenetelmän käyttö. Matkalentovaiheessa ohjukset käyttävät inertiasuunnistusta ja GPS-paikannusta. Hakeutuminen maaliin toteutetaan hakupäällä. GPS-paikannuksen käyttö mahdollistaa myös vaikuttamisen maalla oleviin maaleihin. Merkittävimmät erot ovat ohjusten painossa ja hakupään toteutuksessa. Taistelulatauksen painoerot selittyvät lähdemateriaalien osittain ristiriitaisilla tiedoilla, sillä joissain lähteissä puhutaan latauksen todellisesta painosta, kun taas toisaalla puhutaan räjähdysainemäärästä TNT-ekvivalenttina. Taistelulataus voi sisältää räjähdysaineen lisäksi myös esisirpaloitua materiaalia, josta ei välttämättä ole mainintaa. Ohjuksen kokonaispainojen välinen ero johtunee taistelulatauksen kokoerojen lisäksi esimerkiksi rungon valmistusmateriaalista. Naval Strike Missile on myös kokonaisuudessaan alusta asti suunniteltu ohjus, kun taas RBS 15 Mk3 on ohjuksen runkoon tehtyistä pienistä modifikaatioista huolimatta käyttänyt samaa perusrakennetta vuodesta 1979 [21].

Taulukko 1. Esiteltyjen meritorjuntaohjusten teknisiä ominaisuuksia [21; 28]

	<b>RBS15 Mk3</b>	<b>Naval Strike Missile</b>
Pituus	4,35 m	3,96 m
Halkaisija	1,4 m	1,36 m
Paino (lähtömootoreilla/ilman)	800/630 kg	400/350 kg
Nopeus	0,9 M	0,9 M
Kantama	>200 km	>200 km
Suunnistus	GPS/INS	GPS/INS/TERCOM
Hakupää	RF	IIR
Taistelukärki	200 kg	100 kg

### 3. HAKUPÄÄTYYPIT

Hakupää on hakeutuvien ohjusten tärkein komponentti. Sen tehtävänä on etsiä maali, lukittua siihen ja antaa ohjautusjärjestelmälle suuntatieto ohjuksen ohjaamiseksi maaliin [13, s. 311]. Hakupäässä on sensori, joka mittaa jotain sähkömagneettisen spektrin osa-aluetta maalitiedon muodostamiseksi.

Sähkömagneettisella spektrillä tarkoitetaan valon nopeudella etenevää säteilyä eli sähkö- ja magneetikentän aaltoliikettä. Spektrin eri osat eroavat toisistaan, jonka vuoksi sitä jaotellaan. Spektri voidaan jakaa kahteen luokkaan sähkömagneettisen säteilyn aallonpituuden ja sitä kautta taajuuden mukaan. Pienitaajuinen säteily on radiosäteilyä ja suuritaajuinen optista säteilyä. Optista säteilyä ovat esimerkiksi infrapuna- ja ultraviolettisäteily sekä näkyvä valo. [11, s. 100; 13, s. 39] Optisen säteilyn alueella toimivat laitteet voidaan jakaa kahteen kategoriaan: Niihin, jotka havainnoivat ja vahvistavat kohteista heijastuvaa säteilyä sekä niihin, jotka havainnoivat kohteiden itsensä lähettämää säteilyä. Ensimmäiseen kategoriaan kuuluvat valonvahvistimet ja toiseen kategoriaan lämpökamerat. [11, s. 101]

Kaikki kappaleet, joiden lämpötila on absoluuttisen nollapisteen yläpuolella lähettävät sähkömagneettista säteilyä. Säteily tapahtuu kaikilla aallonpituuksilla ja sen maksimi voidaan määrittää Wienin siirtymälain mukaan kappaleen pintalämpötilan perusteella. [13, s. 52] Kuumat kappaleet säteilevät kylmiä laajakaistaisemmin ja niiden säteilymaksimi matalammalla aallonpituudella kuin kylmillä [12, s. 146]. Kuumien kappaleiden säteily on myös teholtaan merkittävästi voimakkaampaa kuin kylmien kappaleiden erityisesti lyhyillä aallonpituuksilla. [32, s. 2] Musta kappale on teoreettinen kappale, joka absorboi kaiken siihen kohdistuvan säteilyn ja säteilee itse ilman häviöitä. [11, s. 110] Mustan kappaleen säteily on kuitenkin täysin teoreettista, sillä luonnossa mitkään kappaleet eivät noudata sitä. [13, s. 53] Wienin siirtymälakia ja mustan kappaleen säteilyn teoriaa hyödynnetään infrapuna-alueen järjestelmiä tarkasteltaessa.

Sähkömagneettisen säteilyn sotilassovellutuksiin vaikuttaa erityisesti säteilyn käyttäytyminen ja vuorovaikutus ilmakehän alimman kerroksen, troposfäärin, kanssa. Säteilyn etenemiseen troposfäärissä vaikuttaa esimerkiksi käytetty aallonpituus, ilman paine ja lämpötila, kosteus, sumu, sade, pöly, savu ja pienhiukkaset. Näiden partikkeleiden resonanssitaajuuksilla säteilyn vaimeneminen on voimakasta. Tätä vaimenemista kutsutaan sironnaksi. [13, s. 56] Sironnta tapahtuu, kun säteilyn aallonpituus on sirottavien partikkelien kokoista [33]. Sironnassa ilmakehän partikkelit muuttavat säteilyn fotonien etenemissuuntaa. Sironnassa säteilyn

energia ei varsinaisesti muutu tai katoa, vaan se jakautuu eri suuntiin, jolloin alkuperäiseen etenemissuuntaan nähden syntyy häviötä. [11, s. 121; 34, s. 5] Resonanssitaajuuksien väliin jää ikkunoita, joissa vaimennus on pienempi. Partikkeleiden koko vaikuttaa siihen, miten voimakkaasti ne vaimentavat eri aallonpituuksilla etenevää säteilyä. Tästä johtuen esimerkiksi kaukoinfrasäteilyalueen lämpökameroilla näkee hyvin savun läpi, mutta sade ja sumu vaimentavat alueen infrapunasäteilyä voimakkaasti. [11, s. 122; 13, s. 83–84] Absorptiolla tarkoitetaan säteilyn fotonien törmäämistä ilmakehän kaasujen molekyyliin ja partikkeleihin, jolloin fotonien energia muuttuu liike-energiaksi ja lämmöksi. [11, s. 119; 34, s. 5] Tutkasäteily voi myös ilmakehän ominaisuuksista johtuen taittua, jonka seurauksena säteily voi osua maahan tai kanavoitua ilmaan [35, s. 36].

Ilmakehässä suurimpien häviöiden aiheuttajia ovat vesihöyry, hiilidioksidi, typpioksidi, hääkä ja otsoni. Edellä mainituista vesihöyryllä on suurin vaikutus infrapuna-alueen säteilyn etenemiseen. Vesihöyryn määrä ja esiintyminen on myös ilmakehän kaasuista eniten vaihteleva tekijä. Etenkin kaupunkialueilla hiilidioksidi absorboi merkittävästi keski-infrapuna-alueen säteilyä, mutta keski-infrapuna-alue on myös parhaiten vesihöyryä läpäisevää. [11, s. 119; 34, s. 5] Näin ollen sähkömagneettisen säteilyn eteneminen on tilanne-, aika- ja paikkariippuvaista käytetyn aallonpituuden lisäksi. Paikkariippuvaisuus johtuu vallitsevasta ilmastosta ja säästä, aikariippuvaisuus vuoden- ja vuorokaudenajasta ja tilanneriippuvaisuus esimerkiksi taistelukentän tapahtumista, kuten savusta ja pölystä. Troposfääri on lähes läpinäkymätön 10 mm – 15 µm aallonpituuksilla, jolloin käytännössä kaikki sähkömagneettinen säteily absorboituu vesihöyryn vuoksi. Tämän lisäksi esimerkiksi millimetritaajuisen tutkasäteilyn ja infrapunataajuisen säteilyn alueilla on eräänlaisia ikkunoita, joissa säteilyn eteneminen on suotuisaa, mutta ikkunoiden välissä olevilla taajuusalueilla suurin osa säteilystä absorboituu. [13, s. 56]

### 3.1. Infrapunahakupää

#### 3.1.1. Infrapunasäteily

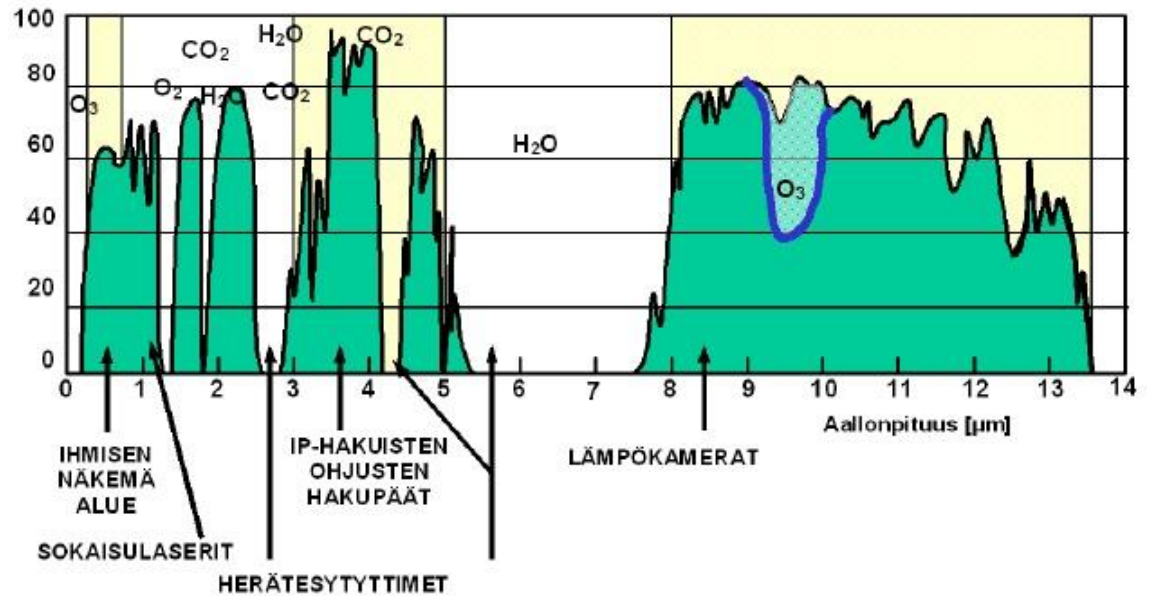
Kaikki kohteet, joiden lämpötila on absoluuttisen nollapisteen yläpuolella lähettävät sähkömagneettista säteilyä infrapunataajuusalueella. Kohteen lämmitessä sen molekyylit alkavat värähdellä vuorovaikutuksen pitäessä ne kuitenkin kasassa. Värähtelyliike on luonteeltaan oskilloivaa, joka aiheuttaa lyhytaaltoista sähkömagneettista säteilyä. Tämän sähkömagneettisen säteilyn energia muodostuu fotoneista. [11, s. 109] Sodankäynnin kannalta

terminen infrapunasäteily on keskeisessä roolissa. Termistä säteilyä ei tuoteta keinotekoisesti vaan kappaleet itsessään säteilevät termistä säteilyä, jonka voimakkuus riippuu kappaleen ominaisuuksista. [36, s. 183]

Infrapunasäteilyä lähettävät kohteet voidaan jakaa lämpösäteilijöihin ja selektiivisiin säteilijöihin. Lämpösäteilijät lähettävät koko infrapunaspektrin alueella, mutta säteilyhuippu tapahtuu vain tietyllä aallonpituusalueella. Tällaisia säteilylähteitä ovat esimerkiksi maasto, ihmiset sekä aerodynaamisesti lämpenevät kohteet, kuten esimerkiksi lentokoneet. Selektiiviset säteilijät lähettävät kapealla aallonpituuskaistalla johtuen siitä, että yksittäiset atomit ja molekyylit eivät vuorovaikuta toisiinsa. Selektiivisiä säteilijöitä ovat esimerkiksi korkean lämpötilan ja matalan paineen omaavat kaasut, kuten esimerkiksi moottoreiden tuottamat pakokaasut. Säteilyhuippuja voi kuitenkin olla useita spektrin eri aallonpituuksilla. Laser on ääriesimerkki selektiivisestä säteilijästä, sillä sen säteily tapahtuu lähes pistemäisellä taajuudella. [11, s. 110] Selektiivisestä säteilystä johtuen infrapunasäteilyn havaitsemiseen liittyvissä sovellutuksissa parhaan suorituskyvyn saavuttamiseksi on valittava käytettävä infrapuna-alue todennäköisimmän maalin säteilymaksimin mukaisesti.

Infrapuna-alueen säteily ulottuu noin millimetrin aallonpituudesta näkyvän valon noin 780 nm:n aallonpituuteen asti. Infrapuna-alue voidaan jakaa osiin aallonpituuden mukaan useilla eri tavoilla. [11, s. 100–101; 13, s. 80] Tässä tutkimuksessa jaotellaan infrapuna-alueet liitteen 1 taulukon 1 mukaisesti. Infrapuna-alueen jaottelu perustuu ilmakehän läpäisyikkunoihin [11, s. 101]. Näissä läpäisyikkunoissa säteilyn eteneminen on suotuisinta. Säteilyn eteneminen ei kuitenkaan ole ideaalista, vaan sen vaimeneminen riippuu paljolti vallitsevasta säätilasta. Sateessa ja sumussa infrapuna-alueen säteilyn eteneminen on heikkoa tai lähes olematonta. [20, s. 139] Läpäisyikkunat on havainnollistettu kuvassa 3. Sotilassovellutukset asettuvat pääosin keski- tai kaukoinfrapuna-alueelle, jota kutsutaan myös termiseksi infrapuna-alueeksi. Kaukoinfrapuna-alueella lähellä taustan lämpötilaa olevien kohteiden, kuten esimerkiksi ihmisten tai ajoneuvojen, lähettämä säteily on aallonpituudeltaan noin 10  $\mu\text{m}$ , joka osuu 8–12  $\mu\text{m}$ :n läpäisyikkunaan. Keski-infrapuna-alueen ikkuna soveltuu kuumien kohteiden, kuten esimerkiksi lentokoneiden moottoreiden, havaitsemiseen. [13, s. 81]

Suhteellinen läpäisykerroin [%]



Kuva 3. Ilmakehän läpäisyikkunat optisen säteilyn aallonpituuksilla [13, s. 80]

Wienin siirtymälain mukaisesti kauko-infrapuna-alueella toimivan sensorin havaitsemien maalien lämpimien osien lähettämät säteilymaksimit osuvat sensorin kannalta sopivalle aallonpituudelle. Lämpiminä ja kylminä erottuvien kohteiden erottaminen taustasta johtuu pääosin niiden heijastamasta säteilystä eikä niiden itsensä lähettämästä säteilystä. Merellä alusten rakenteiden heijastama auringon lämpösäteily sekä kyseisen lämpöenergian säilyttäminen ovat merkittäviä lämpöherätteen lähteitä. Auringon oma säteily tapahtuu lähi-infrapuna-alueella säteilymaksimin ollessa noin  $0,5 \mu\text{m}$ :n aallonpituudella. [11, s. 124–126] Taistelukentällä olevissa kohteissa voi tapahtua niiden operoinnista johtuvaa lämmönvaihtelua ja jotkin kohteet voivat olla osan ajasta taustaa viileämpiä ja osan ajasta taustaa lämpimämpiä [34, s. 12] Tämä ilmiö ei kuitenkaan merellä ole kovinkaan tavallista, sillä alukset harvoin ovat täysin passiivisia, vaan niistä erottuu aina esimerkiksi konehuoneet ja pakokaasut kuumina kohteina. Avomerellä tausta myöskään harvoin lämpenee aluksia lämpimämmäksi kohteeksi. Saaristossa tilanne voi kuitenkin olla toinen. Auringon säteilyn tulokulma vaikuttaa aluksen kyljen aiheuttamaan heijastukseen, kuten kuvasta 4 voidaan havaita. Kuvassa sota-alus on kääntynyt siten, että se heijastaa voimakkaasti auringon säteilyä sensorin käyttämällä aallonpituusalueella [37, s. 4].





Kuva 4. Auringon säteilyn heijastuminen infrapuna-alueella sota-aluksen kyljestä [37, s. 3]

### 3.1.2. Infrapunailmaisimet

Infrapunasensorin tarkoituksena on havaita kohde taustasta ja muuntaa silmälle näkymätön säteily sähköiseksi suureksi, joka voidaan edelleen muuntaa kuvaksi [11, s. 125; 38, s. 74]. Kohteen lähettämää ja sensorin havaitsemaa säteilyä kutsutaan hyötysignaaliksi ja taustan lähettämää säteilyä kohinaksi tai välkkeeksi. Säteily vaimenee ilmakehässä eri tekijöiden vaikutuksesta ja vain pieni osa säteilystä päätyy sensorin ilmaisimeen. Ilmaisimien eli detektorien on sensorin osa, joka muuttaa säteilyn optisen signaalin sähköiseksi. Tämä signaali koostuu fotoneista, joiden energialla tuotetaan ilmaisimessa sähkövirtaa. Fotonien aallonpituuden tulee soveltua ilmaisimessa käytettävän tekniikan aallonpituuteen, jotta sähkövirtaa muodostuisi. [11, s. 125; 32, s. 3] Sensorissa käytetty ilmaisintekniikka määrittää laitteen herkkyuden, sensorilla käytettävän aallonpituuden, taajuuskaistan sekä resoluution. Ilmaisimen herkkyteen vaikuttaa sen valmistusmateriaali, käytettävä aallonpituus, ilmaisimen koko sekä taajuuskaista. [11, s. 125]

Ilmaisimen tehtävänä on suodattaa hyötysignaali kohinasta ja välkkeestä. Kohinaa aiheuttavat kohteen lähellä olevat muut kappaleet, maasto, tausta sekä ilmakehä ja sääilmiöt. Välkettä

aiheuttavat taustalla olevat kappaleet, jotka muistuttavat maalina olevaa kohdetta kooltaan ja muodoltaan. Myös sensorin elektroniikka aiheuttaa itsessään jonkin verran lämpökohinaa. Sensorin ilmaisin havaitsee vain tietyn ilmaisukynnyksen ylittävät signaalit. [11, s. 125]

Johnsonin kriteeri on empiiriseen tutkimukseen perustuva malli, jonka perusteella voidaan määrittää infrapunasensorin muodostaman kuvan perusteella minimietäisyys, jolla 50 % koehenkilöistä pystyi havaitsemaan, tunnistamaan tai yksilöimään kohteen. Johnsonin kriteerin mukaan maalin havaitsemiseen tarvitaan yksi, tunnistamiseen neljä ja yksilöintiin seitsemän jaksoa. Jaksolla tarkoitetaan ilmaisinelementtiparia, joka tarvitaan kohteen erottamiseen taustasta. Tällainen elementtipari muodostuu kahdesta ilmaisimesta, joista toinen havaitsee kohteen ja toinen ei. Kriteerin perusteella jakson havaitsemiseen vaikuttavia tekijöitä ovat kohteen fyysinen koko, kohteen projisoituva koko ilmaisimatriisilla, havaitsemisetäisyys sekä optiikan polttoväli. Johnsonin kriteeri on kuitenkin hyvin teoreettinen malli, sillä se ei ota kantaa havaitun signaalitason. Signaalitason etenemiseen ja tasoon vaikuttavat tekijät tulee huomioida arvioitaessa havaintoetäisyyksiä. Ilmaisimatriisilla tarkoitetaan sellaista ilmaisinyhmää, jossa jokaista kuvapistettä kohti on yksi elementti. Tällöin matriisi on tuijottava. Vanhempaan tekniikkaan perustuvat sensorit hyödyntävät pyyhkäisyä, jolloin ilmaisin keilaa valvottavan alueen piste kerrallaan. Matriisin etuna on pyyhkäisyilmaisinta halvempi hinta, sillä se ei tarvitse erillistä hienomekaniikkaa pyyhkäisyn toteuttamiseen. [13, s. 296–309] Ilmaisinelementin kokoon ja kuvapisteen eli pikselin määrään vaikuttaa lähinnä valmistustekniikka ja -materiaali ja siihen liittyvä elektroniikka. Pikselin määrän kasvattaminen vaatii suuremman ilmaisinelementin, joka taas johtaa suuremman optiikan tarpeeseen. Pikselin koon pienentäminen vaikuttaa niiden herkkyyteen, mutta tätä ongelmaa voidaan jälkikäteen hieman korjata ohjelmallisesti. [39, s. 48]

Infrapunasäteilyä mittaavien sensorien toiminta perustuu termisiin ilmaisimiin tai kvantti-ilmaisimiin. Terminen ilmaisin mittaa elementissä tapahtuvaa lämpenemistä ja herkempi kvantti-ilmaisin ilmaisee sähkömagneettisen säteilyn hiukkasten eli fotonien aiheuttaman muutoksen sähkön jännitteessä, virrassa tai resistanssissa. Uusinta tekniikkaa hyödyntäviä termisiä ilmaisimia ovat esimerkiksi bolometrit ja pyrosähköiset ilmaisimet. [11, s. 139–140; 39, s. 44] Kvanttitekniikkaa hyödyntävät ilmaisimet voidaan myös rakentaa toimimaan sekä keski- että kaukoinfrapuna-alueella, jolloin voidaan valita toimintaympäristöön paremmin soveltuva aallonpituusalue tai vertailla eri alueiden signaaleja keskenään harhamaalien suodattamiseksi. [32, s. 4]

Kaukoinfrapuna-alueella toimivat kvantti-ilmaisimet on yleensä jäädytettävä, jotta niiden kohina ei peitä fotonien energiaa. Keski-infrapuna-alueella on olemassa myös jäädyttämättömiä ilmaisimia. Kvantti-ilmaisimien valmistusmateriaali määrittää sen käyttämän aallonpituuden. Terminen ilmaisimien toimii hyvin laajalla aallonpituusalueella, mutta sillä on kvantti-ilmaisinta huonompi nopeus ja herkkyys, joka johtuu ilmaisimen lämpenemisestä aiheutuvasta kohinasta. Termisten ilmaisimien etuna on, että niitä ei tarvitse jäädyttää. [13, s. 305–310] Jäädyttämättömän ilmaisimen käytöllä saavutetaan halvemmat valmistuskustannukset sekä pienempi virrankulutus. Haittana on jäädytetyjä ilmaisimia heikompi suorituskyky. Bolometri-ilmaisimet toimivat ilman jäädytystä. [39, s. 48–55]

Sensoreiden jäädytystarpeeseen vaikuttaa ilmaisintekniikan lisäksi myös itse sensorin käyttötarkoitus. Lyhytaikainen ja kertaluontoinen jäädytys voidaan toteuttaa suuripaineisella kaasulla, kuten argonilla tai paineilmalla. Tämän tyyppistä jäädytystä tarvitsevat kohteet ovat esimerkiksi ohjusten hakupäitä, jotka ovat kertakäyttöisiä ja joilla on tarve nopealle jäädytykselle. Sensoreille, joita käytetään useita kertoja, kuten esimerkiksi lämpökameroille, jäädytys toteutetaan Stirling -pumpulla kierrätettävällä kaasulla tai peltier -elementillä, sillä toistuva nopea jäädytys aiheuttaisi laitevaurioita lämpörasitusten muodossa. Näiden menetelmien heikkoutena on niiden hitaus, sillä toimintalämpötilaan jäädyttäminen vie sekuntien sijaan minutteja. [13, s. 309–310]

Jäädyttämättömien ilmaisimien tekniikka kehittyy lähinnä signaalinkäsittelyn muodossa. Tehokkaammat prosessorit pystyvät paremmin erottamaan pieniäkin kontrastieroja signaalinkäsittelyllä. Jäädyttämättömät ilmaisimet tulevat tuskin koskaan syrjäyttämään jäädytetyjä ilmaisimia heikomman suorituskykynsä vuoksi, mutta niiden halvempi hinta mahdollistaa lämpökameroiden yleistymisen. [39, s. 59]

Infrapunasensorin näkemästä alueesta voidaan muodostaa kuvaa kolmella eri tekniikalla: Sarjapyyhkäisyllä, rinnakkaispyyhkäisyllä tai tuijottavalla elementillä [11, s. 138–139; 13, s. 309]. Sarjapyyhkäisevä ilmaisimien käyttää kahta peiliä mekaanisesti keilaamaan sensorin näkemää aluetta rivi kerrallaan. Sensorin näkökenttä koostuu useista ilmaisinkaistoista, joista ilmaisimen on jokainen pyyhkäistävä läpi rivi kerrallaan muodostaakseen kuvan. Sarjapyyhkäisevän ilmaisimen tuottama kuva on yleensä lomitettu, jolloin ilmaisinkaistojen väliin jää tyhjää. Nämä tyhjät välit pyyhkäistään kuvan seuraavalla päivityskierroksella. Täydellisen kuvan muodostamiseen tarvitaan siis kaksi koko ilmaisimen näkökentän kattavaa pyyhkäisyä, jolloin koko kuvan päivitystaajuus on puolet pyyhkäisytaajuudesta. Sarjapyyhkäisevän ilmaisimen etuna on ilmaisimen aukon pieni koko, vähäinen elektroniikan

tarve sekä kuvan tasaisuus. Sen heikkoutena on nopea pyyhkäisy aika, jolloin sensorin näkökentän yksittäistä pistettä ei voida tarkastella kuin lyhytaikaisesti sekä hienomekaniikasta johtuva heikko luotettavuus. Rinnakkaispyyhkäisy muistuttaa toteutukseltaan sarjapyyhkäisyä, mutta siinä käytetään vain yhtä peiliä heijastamaan ilmaisimen näkemää aluetta. Ilmaisimella kykenee yhdellä pyyhkäisyllä skannaamaan useamman ilmaisinkaistan. Sen etuna on hitaampi pyyhkäisy aika kuin sarjapyyhkäisevällä ilmaisimella, jolloin ilmaisimella kerää enemmän fotoneja tietyltä alueelta. Sensorin toimintaan tarvittavan elektroniikan määrä kuitenkin kasvaa ja kuva ei ole yhtä tasalaatuinen kuin sarjapyyhkäisevällä ilmaisimella toteutettuna. [11, s. 138–139]

Tuijottava ilmaisimella (engl. staring array tai focal plane array) koostuu useiden ilmaisinelementtien muodostamasta matriisista. Sensorin muodostaman kuvan tarkkuus riippuu elementtien määrästä ja koosta. Jokainen elementti tarkastelee yksittäistä pistettä sensorin näkökentästä, jolloin sensorin ei tarvitse mekaanisesti keilata. [11, s. 139] Eri elementtien ilmaisemien energiamäärien erot esitetään kaksikulotteisena kuvana, joka koostuu elementtien muodostamista pikseleistä [41, s. 2]. Tekniikan haittapuolena on ilmaisimen koon kasvaminen verrattuna pyyhkäiseviin ilmaisimiin [11, s. 139]. Ilmaisimella voi neliömäisen matriisin lisäksi muodostua myös ilmaisinelementtien muodostamasta rivistä tai jonosta. Tällainen ratkaisu vaatii elementin suuntausjärjestelmän, jotta se kykenisi tuottamaan vastaavanlaisen kuvan kuin neliömäinen ilmaisimematriisi. [41, s. 2] Ilmaisimematriisin yksittäiset elementit ovat harvoin ilmaisukyvyltään täysin yhdenmukaisia. Elementtien välisiä eroja on kuitenkin mahdollista korjata vahvistamalla signaaleja elektronisesti ja sen jälkeen poistaa poikkeavuuksia elementtien välillä. Rikkoutuneen elementin tuottama informaatio voidaan korvata laskemalla sitä ympäröivien elementtien signaalien keskiarvo. [20, s. 142]

Infrapunasensorin muodostaman kuvan tarkkuutta ja sitä kautta kohteen tunnistettavuutta voidaan parantaa muuttamalla etäisyyttä, polttoväliä tai ilmaisimematriisin elementtien määrää. Polttovälin kasvattaminen rajoittaa sensorin näkökenttää. Käytännössä sensorin fyysinen koko asettaa rajoituksen suurimmalle polttovälille. Polttoväliä voidaan kasvattaa esimerkiksi Cassegrain -heijastimilla, mutta tämän heikkoutena on heijastimen peilin aiheuttama negatiivinen vaikutus ilmaisimeen saapuvaan signaalin voimakkuuteen. Myöskään ilmaisimien kokoa ei voida pienentää määrättömästi. Ilmaisimen tulee teoriassa olla kooltaan vähintään kaksinkertainen suhteessa aallonpituuteen, mutta nykytekniikka ei mahdollista tämän teoreettisen rajan saavuttamista. [13, s. 296–297]

Infrapunasensorilla kohteen havaittavuuteen Johnsonin kriteerin tekijöiden lisäksi vaikuttaa mm. sen säteilymaksimi, ilmaisimessa käytettävä aallonpituus, ympäristön kohina, kontrasti sekä kohteen emissiivisyys. Kohteen emissiivisyydellä tarkoitetaan sen kykyä lähettää säteilyä tietyllä aallonpituudella [12, s. 146]. Ilmaisimatriisissa esiintyy sisäistä lämpökohinaa, joka heikentää siihen tulevaa signaalia. Lyhyillä aallonpituuksilla kohina on voimakkaampaa kuin pitkällä johtuen fotonien suuremmasta energiasta. Lämpökohinan vaikutusta voidaan kuitenkin pienentää jäädyttämällä ilmaisinta. [13, s. 298] Nykyaikaisilla ilmaisimilla ilmaisimen sisäinen kohina on kuitenkin niin vähäistä, että lopullinen ilmaisimen herkkyys määräytyy pääsääntöisesti taustakohinan mukaan [20, s. 142]

Emissiivisyys kuvaa kappaleen lähettämää säteilytehoa paremmin kuin teoria mustan kappaleen säteilystä, sillä lämpötehoon vaikuttaa lämpötilan lisäksi sen materiaali. Emissiivisyys kuvaa kappaleen säteilytehon suhdetta mustaan kappaleeseen. Reflektiivisyys eli materiaalin heijastavuus kuvaa kappaleen kykyä heijastaa ympäristöstä tulevaa säteilyä. Suuren reflektiivisyyden omaava kappale säteilee itsessään vähän. Tällainen kappale voi kuitenkin erottua helposti kuvattaessa infrapunasensorilla, sillä refleктоiva kappale voi heijastaa esimerkiksi kylmyyttä ja siten erottua taustasta. [13, s. 301] Maalin reflektiivisyyttä voidaan pienentää esimerkiksi erikoismaalauksella. Merellisessä toimintaympäristössä perinteinen maali heijastaa noin 60 % auringon säteilystä, kun taas esimerkiksi Yhdysvaltojen laivaston käyttämä harmaa häivemaali heijastaa vain noin 5–10 % auringon säteilystä. [40, s. 53] Kohteella on oltava riittävän suuri lämpökontrasti sen havaitsemiseksi. Jos kontrasti on liian pieni, maali ei erotu taustasta, vaikka sen säteily saavuttaisikin sensorin ilmaisimen. Lämpökontrastiin vaikuttavia tekijöitä ovat etäisyys sekä väliaineen vaimennuskerroin [13, s. 301–303].

Infrapunasensorin suurinta havaintoetäisyyttä voidaan arvioida yksinkertaistetulla infrapunaetäisyyskaavalla, joka on esitetty kaavassa 1 [11, s. 146]:

$$R = \sqrt{\frac{F\sigma(\epsilon_t T_t^4 - \epsilon_e T_e^4) A_{tgt} A_e}{4\pi S_{min}}} \quad (1)$$

$R$  = suurin havaintoetäisyys,  $F$  = taajuuskaistakerroin,  $\sigma$  = Stefan-Boltzmannin vakio,  $\epsilon_t$  ja  $\epsilon_e$  = maalin ja ympäristön emissiivisyys,  $T_t$  ja  $T_e$  = maalin ja ympäristön lämpötila,  $A_{tgt}$  ja  $A_e$  = maalin ja sensorin apertuurin pinta-ala ja  $S_{min}$  = sensorin herkkyydestä riippuva pienin havaittava signaali. [11, s. 146]

Infrapunailmaisimissa kehitystä tulee tapahtumaan lähinnä signaalin käsittelyssä. Signaalinkäsittelyllä mahdollistetaan tarpeettoman tiedon suodatus, maalien ilmaisu taustakohinasta sekä ilmaisimatriisin modulaarisuus, jolloin sillä voidaan samanaikaisesti suorittaa useampia tehtäviä. Ilmaisimateriaalit kehittyvät mahdollistaen entistä homogeenisemmat matriisin elementit, jolloin tarve yksittäisten elementtien tuottamien signaalien yhdenmukaistamiselle vähenee. [20, s. 143]

Infrapunahakupäät keräävät maalin emittoimaa lämpösäteilyenergiaa. Ne havaitsevat maalin vain, jos maalin lämpökontrasti suhteessa taustaan on riittävän suuri. Ohjusten hakupäät mittaavat yleensä termistä infrapuna-alueetta, joka rajoittuu aallonpituuksille 3–14  $\mu\text{m}$ . Vanhimmat infrapunahakupäät toimivat lähi-infrapuna-alueella. Tällä alueella toimivien hakupäiden toimintaa häiritsee auringon säteily sekä sen aiheuttamat heijastukset. Näitä uudemmat järjestelmät toimivat keski-infrapuna-aallonpituusalueella, jolloin auringon säteilyn vaikutus on merkittävästi pienempi ja aallonpituusalue on sama kuin esimerkiksi lentokoneiden moottoreiden säteilymaksimi. Keski-infrapuna-alueella toimivat hakupäät vaativat jäähdystä, joka toteutetaan yleensä paineilmalla, typellä tai argonilla. [12, s. 299]

Nykyaikaiset infrapunahakupäät hyödyntävät yleensä kahta eri aallonpituusalueetta, jolloin ne eivät ole niin herkkiä ilmassa esiintyville vaimentaville tekijöille, kuten esimerkiksi savulle tai sumulle. [12, s. 299] Joissain hakupäissä on yhdistetty infrapuna- ja ultravioletti-ilmaisimien suodattamaan soihtuja ja muita häirintälähteitä [33]. Kahdella eri aallonpituusalueella toimivat hakupäät kykenevät suodattamaan pois esimerkiksi hakupään harhauttamiseen käytettäviä soihtuja. Tällaisessa ns. kaksivärihakupäessä on yhteinen optiikka, mutta eri aallonpituuksille on omat ilmaisimet. Kaksivärihakupään herkkyys on pienempi kuin vastaavan kokoisien yhden aallonpituuden hakupään, sillä sen ilmaisimen pinta-ala on jaettu kahteen osaan. [12, s. 299; 13, s. 308] 3–5  $\mu\text{m}$  aallonpituudella toimivat ilmaisimet eivät välttämättä ilmaise sellaista maalia, jonka lämpötila on lähellä taustan lämpötilaa. Tällöin esimerkiksi kohti lentävä lentokone voi jäädä siltä havaitsematta. Lisäksi savu ja pöly vaikuttavat heikentävästi niiden suorituskykyyn. 8–12  $\mu\text{m}$  aallonpituudella toimivat ilmaisimet läpäisevät paremmin ilman epäpuhtauksia, mutta ilmankosteuden aiheuttama absorptio vaimentaa merkittävästi kyseisen alueen säteilyn etenemistä. [13, s. 83] Kaukoinfrapuna-alueella toimivan hakupään suorituskyky on noin 60 % parempi kuin keski-infrapuna-alueen hakupään seurattaessa lähellä taustan lämpötilaa olevia maaleja [18, s. 378–379]

Infrapunahakupäät aistivat pistemäisiä herätteitä, joista ne päättelevät maalin sijainnin hakupään suhteen moduloimalla signaalia. Vanhoissa infrapunahakupäissä modulointi tapahtuu asettamalla hakupään eteen pyörivä rakolevykiekko eli retikkeli tai tekemällä hakupään optiikkaosa pyöriväksi. [10, s. 41; 11, s. 138; 13, s. 311] Retikkeli pilkkoo signaalin pulsseiksi, joista voidaan määrittellä signaalin vaihe ja amplitudi [42, s. 13]. Signaalin taajuus moduloituu sitä enemmän, mitä suurempi on hakupään pituusakselin ja maalin välinen kulma. Retikkeliä käytettäessä signaali ei moduloitu maalin ollessa ohjuksen tähtäyslinjalla. Hieman uudemmissa kartiokeilaavissa hakupäissä modulointi toteutetaan pyörivällä optiikalla, jolloin moduloitua signaalia saadaan myös maalin ollessa tähtäyslinjalla. Tällöin vältetään ohjuksen vaappuminen puuttuvan modulaation johdosta. [13, s. 311; 42, s. 15] Hakupäiden optiikan edessä käytetään yleensä suodattimia, joiden tehtävänä on suodattaa ei-toivottu infrapunäsäteily, kuten esimerkiksi taustan ja auringon emittoima säteily [33].

Uusimmat infrapunahakupäät ovat ns. kuvantavia infrapunahakupäitä, jotka kykenevät tunnistamaan ja jopa yksilöimään kohteen. [10, s. 40; 13, s. 373]. Kuvantavissa infrapunahakupäissä maalin havaitseminen toteutetaan ilmaisimatriisilla, jossa sensorin kuva muodostetaan sähköisesti pyyhkäisytekniikalla tai tuijottavilla ilmaisimilla kokonainen kuva kerrallaan. Pyyhkäisytekniikkaa käyttävissä ilmaisimissa keilataan peilien avulla yhtä matriisin riviä kerrallaan. Niissä on yleensä laajempi katselukulma kuin tuijottavissa hakupäissä, mutta niiden herkkyys on huonompi johtuen lyhyemmästä ilmaisujasta. [10, s. 40; 11, s. 138; 18, s. 373] Vanhimmat kuvantavat infrapunahakupäät ovat ns. pseudo-kvantavia ja niiden toiminta perustuu kiinteän ilmaisimen mekaaniseen liikuttamiseen maalin ympärillä. Ilmaisimeen muodostettava kuva ja maalin paikka lasketaan ilmaisun ajankohtien perusteella. [18, s. 374]

Ilmaisimatriisiin perustuvalla hakupäällä on yleensä perinteistä retikkelihakupäätä suurempi katselukulma. Se seuraa maalia perustuen maalin ja taustan väliseen kontrastieroon. Hakupää kykenee laajan katselukulmansa ansiosta huomioimaan taustan, jolloin sillä on retikkelihakupäätä parempi kyky suodattaa harhamaaleja sekä tunnistaa useita maaleja näkökentässään. [43] Hakupään seurain tunnistaa oikean maalin matriisin ilmaisemasta pikselikuviosta sen muodon perusteella [44, s. 44–46].

Kvantavan hakupään toiminta perustuu seuraimen (engl. tracker) ja ilmaisimeen [44, s. 44–46]. Seuraimet voidaan jakaa portiseuraimiin (engl. gated-video tracker) ja korrelaatioseuraimiin (engl. correlation tracker). Portiseurain muodostaa reunuksen eli portin seurattavan maalin ympärille ja hylkää seurannasta kaikki portin ulkopuolella tapahtuvat

energian muutokset. Portti on muodoltaan suorakaide tai se voi mukailla maalin siluettia. Portin koko säädetään havaitun maalin kokoiseksi ja maalin ympärille lisätään pieni puskurivyöhyke. Seurannan korjaamiseksi seurain muodostaa virhesignaaleja perustuen seurannassa olevan maalin keskipisteeseen sekä referenssipisteeseen. Referenssipiste voi olla joka esimerkiksi ilmaisimen näkökentän keskipiste tai kulmapiste. Virhesignaalien perusteella hakupään seurain pyrkii pitämään portissa olevan maalin ilmaisimen näkökentän keskikohdassa. Korrelaatioseurain vertaa hakupään näkemää kuvaa ennalta muistiin syötettyyn referenssikuvaan. Referenssikuva voi olla joko dynaaminen, jolloin sen koko suhteutetaan ohjuksen etäisyyteen maalista tai staattinen. Referenssikuvasta muodostetaan korrelaatiopinta, jonka suhteen hakupää saa virhesignaaleja samaan tapaan kuin porttiseurannassa. Korrelaatiota voidaan toteuttaa vertaamalla hakupään näkemää maalia ja referenssikuvaa joko ympäristön tai taajuuden suhteen. [41, s. 2]

Hakupään toiminta voidaan jakaa kolmeen vaiheeseen. Ensimmäisessä vaiheessa sen tehtävänä on ilmaista maali. Maalin ilmaisuun riittää yksikin pikseli. Tässä vaiheessa hakupään haasteena on löytää maali kohinan joukosta. Ohjuksen nopeasta liikkeestä aiheutuva aerodynaaminen lämpeneminen aiheuttaa merkittävän määrän lämpökohinaa hakupään ilmaisimeen. Toisessa vaiheessa maali otetaan seurantaan ja sitä verrataan mahdollisiin harhamaaleihin sekä harhautus- ja häirintätoimenpiteisiin. Viimeksi mainituilla on tarkoituksena houkutellessa ohjus irti maalista tai häiritä hakupään ilmaisimen toimintaa. Soihduilla harhautetaan ohjusta luomalla maaleja, joiden säteilytaso on oikeaa maalia suurempi. Hakupää voi tunnistaa soihdun harhamaaliksi sen fyysisen koon ja muodon mukaan. Se suorittaa korrelaatioseurainta, jossa soihdun muotoa ja kokoa verrataan aiemmin seurattun maalin muotoon ja kokoon. Jos muoto ja koko ei täsmää, maali hylätään. Perinteinen soihtu on kooltaan varsin pieni ja sen säteily kohdistuu pääosin yhden pikselin alueelle hakupäässä. Heitteen muodostamaa säteilyä voidaan levittää laajemmalle alueelle käyttämällä nopeasti oksidoituvia foliokappaleita, jotka muodostavat nopeasti infrapunaherätettä suurelle alueelle. Herätteen muoto tosin pitäisi saada vastaamaan alkuperäistä maalia, jotta ohjus voitaisiin houkutellessa väärään suuntaan. Hakeutumisen viimeisessä vaiheessa maali on hyvin lähellä, jolloin hakupään ilmaisimatriisilla ilmaistaan maalista hyvin paljon pikseleitä. Tässä vaiheessa hakupään tulee tunnistaa maalista haluttu osumakohta ja ohjata ohjus siihen. [44, s. 44–46]

Tulevaisuudessa infrapunahakupään rinnalle kehitetään yhdistelmähakupäitä, joissa yhdistetään infrapuna- ja millimetrialueen tutkahakupää. Tällaisella ratkaisulla pyritään parantamaan infrapuna-alueen hakupäiden joka sään suorituskykyä. Vesi- ja lumisade



vaikuttaa molempien hakupäätyyppien suorituskykyyn heikentävästi, mutta pilvet ja sumu eivät juuri vaimenna millimetrialueella toimivaa tutkaa. [15, s. 95] Millimetrialueen tutkaa suositaan toisena hakupäävaihtoehtona sen mahdollistaman pienen koon vuoksi.

### 3.1.3. Häirittävyys

Soihdut ovat omasuojaheitteitä, jotka säteilevät voimakkaasti infrapuna-alueella. Niiden tarkoituksena on luoda itsestään ohjukselle oikeaa maalia voimakkaampi signaali ja estää siten ohjuksen lukkiutuminen suojattavaan kohteeseen. Soihdulla tulee olla riittävä intensiteetti hakupään aallonpituusalueella, jotta se erottuu oikeasta maalista sekä riittävän pitkä palo aika, jotta hakupää ei ehdi uudelleen lukittua oikeaan maaliin. Suurin osa soihdun energiasta on aallonpituudeltaan alle 2  $\mu\text{m}$  eli tyypillisten hakupäiden käyttämien läpäisyikkunoiden ulkopuolella. Tämä johtuu siitä, että soihtujen tulee palaa mahdollisimman kuumana, jotta ne säteilisivät riittävästi myös muilla aallonpituuksilla. [13, s. 437; 42, s. 17–18]

Kuvantava infrapunahakupää kykenee väistämään soihtujen vaikutusta tietyin rajoituksin. Porttiseurantaan perustuvalla hakupäällä soihdut suodatetaan pois kuvasta, mikäli niitä havaitaan seurantaportin ulkopuolella. Korrelaatioseurain suodattaa soihtuja perustuen niiden kokoon ja muotoon. Soihtuja voidaan erotella maalista tunnistamalla niiden aiheuttama nopea ja voimakas säteilyn intensiteetin kasvu, nopea liike ilmaisimen näkökentässä tai kaksivärihakupäällä vertailemalla kahden eri taajuusalueen ilmaisimen kuvaa keskenään. [41, s. 3–4] Soihtuilla toteutettuna kuvantavan hakupään tehokas harhauttaminen edellyttää soihtujen käyttöä siten, että niiden aiheuttama maalin intensiteetin ja koon muutos tapahtuu aivan seurantaportin reunalla. Tällöin hakupää voi erehtyä siirtämään maaliseurannan keskipistettä soihtujen mukaan. Toinen vaihtoehto on maalin peittäminen kokonaan soihtuilla riittävän pitkäksi ajaksi, jolloin hakupää ei enää kykene seuraamaan alkuperäistä maalia. [41, s. 7]

Kartiokeilaavia hakupäitä ja retikkelihakupäitä vastaan voidaan käyttää häirintälähtimiä, jotka tuottavat kohteena olevan hakupään aallonpituusalueella häirintäsignaalia, jonka amplitudia ja vaihetta moduloidaan hakupäiden harhauttamiseksi [42, s. 18]. Moduloitu häirintäsignaali ei tehoa tuijottavia ilmaisimia vastaan, vaan ne pikemminkin lisäävät maalin ilmaisun todennäköisyyttä. Tuijottavaa ilmaisinta vastaan ainoa keino on sensorin ilmaisimen elementtien tuhoaminen sokaisemalla tai koko ilmaisimatriisin tukkiminen. Häirintä toteutetaan valaisemalla hakupäätä niin suurella teholla, että hakupään optiikasta siroava

säteily sokaisee elementin. Tämän seurauksena hakupää ei kykene hakeutumaan häirintään, sillä se havaitsee säteilyä joka puolelta. [13, s. 430–434]. Kuvantavia infrapunahakupäitä käyttäviä ohjuksia vastaan voidaan käyttää suunnattuja häirintälähtimiä (engl. Directed Infrared Countermeasures, DIRCM), jotka perustuvat hakupään häirintään, sokaisuun tai tuhoamiseen suunnatulla lasersäteellä. Järjestelmän käyttö vaatii laserin lisäksi ohjusvaroitusta ja seurantajärjestelmät. [36, s. 91] Pyyhkäiseviä infrapunasensoreita vastaan voidaan käyttää infrapunahäirintälähetintä, jonka lähetettä moduloidaan ohjaussignaalin avulla, jolloin ohjuksen hakupään sensori ilmaisee maalin väärin. Häirintäsignaalilla pyritään pienentämään sensorin maalista mittaamaa signaali-kohina -suhdetta. Häirintäsignaali toteutetaan xenon -lampulla tai infrapunalaserilla. DIRCM -järjestelmät ovat yleistyneet erityisesti lentokoneissa, mutta aluksissa ohjustorjuntaan suunnitellut häirintäjärjestelmät ovat toistaiseksi harvinaisia [36, s. 91].

Häirintämenetelmänä laserin etuna heitteisiin verrattuna on nopea reaktioaika sekä välitön vaikutus heti laukaisusta, sillä ammuksen lento- ja syttymisaikaa ei tarvitse huomioida [45, s. 437]. Kiinalaisessa tutkimuksessa mallinnettiin kuvantavalla infrapunahakupäällä varustetun ohjuksen osumista maaliin sekä simuloitiin laserhäirinnän vaikutusta ohjuksen osumatodennäköisyyteen. Ilman häirintää ohjuksen osumatodennäköisyys oli 0,789. Häirintä pudotti ohjuksen osumatodennäköisyyttä etäisyyden funktiona ja sen heikentävä vaikutus osumatodennäköisyyteen 2–10 km:n häirintäetäisyyksillä oli noin 77–99 %. Yli 3 km:n häirintäetäisyyksillä osumatodennäköisyys heikkeni yli 90 %. Tutkimustuloksissa korostettiin optimaalisen häirintäetäisyyden merkitystä. Jos häirintäetäisyys on liian pieni, ohjus ei ehdi harhautua riittävästi. Jos häirintäetäisyys taas on liian suuri, laserin energia ei riitä tehokkaaseen häirintään. [45, s. 437–443] Toisen kiinalaisen tutkimuksen mukaan infrapunahakupään vaurioittamiseen vaadittava tehotiheys on noin  $80 \text{ W/cm}^2$ . Tehtyjen simulaatioiden perusteella arvioitiin, että riittävän suuri tehotiheys  $1,06 \mu\text{m}$ :n taajuisella laserilla esimerkiksi 5 km:n päästä saavutetaan mikäli laserin teho noin  $1\,200 \text{ W}$ . [46, s. 1–7]

## 3.2. Tutkahakupää

### 3.2.1. Radiotaajuinen säteily

Radiotaajuinen säteily on taajuudeltaan pientä ja aallonpituudeltaan suurta sähkömagneettista säteilyä. Radiotaajuinen säteily voidaan karkeasti jakaa kahtia radioaaltoihin ja mikroaaltoihin. Lisäksi se jaetaan taajuuden mukaan kaistoihin. Tutkan taajuuskaistojen

jaottelussa on käytössä ITU:n ja NATO:n määrittelemät kaksi eri standardia. Tässä tutkimuksessa käytettävät taajuuskaistojen jaottelut on esitetty liitteen 1 taulukoissa 2 ja 3. Radioaaltoja käytetään pääasiassa viestiliikenteeseen ja navigointiin. Radioaaltojen taajuuskaista keski- ja yläpäättä hyödynnetään myös ennakkovaroitustutkajärjestelmissä. UHF -aluetta käytetään myös pitkän kantaman valvontatutkissa. Mikroaaltoja käytetään datalinkeissä sekä tutkissa. EHF -aluetta kutsutaan myös millimetrialueeksi, johtuen sen aallonpituudesta. Millimetrialueen tutkat ovat lähinnä ohjusten ja ammusten hakupäitä. Millimetrialueella ilmakehän aiheuttama vaimennus on voimakasta verrattuna muuhun mikroaaltoalueeseen. Millimetrialueen tutkat hyödyntävät vastaavanlaisia läpäisyikkunoita kuin infrapunasensorit. [13, s. 61–65]

Desibeliä käytetään tekniikassa tehosuureiden sekä niihin liittyvien tekijöiden, kuten esimerkiksi vahvistus- ja vaimennustekijöiden, ilmaisuun. Desibeli ei itsessään kerro mitään tehoarvoa, vaan se on vertailuyksikkö. Yleisesti käytettyjä yksiköitä ovat dBW ja dBm, joiden vastaavat vertailutehot ovat 1 W ja 1 mW. Desibeliä käytetään kuvaamaan myös tehosuureiden muutoksia, kuten esimerkiksi signaalin voimistumista tai vaimenemista. Desibeli on yksikkönä logaritminen, jolloin esimerkiksi 3 dB:n kasvu tarkoittaa signaalitehon kaksinkertaistumista ja 10 dB:n kasvu signaalitehon kymmenkertaistumista. [36, s. 171]

Tutkasäteilyn etenemiseen vaikuttaa erilaiset etenemisilmiöt. Mikroaallot heijastuvat ja siroavat maan- tai merenpinnasta. Troposfäärin eli ilmakehän alimman kerroksen epähomogeenisen rakenteen vuoksi aallot voivat kaartua ja kanavoitua. Ilmakehän sisältämät kaasut vaimentavat säteilyä ja ilmakehän kosteus aiheuttaa vaimennusta ja sirontaa. Etenemisilmiöiden vuoksi tutkasäteily on eri reittejä kulkeneiden aaltojen summa. Erilaiset etenemisilmiöt vaikuttavat tutkan kantamaan ja suunnan sekä etäisyyden mittaustarkkuuteen. Maalista heijastuneet aallot voivat heijastua uudelleen esimerkiksi merenpinnasta ennen päätymistään tutkan vastaanottimeen. Tällöin maalista suoraan heijastuneen ja merenpinnasta heijastuneen aallon kulku-aika on eripituinen, jolloin se vaikuttaa tutkan etäisyyden mittaamiseen. Ilmiötä kutsutaan monitie-etenemiseksi. Monitie-eteneminen aiheuttaa radiotaajuisessa säteilyssä myös vaihesiirtoa, joka voi vahvistaa tai heikentää vastaanotettujen aaltojen sähkökentän voimakkuutta. [47, s. 47–48]

Tutkataajuisten aaltojen pääsääntöinen etenemistapa on näköyhteysreitti. Aallon eteneminen tapahtuu lähes vapaassa tilassa taipuen hieman maanpinnan suuntaisesti. Taipuminen johtuu ilmakehän taitekertoimen muuttumisesta. Taipumisesta eli diffraktiosta johtuen radiohorisontti on hieman optista horisonttia kauempana. Radiohorisontti kilometreinä

voidaan määrittää kaavalla 2, johon sijoitetaan vakion lisäksi antennin korkeus tai yhteysväliä määritettäessä lähetys- ja vastaanottoantennien korkeudet ( $h_t$  ja  $h_r$ ) metreinä. [13, s. 75–76]

$$R_{km} = 4,12(\sqrt{h_t} + \sqrt{h_r}) \quad (2)$$

### 3.2.2. Tutka

Tutka on laite, joka lähettää ja suuntaa sähkömagneettista säteilyä. Kohteesta heijastunut säteily vastaanotetaan ja sen perusteella määritetään maalin suunta ja etäisyys. Tutkan tehtäviä ovat maalin ilmaisu, etäisyyden määrittäminen, suunnan määrittäminen sekä maalin nopeuden arviointi. Suunta- ja etäisyystietojen avulla voidaan määrittää maalin kaksikulotteinen paikka. Jotkut valvontatutkat ovat niin sanottuja 3D -tutkia, jotka mittaavat maalin suuntiman ja etäisyyden lisäksi myös sen korkeuden. Maalin nopeuden tutka määrittää dopplertaajuuden avulla. [13, s. 173–175]

Doppler -ilmiö tutkatekniikassa perustuu maalin ja vastaanottimen väliseen liikkeeseen. Mikäli maali ja vastaanotin liikkuvat toistensa suhteen, poikkeaa vastaanotetun signaalin taajuus lähetetystä taajuudesta dopplertaajuuden verran. Taajuuden muutos on joko positiivista tai negatiivista riippuen siitä, liikkuuko maali kohti vai loittoneeko se vastaanottimesta. Taajuusmuutos on verrannollinen maalin säteittäiseen nopeuteen. [47, s. 21–22] Jos maali liikkuu kohtisuoraan vastaanottimeen nähden, taajuusmuutosta ei tapahdu. Dopplertaajuus  $f_d$  voidaan laskea kaavalla 3, jossa  $v_r$  = säteittäinen nopeus ja  $\lambda$  = aallonpituus [47, s. 22].

$$f_d = \frac{2v_r}{\lambda} \quad (3)$$

Edellisellä kaavalla kyetään laskemaan ainoastaan säteittäinen nopeus. Maalin todellinen nopeus voidaan laskea, mikäli tiedetään maalin paikka ja nopeusvektorin suunta vastaanottimeen nähden. [47, s. 22] Nämä tekijät voidaan määrittää pulssitutkalla mittaamalla maalin paikka kahdesti, jolloin nopeusvektori on sama kuin kahden perättäisen kaiun välinen suunta.

Tutkat voidaan jaotella useilla eri tavoilla, kuten esimerkiksi toimintaperiaatteen, käyttötarkoituksen tai antennien sijoittelun mukaan [13, s. 174; 47, s. 16]. Toimintaperiaatteen mukaan tutkat voidaan jakaa pulssitutkiin ja kantoaalto- eli CW -tutkiin. Kantoaalto- eli CW -tutkalla

kyetään mittaamaan vain maalin nopeus, mutta ei etäisyyttä. Taajuusmoduloidulla kanta-aaltotutkalla voidaan mitata myös etäisyys. [47, s. 16–21] Käyttötarkoituksen mukaan jaoteltuja tutkia ovat esimerkiksi valvonta-, tulenjohto- sekä tässä tutkimuksessa käsiteltävät hakupäättutkat. Antennien sijoittelun perusteella tutkat jaetaan mono-, bi- ja multistaattisiin tutkiin. Monostaattisessa tutkassa lähetin- ja vastaanottoantennit sijaitsevat samassa tilassa. Monostaattisessa tutkassa voi olla yhdistetty antenni tai erilliset antennit lähetykselle ja vastaanotolle. Bistaattisessa tutkassa lähetin- ja vastaanotinantennit sijaitsevat eri paikoissa. Multistaattisessa tutkassa voi olla useita lähetin- ja vastaanotinantenneja eri paikoissa. Käytännön sovellutus bistaattisesta tutkasta on puoliaktiivinen ohjusjärjestelmä. Puoliaktiivinen ohjus hakeutuu maalinosoitustutkan lähettämään säteilyyn, joka heijastuessaan maalista vastaanotetaan ohjuksen hakupään tutkavastaanottimella. [13, s. 174] Tutkat voidaan antennien keilauksen perusteella jakaa mekaanisesti tai elektronisesti keilaaviin tai näiden yhdistelmiin. Mekaaninen keilaus voidaan toteuttaa usealla eri tavalla riippuen tutkan käyttötarkoituksesta. Elektroninen keilaus vaatii vaiheohjatun antennin, jolloin keilan suuntaa ohjataan antennielementtien lähetystä vaiheistamalla. Mekaanisen ja elektronisen keilauksen yhdistelmä voidaan esimerkiksi toteuttaa keilaamalla sivusuunnassa mekaanisesti pyörivällä antennilla ja korkeussuunnassa elektronisesti. [13, s. 174–175]

Vaiheohjatussa antenniryhmässä voidaan keilan suuntaa tai suuntakuviota muokata säätämällä antennielementtien suhteellista vaihetta. Antennia kutsutaan antenniryhmäksi, sillä se koostuu useista antennielementeistä ja koko tutkan toiminta perustuu antennielementtien yhteistoimintaan. Antenniryhmä voi olla joko aktiivinen tai passiivinen. Aktiivisessa antenniryhmässä jokaisessa antennielementissä on oma lähetin-vastaanotin. Passiivisessa antenniryhmässä on oma erillinen lähetin, jonka tuottama lähetysteho jaetaan eri elementeille. Vaiheohjattu antenniryhmä mahdollistaa nopean keilauksen, sillä se ei ole riippuvainen mekaanisesti keilaavan antennin pyörintänopeudesta. Antenniryhmä mahdollistaa myös useat samanaikaiset, toisistaan riippumattomat, seurantakeilat, jolloin voidaan samanaikaisesti seurata useita maaleja. Tämä vaikeuttaa tutkan tiedusteltavuutta, sillä tutkan tyyppiä ei kyetä pääättelemään antennin suuntakuviosta. Vaiheohjatun antenniryhmän pienet sivukeilatason vaikeuttavat häirintää. Antenniryhmä voi keilata muokkaamalla eri antennielementtien lähettämän signaalin vaihetta tai taajuutta. Taajuutta hypytettäessä on muokattava myös vaihetta, jotta keilan suunta pysyisi samana. Antenniryhmä on myös toimintavarma ratkaisu, sillä yksittäisten elementtien rikkoutuminen ei estä tutkan käyttöä. [47, s. 225–234] Antenniryhmän heikkoutena on tyyppillisesti suuri koko ja kallis hinta.

Pulssitutkan perusosat ovat lähetin, vastaanotin, duplekseri eli lähetin-vastaanotin-kytkin, antenni, ilmaisain, näyttölaite sekä ajastin. Ajastin aktivoi pulssigeneraattorin, joka luo korkeajännitteisen pulssin lähettimeen. Samanaikaisesti ajastin aktivoi tutkan etäisyydenmittauksen. Lähettimestä pulssi kulkee duplekserin ja antennin kautta taivaalle. Duplekserin tehtävä on estää lähetyspulssin päätyminen vastaanottimeen. Antenni vastaanottaa kohteesta heijastuneen kaikipulssin ja ohjaa sen duplekserin kautta vastaanottimelle, joka ilmaisee maalin. Vastaanottimen jälkeen pulssin kulkee sekoittimeen ja välitaajuusvahvistimeen, joiden avulla estetään muiden kuin sopivalla välitaajuudella olevien pulssien vastaanottaminen. Vastaanotin ilmoittaa tutkan etäisyydenmittaukselle pulssin tuloajan, jonka perusteella voidaan laskea pulssin kulkuaika ja sitä kautta maalin etäisyys. Antennikoneisto määrittää vastaanotetun pulssin suuntatiedon, jolloin havaittu maali voidaan ilmaista demoduloinnin jälkeen näyttölaitteella mitatun suunnan ja etäisyyden funktiona. [13, s. 176–177; 47, s. 28]

Tutka erottelee samassa keilassa olevat maalit etäisyyden suhteen jakamalla keilan etäisyysalkioihin eli etäisyysportteihin, joiden koko on riippuvainen käytetystä pulssin pituudesta. Mikäli kaksi maalia on samassa etäisyysportissa, ne ilmastaan yhtenä maalihavaintona. [47, s. 29] Tutkan erottelukykyyn kulmasuunnassa vaikuttaa antennin keilan leveys. Maalit voidaan erotella, mikäli ne sijaitsevat vähintään keilan leveyden päässä toisistaan eivätkä siis mahdu samaan antennikeilaan. Kulmaerottelukyky on riippuvainen mittausetäisyydestä, sillä antennin keila on muodoltaan sektori, jolloin keilan fyysinen leveys kasvaa mittausetäisyyden kasvaessa. [47, s. 42] Keilan leveys vaikuttaa myös maalin valaisuaikaan. Kapea keila osoittaa kohti maalia lyhyemmän ajan kuin leveä keila, jonka seurauksena maalista heijastuu vähemmän integroitavia kaikipulseja. Maalin valaisuaikaan vaikuttaa keilan leveyden lisäksi myös mekaanisesti keilaavan antennin keilaus- tai pyörimisnopeus. [47, s. 166]

Tutkayhtälön avulla voidaan arvioida tutkan suorituskykyä eri toimintaparametrien avulla. Siitä voidaan käyttää pelkistettyä muotoa, jota voidaan tarkentaa lisäämällä erilaisia häviöitä, maalin ominaisuuksia ja integrointia. [47, s. 35] Tutkan maksimikantamaa voidaan laskea kaavassa 4 esitetyn pelkistetyn tutkayhtälön avulla,

$$R_{max} = \sqrt[4]{\frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 P_r min}} \quad (4)$$

missä  $R_{max}$  on tutkan teoreettinen suurin kantama,  $P_t$  on lähetysteho,  $G$  on antennin vahvistus,  $\lambda$  on aallonpituus,  $\sigma$  on maalin pinta-ala ( $m^2$ ) ja  $P_{r\ min}$  on pienin vastaanotettavissa oleva teho, jolla maali havaitaan. [13, s. 176] Antennin vahvistuksella tarkoitetaan antennin suuntaamaa säteilyä haluttuun suuntaan ja maalin pinta-alalla sitä pinta-alaa, josta isotrooppisesti eli kaikkiin suuntiin heijastuvasta säteilystä siepataan kaikki teho. [47, s. 36–37] Pelkistetty tutkayhtälö ei kuitenkaan ota huomioon järjestelmän omia häviöitä, ilmakehän vaimennusta, järjestelmän sisäistä kohinaa, signaali-kohina -suhdetta eikä pulssin pituutta. Nämä tekijät huomioimalla kaavassa 5 esitetyksi laajemmaksi tutkayhtälöksi saadaan: [13, s. 181]

$$R_{max} = \sqrt[4]{\frac{P_t G^2 \lambda^2 \tau \sigma L_{sys} L_{atm}}{(4\pi)^3 k T_{sys} SNR_{min}}} \quad (5)$$

Tässä yhtälössä on pelkistetyn tutkayhtälön lisäksi tekijät:  $\tau$  = pulssin pituus,  $L_{sys}$  ja  $L_{atm}$  = järjestelmän ja ilmakehän häviöitä,  $k$  = Boltzmannin vakio,  $T_{sys}$  = järjestelmän kohinalämpötila sekä  $SNR_{min}$  = pienin signaali-kohina -suhde. [13, s. 181] Tutkayhtälön perusteella voidaan todeta, että tutkan kantamaa voidaan kasvattaa lisäämällä lähetystehoa, antennin vahvistusta sekä pulssin pituutta tai vähentämällä järjestelmän häviöitä ja kohinalämpötilaa sekä pienentämällä pienintä sallittua signaali-kohina -suhdetta. [13, s. 181] Vastaanottimeen muodostuu kohinaa esimerkiksi lämpökohinasta, kosmisesta kohinasta sekä vastaanottimen sisäisestä lämpökohinasta [47, s. 38].

Tutkan suurimpaan mittausetäisyyteen vaikuttaa sen käyttämä pulssintoistoväli, sillä pulssitutkalla pyritään vastaanottamaan edellinen pulssi ennen uuden lähettämistä. Pulssintoistoväli eli lähetettävien pulssien välinen aika on siis määriteltävä niin pitkäksi, että tutka ehtii vastaanottamaan edelliset pulssit halutulta suurimmalta mittausetäisyydeltä ennen uuden lähettämistä. Tällöin puhutaan yksikäsitteisestä mittausetäisyydestä. Hyvissä olosuhteissa pulssi voi kuitenkin heijastua suurinta yksikäsitteistä mittausetäisyyttä kauempaa, jolloin sen etäisyys ilmaistaan tutkassa virheellisesti liian lähellä. [47, s. 43] Tällaisesta tilanteesta käytetään nimitystä jaksontakainen kaiku. Jaksontakaisia kaikuja voidaan suodattaa hypyttämällä pulssintoistotaajuutta, joka on pulssintoistovälin käänteisluku. Pulssintoistotaajuuden hypytys voidaan toteuttaa harituksella (engl. stagger) tai värinällä (engl. jitter) [47, s.195–196]. Pulssintoistotaajuuden hypytyksellä myös vaikeutetaan häirintää, sillä häiritsijä ei kykene ennakoimaan oikeaa pulssintoistoväliä eikä siten voi kohdistaa häirintäänsä oikea-aikaisesti.

Tutkalla havaittavien kohteiden havaittavuutta kuvataan käsitteellä tutkapoikkipinta-ala (engl. Radar Cross Section, RCS) [38, s. 455]. Tutkayhtälössä maalin tutkapoikkipinta-ala on yksinkertaistettu ja se oletetaan isotrooppiseksi säteilijäksi, joka säteilee tasaisesti kaikkiin suuntiin. Todellisuudessa näin ei kuitenkaan ole vaan säteilyn siroaminen maalista riippuu merkittävästi maalin tutkapoikkipinta-alaan vaikuttavista ominaisuuksista. Tutkapoikkipinta-ala määrittää maalin projektiopinta-alan, heijastavuuden sekä suuntaavuuden tuloksi. Projektiopinta-alalla tarkoitetaan sitä pinta-alaa, jona maali näkyy tutkan suuntaan, heijastavuudella sironneen tehon suhdetta lähetettyyn vastaanotettuun tehoon ja suuntaavuudella sironnutta tehoa kulmayksikköä kohti. Yleisesti ottaen voidaan todeta, että todelliselle kohteelle, kuten esimerkiksi alukselle, on vaikeaa määrittää tutkapoikkipinta-alan arvoa, sillä sen suuruus riippuu hyvin voimakkaasti tarkasteltavasta suunnasta sekä käytettävästä taajuudesta ja polarisaatiosta. [47, s. 61–65] On huomioitava, että tutkapoikkipinta-ala vaihtelee huomattavasti samassa kohteessa riippuen katselukulmasta eli tutkasäteilyn tulokulmasta. Tästä johtuen geometrinen pinta-ala ei yleensä sääntele tutkapoikkipinta-alaa vaan suuntaavuus. Pinnan heijastuskertoimella tarkoitetaan pinnan aiheuttamaa vaimennusta tutkan säteilyyn. [38, s. 455] Tutkapoikkipinta-ala voi olla suurempi kuin kappaleen fyysinen pinta-ala, jos siihen muodostuu kulmaheijastimia eli soppeja. Optimaalinen tutkasoppi muodostuu kolmesta toisiinsa nähden kohtisuoraan sijoitetusta tasosta. Tällainen soppi heijastaa säteilyn takaisin tulosuuntaan riippumatta sen tulokulmasta. Tutkasoppeja ja sen kaltaisia rakenteita pyritään välttämään esimerkiksi sota-aluksissa muotoilulla. [47, s. 61–65]

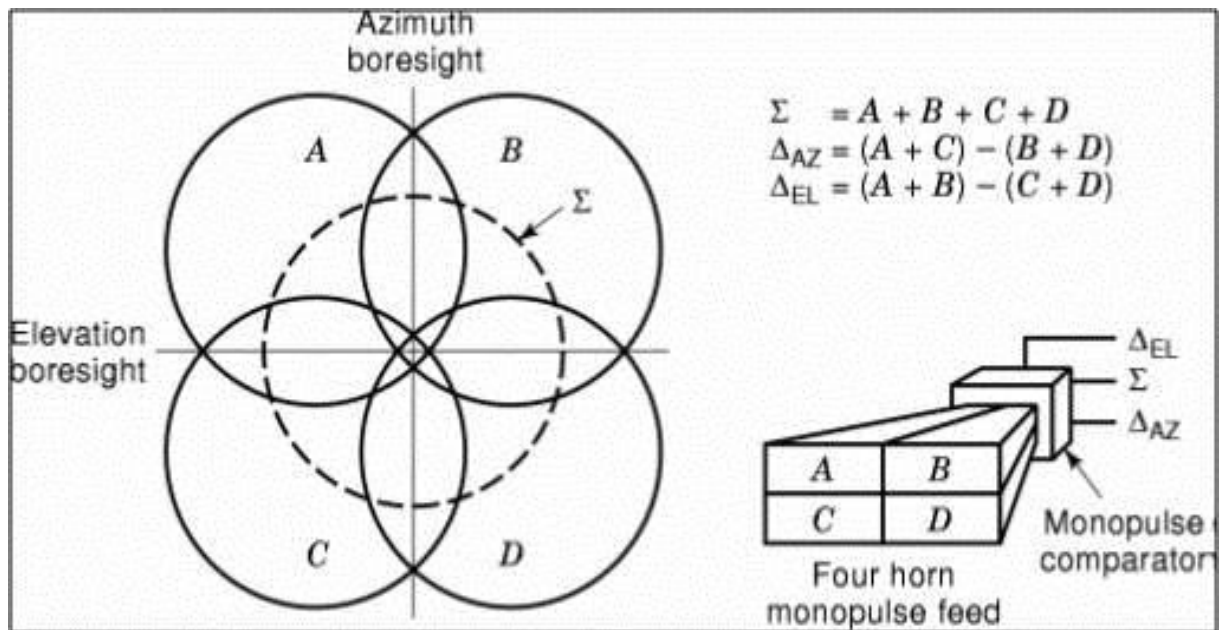
Tutka on kuitenkin monien tekijöiden kompromissi, joten etäisyyden kasvattaminen edellä mainituilla tekijöillä ei yleensä ole mahdollista muuttamatta tutkan rakennetta. Tehon kasvattaminen vaatii lisää sähköntuottoa ja jäädytystä sekä lisää samalla tutkan tiedusteltavuutta. Antennin fyysinen koko on sovitettava käytettävään aallonpituuteen. Suuremmalla antennilla suhteessa aallonpituuteen olisi saavutettavissa parempi antennivahvistus. Aallonpituuden pienentäminen johtaisi lähetystehojen pienentymiseen sekä säteilyn etenemiseen vaikuttavien ilmakehän häviöiden kasvuun. Tutkan lavetti asettaa rajat antennin fyysiselle koolle. Pulssin pituuden kasvattaminen heikentää tutkan etäisyserottelukykä. Järjestelmän häviöihin voidaan vaikuttaa laitteiston rakennusvaiheessa käyttämällä laadukkaampia komponentteja, joka todennäköisesti nostaa laitteiston hintaa. Ympäristön kohinasoihin voidaan vaikuttaa antennin sijoittelulla. Signaali-kohina -suhdetta voidaan kasvattaa maalin pidemmällä seuraamisella. Tämä voidaan toteuttaa joko pulssin pituutta kasvattamalla tai pulssien integroinnilla. Maalin pinta-alaan vaikuttaa sen valaisukulma. Etenkin liikkuvan maalin tapauksessa valaisukulma saattaa muuttua jatkuvasti



nopealla tahdilla. Maalista heijastuneet ja sironneet kaiut interferoivat keskenään. [13, s. 181–187]

Seurantatutkissa, kuten esimerkiksi aktiivisissa tutkahakupäissä, käytetään eri menetelmiä maalin paikan mittaamiseen. Keilanheittomenetelmää käyttävät tutkat siirtävät antennikeilaa vaakatasossa maalin molemmille puolille. Kummaltakin puolelta maalia mitataan amplitudit ja muodostetaan erojännite, josta saadaan laskettua maalin paikka antennin keskilinjan suhteen. Maali pyritään pitämään kummankin keilan ääriasentojen välisellä keskilinjalla. Keskilinjalla ollessaan kummankin keilan mittaama amplitudi on yhtä suuri. Keilanheittomenetelmällä voidaan myös seurata maalin paikkaa korkeussuunnassa, mikäli tutkaan lisätään kaksi keilaa. Kartiokeilaus on keilanheittomenetelmän kehittyneempi muoto, jossa antennikeilan keskiosaa pyöritetään kartion muodossa maalin ympärillä. Kaikupulssit moduloituvat, mikäli maali ei ole kartion keskilinjan kohdalla. Modulaatio poistuu, kun kartiota siirretään maalin suuntaan. Peitetyssä kartiokeilauksessa ainoastaan vastaanotinta pyöritetään maalin ympärillä lähettimen pysyessä paikallaan, jolloin sen häirintä on perinteistä kartiokeilausta hankalampaa. [13, s. 214–215; 47, s. 170–174] Keilanheitto- ja kartiokeilausmenetelmät ovat melko alkeellisia mittaamenetelmiä seurantatutkissa. Ne vaativat vähintään neljä vastaanotettua pulssia, jotta maalia kyetään seuraamaan korkeus- ja leveysuunnassa. Vastaanotettuihin pulsseihin voi kuitenkin muodostua modulaatiota muustakin kuin maalin poikkeamasta keskilinjalta, kuten esimerkiksi häilynnästä johtuvaa tutkapoikkipinta-alan muutosta. Nämä tutkan toiminnan kannalta ei-toivotut modulaatiot heikentävät seurantatarkkuutta. [47, s. 170–174]

Monopulssitutka muodostaa seurannan nimensä mukaisesti yhden pulssin perusteella. Se summaa vaaka- ja pystytasossa neljän keilan vastaanottamia yhden pulssin amplitudeja. Perättäisten pulssien väliset amplitudierot eivät vaikuta seurannan laatuun, sillä seuranta muodostetaan yhdestä pulssista kerrallaan. Amplitudeista lasketaan erojännite vaaka- ja pystysuunnassa, jonka perusteella antennia käännetään maalin suuntaan. Maalin etäisyys tutkan keskilinjasta määritellään laskemalla keilojen amplitudien summasignaali. [13, s. 216–217; 47 s. 174; 48, s. 46] Amplitudiin perustuva monopulssitutka vaatii kardaaniripustetun tutka-antennin (engl. gimbal), joka on suojattu radomilla. Radomi on harvoin optimaalinen tutkan toiminnan suhteen. Lisäksi antennin katselukulmat ovat rajoitettuja. [11, s. 307] Monopulssitutkan toimintaperiaatetta on havainnollistettu kuvassa 5.



Kuva 5. Monopulssitutkan toimintaperiaate [49]

Monopulssitutka voidaan toteuttaa myös vertailemalla vastaanotettujen signaalien vaihetta interferometrillä. Tällöin ohjuksessa ei tarvitse olla liikuteltavaa antennia, vaan vastaanotto voidaan toteuttaa ohjuksen runkoon tai siivekkeisiin asennetuilla kiinteillä antennilla. Tämä mahdollistaa laajemman katselukulman ja taajuusalueen eikä vastaanottimen antennit ole muiden sensorien edessä ohjuksen rungossa. Sopivilla säteilyn tulokulmilla ja aallonpituuksilla hakupää ei välttämättä kykene yksikäsitteiseen säteilyn tulosuunnan määrittämiseen. Tämä ei kuitenkaan muodostu ylitsepääsemättömäksi ongelmaksi, sillä hakupäissä tärkeämpi ominaisuus on kyky mitata tarkasti säteilyn tulokulman muutosta, kuin absoluuttista tulokulmaa. Vaiheeseen perustuva monopulssitutka kykenee myös amplituditutkaa kauempaa tunnistamaan monimaalitalanteita. [11, s. 308] Vaihevertailua käyttävän monopulssitutkan sivukeilataso on amplitudivertailua käyttävää tutkaa suurempi johtuen eri antennielementtien suuresta etäisyydestä toisiinsa suhteessa käytettävään aallonpituuteen [47, s. 177]. Suuremmat sivukeilatason mahdollistavat tehokkaamman hakupään tutkan häirinnän.

Aktiivinen tutkahakupää määrittää maalin etäisyyden tyypillisesti etäisyysportin avulla. Etäisyysportti on arvio seuraavan pulssin mitatusta etäisyydestä. Etäisyysportti jaetaan kahtia maalin arvioidun etäisyyden kummallekin puolelle ja tutka muuttaa etäisyysarviotaan sille puolelle porttia, mihin suurempi osa pulssin mitatusta pituudesta asettui. Tätä menetelmää kutsutaan puoliporttiseurannaksi. [11, s. 75; 47, s. 177] Maalia voidaan seurata etäisyysuunnassa myös dopplerseurannalla eli nopeusportilla. Dopplerseurannassa vastaanottimen dopplersuodatin seuraa oletetun dopplertaajuuden keskikohtaa. [47, s. 177]

Etäisyysportin avulla tutka pystyy mittaamaan etäisyyttä tarkemmin kuin pulssin kulkuaikaan perustuen [11, s. 75].

Meritorjuntaohjusten tutkahakupäät voidaan jakaa neljään sukupolveen. Ensimmäisen sukupolven hakupäissä on tutka, joka käyttää pistetaajuutta sekä tasaista pulssintoistoväliä. Niiden käyttämät etäisyysportit ovat suhteellisen laajoja, jonka vuoksi niiden häirintä ja harhauttaminen on helppoa. Toisen sukupolven hakupäissä on monopolssitutka, jonka lisäksi niiden pulssintoistotaajuutta voidaan hypyttaa sekä harituksella, että värinällä. Kolmannen sukupolven hakupäätutkat käyttävät kehittyneitä modulaatioita sekä taajuushyppyä. Koherentilla eli samassa suunnassa, vaiheessa ja taajudessa olevien aaltojen dopplerprosessoinnilla saavutetaan entistä parempi maalin erottelukyky sekä häirinnänväistöominaisuudet. Tulevaisuuden neljännen sukupolven hakupäiden signaalikäsittely on aiempaa kehittyneempää ja hakupäät tulevat olemaan kaksitoimisia, kuten esimerkiksi yhdistettyjä tutka- ja IR -hakupäitä. [27, s. 26–28]

Meritorjuntaohjusten tutkahakupäät toimivat yleensä X- tai Ku -taajuusalueella johtuen niiden lyhyestä mittausetäisyydestä, suhteellisen hyvästä joka sään toimintakyvystä sekä niiden käyttämä aallonpituus mahdollistaa pienikokoisen antennin, joka mahtuu ohjuksen runkoon. [27, s. 26–28; 47, s. 21]. Korkeataajuinen radiosignaali myös etenee merenpinnassa hyvin [47, s. 124]. Hakupäät kykenevät arvioimaan ja luokittelemaan vastaanotettuja tutkakaikuja. Analysointia tehdään muun muassa arvioimalla maalin kinematiikkaa, voimakkuutta, polarisaatiota ja tilavuutta. [27, s. 26–28]

### 3.2.3. Häirittävyys

Silpulla tarkoitetaan passiivista materiaalia, jonka tarkoituksena on heijastaa, absorboida ja taittaa tutkan säteilyä. Silpun käytöllä pyritään luomaan harhamaaleja, peittämään oikea maali sekä yleisesti heikentää kohteena olevan tutkan suorituskykyä suojattavaa kohdetta vastaan. Silppu on kapeaa, nauhamaista, yleensä alumiinista tai metallilla päällystetystä lasikuidusta valmistettuja säikeitä. Käytettävä silpun pituus optimoidaan todennäköisen kohteena olevan tutkan aallonpituuden mukaan tai siitä tehdään mahdollisimman laajakaistaista. [16, s. 30; 47, s. 132; 50, s. 12] Silppu mitoitetaan yleensä puolen aallonpituuden mittaiseksi ja yhdessä silppuraketissa voi olla usealle eri aallonpituudelle sovitettua silppua [47, s. 132–133]. Merellä ilmaan ammutun silpun vaikutusta tehostaa silppupilven ja merenpinnan aiheuttama heijastuvan tutkasignaalin monitie-eteneminen, joka entisestään harhauttaa hakupään tutkaa [50, s. 13].

Silpun käytössä merellisessä toimintaympäristössä on kaksi päätapaa. Silppuja voidaan ennakoivasti ampua kauas aluksesta luoden useita harhamaaleja, jolloin tutkaoperaattorin tai ohjuksen hakupään on vaikea erottaa oikeaa maalia niiden joukosta. Onnistuakseen tällainen silputus on kuitenkin tehtävä ennen ohjuksen laukaisua tai ennen kuin ohjus ehtii avata hakupäänsä tutkan. Lisäksi harhamaaleja on ylläpidettävä ampumalla lisää silppua, sillä muuten hyökkääjä voi vain odottaa silpun vaikutuksen loppumista. Toinen päätapa pyrkii irrottamaan jo lukkiutuneen tutkahakupään pois aluksesta. Silppupilvi ammutaan muutaman sadan metrin etäisyydelle aluksesta. Alus pyritään peittämään silppupilven taakse. Ohjus pyritään saamaan seuraamaan silppupilveä ja alus siirretään pilven takaa pois uhkasektorista. Jälkimmäinen tapa on tehokas lähinnä pienen tutkapaikkipinta-alan omaavilla aluksilla, jotka pystytään kokonaan piilottamaan silppupilven taakse. [50, s. 13] Silpun putoamisnopeus on tyypillisesti alle 1 m/s. Silpun tuottaman tutkapaikkipinta-alan suuruuteen vaikuttaa käytetyn silppumäärän massa ja mittaavan tutkan käyttämä aallonpituus. [47, s. 133]

Tutkahakupään häirintään on kehitetty perinteisen silpun lisäksi erilaisia suojasumuja, kaasulla täytettäviä soppiheijastimia sekä aktiivisia häirintälähtimiä. Aktiiviset häirintälähtimet voivat olla myös raketilla ammuttavia [36, s. 92]. Raketilla ammuttavalla häirintälähtetin saadaan lähemmäksi ohjusta, jolloin häirinnän teho kasvaa ja samalla se pyrkii harhauttamaan ohjusta väärään suuntaan. Kaasutäytteiset soppiheijastimet voidaan laukaista riippumatta aluksen nopeudesta, kulkusuunnasta ja sääolosuhteista. Ne tuottavat samanlaisen, aluksen kaltaisesti käyttäytyvän, herätteen riippumatta uhkasuunnasta ja niiden toiminta-aika pitkä. Omasuojaheitteet kehittyvät multispektraalisiksi, jolloin ne vastaavat uhkaan yhä laajemmalla taajuusalueella. [36, s. 92]

Tutkaa vastaan tarkoitetut omasuojahäirintälähtimet koostuvat yleensä tutkavaroittimesta ja häirintälähtimistä. Omasuojahäirintälähtimet voivat toimia automaattisesti tutkavaroittimen havaitessa sopivalla taajuusalueella toimivan tutkan lukituksen. Häirintää voidaan yhdistää myös silputtamiseen. Häirintämenetelmät jaetaan kohinahäirintään ja harhauttavaan häirintään. [47, s. 185]

Kohinahäirintä toteutetaan lähettämällä jatkuvaa tai pulssitettua kohinaa kohdetutkan vastaanottimeen. Pulssitetussa kohinassa häiritsijä kykenee pulssien välissä kuuntelemaan kohdetutkan taajuutta ja siten kohdistamaan häirinnän paremmin oikealle taajuudelle. Pistetaajuuden häirintää voidaan käyttää, jos tiedetään kohdetutkan käyttämä taajuus. Tällöin voidaan kohdistaa maksimaalinen häirintäteho kohdetutkan käyttämälle taajuudelle eikä lähetettävää häirintätehoa tarvitse levittää suuremmalle taajuuskaistalle. Laajakaistaisessa

häirinnässä häirintälähtetimen tehoa jaetaan pistehäirintää laajemmalle taajuusalueelle. Laajakaistaista häirintää voidaan käyttää, mikäli häiritäviä tutkia on useita tai kohteena oleva tutka hypyttää taajuutta. Pyyhkäisevä häirintä on pistehäirinnän muoto, jossa yhdellä kapean taajuuskaistan häirintäpiikillä pyyhkäistään kohdetutkan käyttämää koko taajuuskaistaa. Pyyhkäisevää häirintää voidaan käyttää, mikäli kohteena oleva tutka hypyttää taajuuttaan tai häiritävänä on useita tutkia eri taajuuksilla. Pyyhkäisevässä häirinnässä häirintäteho ei aina kohdistu kohdetutkan käyttämälle taajuudelle, mutta sopivasti osuessaan häirintätehoa kohdistuu kohdetutkaan paljon enemmän kuin laajakaistaisessa häirinnässä. [47, s. 187–188]

Harhauttavia häirintämenetelmiä ovat esimerkiksi etäisyysportin varastaminen, nopeusportin varastaminen sekä cross-eye- ja ristipolarisaatiohäirinnät. Etäisyysportin varastamista (engl. range gate pull-off, RGPO) käytetään lukittuneen seurantatutkan, kuten esimerkiksi ohjuksen hakupään, seurantalukituksen murtamiseen. Seurantatutkan lähettämä tutkasignaali siepataan ja häirintälähtetimestä luodaan sen etäisyysporttiin oman maalikaiun kohdalle uusi, voimakkaampi kaiku, jonka lähetystä aletaan viivästyttää. Viivästyttämisen tarkoituksena on saada seurantatutka seuraamaan valemaalia, joka viivästyttämisen seurauksena ajautuu pois seurantatutkan etäisyysportista. RGPO -menetelmää voidaan väistää lisäämällä tutkan lähetysteho, jolloin häirintäsignaali jää heikommaksi kuin todellinen hyötysignaali tai pakottamalla tutka seuraamaan maalipiikin etureunaa. RGPO -menetelmää voidaan käyttää myös käänteisenä, jolloin valemaalin lähetystä aikaistetaan. Tästä menetelmästä käytetään nimitystä range gate pull-in, mutta sitä voidaan käyttää vain sellaisia tutkia vastaan, joiden pulssintoistotaajuus on kiinteä. Nopeusportin varastaminen (engl. velocity gate pull-off, VGPO) on menetelmänä samanlainen kuin RGPO, mutta portin varastaminen tehdään lähetysten viivästyttämisen sijaan häirintäpulssein taajuuden muutoksella. [47, s. 189–191]

Monopulssitutkan häirintä on perinteistä pulssitutkaa vaikeampaa, sillä se kykenee määrittämään maalin paikan yhden pulssin perusteella, joten amplitudin muokkaamiseen perustuva häirintä ei riitä. Monopulssitutkaa vastaan voidaan käyttää cross-eye- ja ristipolarisaatiohäirintäteknikoita. Cross-eye -häirinnällä pyritään kohdetutkalle luomaan välkehtimisen eli maalin eri osista heijastuneiden kenttien interferenssin luoman virhemittauksen kaltaista virhettä, jolloin tutkan seuranta vaeltelee maalissa ja sen ulkopuolella. Cross-eye -häirintä luodaan kahdella antennilla, joiden lähteet ovat koherentteja keskenään eli ne ovat samassa vaiheessa, samassa suunnassa ja samanpituisia, jolloin aallot vahvistavat toisiaan. Kahden antennin luoma suuntakuvion nollakohta pyritään kohdistamaan kohdetutkan keilaan. Häirintäsignaaleihin luodaan vaihe-eroa, jonka seurauksena kohdetutkan seuranta ei pysy maalissa. Ristipolarisaatiohäirinnässä lähetetään

ristipolarisoitunutta häirintäsignaalia kohdetutkaan, joka aiheuttaa mittauksessa kulmavirhettä. Ristipolarisaatiohäirintää käytettäessä tulisi tietää kohdetutkan vastaanottopolarisaatio tai muuten häirintälähetteen polarisaatiota joudutaan kääntämään kesken häirinnän, mikä taas heikentää häirintäsignaalin tehoa. [47, s. 192–194]

Kummallakin hakupäätetekniikalla on omat hyvät ja huonot puolensa. Infrapunahakupään merkittävänä etuna on sen passiivisuus. Passiivinen hakupää ei omalla läheteellään paljasta toimintaansa, jolloin ennakkovaroituksen saaminen lähestyvistä ohjuksista vaikeutuu. Tämän seurauksena ohjuksen harhauttaminen ja häirintätoimenpiteet hankaloituvat, sillä niiden käyttö edellyttää tietoa ohjuksen paikasta. Infrapunahakupää ei kuitenkaan kykene mittaamaan etäisyyttä maaliin tai maalin liikenopeutta. Nämä ominaisuudet ovat tutkahakupään hyviä puolia. Tutkahakupään aktiivinen lähete sen sijaan antaa kohteena olevalle alukselle ennakkovaroituksen lähestyvistä ohjuksista. Tätä ongelmaa voidaan kuitenkin hieman kiertää käyttämällä ohjuksessa tukevia ohjautusmenetelmiä, kuten esimerkiksi inertiapaikannusta ja satelliittipaikannusta.

Satelliittipaikannusta hyödyntävät inertiapaikannusyksiköt sekä datalinkeillä lähetettävät maalipäivitykset mahdollistavat ohjuksen tarkemman lennon lähelle maalia passiivisena, jolloin tutkan aktiivinen lähetysaika voidaan minimoida. Tämän seurauksena alukset saavat ennakkovaroituksen mahdollisimmat myöhään, jolloin niille jää vähemmän aikaa häirintä- ja torjuntatoimenpiteisiin. [27, s. 26–28]

## 4. MAALIN VAIKUTUS HAKUPÄÄN TOIMINTAAN

### 4.1. Nykyaikaisen sota-aluksen herätteet

Nykyaikaisissa sota-aluksissa käytetään häivemenetelmiä, joilla niitä pyritään suojaamaan tiedustelulta, valvonnalta, maalittamiselta sekä asevaikutukselta. Häivemenetelmiksi kutsutaan kaikkia tekniikoita, joilla kohde pyritään vaikeasti havaittavaksi, tunnistettavaksi, yksilöitäväksi tai paikannettavaksi [13, s. 329]. Klassinen esimerkki häivetekniikasta on naamiomaalaus tai maastokuviointi, jolla kohde pyritään sulauttamaan ympäristöönsä näkyvän valon alueella. Häiveteknisten ratkaisujen avulla pienennetään aluksen herätettä hallitsemalla emissioita ja heijastuksia, jonka seurauksena sensoreiden havaitsemis- ja tunnistamisetäisyydet pienenevät [13, s. 329; 36, s. 49]. Infrapuna-alueella minimoidaan lämpöheräte tai muokataan se taustan kaltaiseksi, jolloin aluksen ja taustan kontrastiero on mahdollisimman pieni [36, s. 74]. Lämpöherätettä voidaan pienentää eristämällä lämmönlähteitä, jäädyttämällä rakenteita tai erikoisrakenteilla. [38, s. 449–451]. Aluksissa voidaan käyttää ns. suojasuihkuja ruiskuttamaan vettä kansirakenteisiin sekä aluksen ympärille. Vesi toimii tällöin eristeenä estäen tai hidastaen infrapunasäteilyn etenemistä ja jäädyttäjänä laskien kansirakenteiden lämpötilaa ja sitä kautta niiden emittoiman säteilyn intensiteettiä.

Termisellä infrapuna-alueella kohteen emissiivisyyttä ja sitä kautta lämpöherätettä voidaan pienentää pintamateriaaleilla. Erityisen tärkeää on kuitenkin piilottaa kuumat kohteet, kuten esimerkiksi pakokaasut ja moottoreiden jäähdytysilma. Kuuma ilma ei suoranaisesti näy lämpökamerassa, mutta se voi lämmittää lähellä olevia rakenteita, jotka erottuvat taustastaan lämpiminä kohteina. Pakokaasut erottuvat lämpökamerassa niiden sisältämän hiilidioksidin vuoksi. [13, s. 336–337] Erikoisrakenteilla tarkoitetaan kohteen pinnalle tehtävää mikrorakennetta, joka muokkaa materiaalin herätettä. Mikrorakenteen sopivalla muotoilulla voidaan minimoida esimerkiksi ei-toivottuja heijastuksia. [38, s. 451]

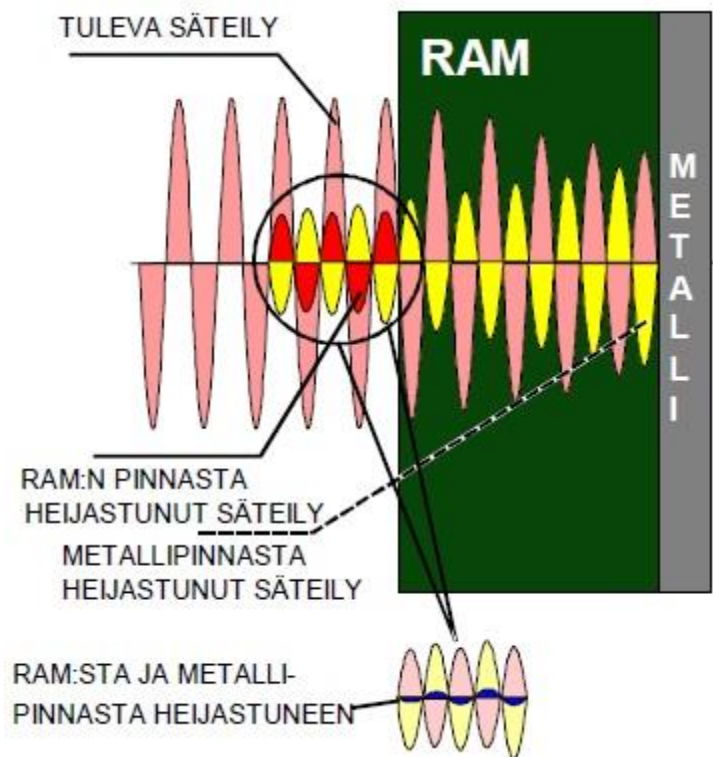
Sota-aluksen muodostama lämpöheräte voidaan jakaa sisäisesti ja ulkoisesti muodostuvaan lämpöherätteeseen. Sisäisesti muodostuvaan herätteeseen vaikuttavat merkittävimmin moottoreiden tuottama lämpö, pakokaasut, ilmastoinnin poistoilma sekä lämmitettyjen kohteiden lämpövuoto. Ulkoisesti muodostuvaa lämpöherätettä muodostuu aluksen heijastaessa ympäristönsä säteilyä, kuten esimerkiksi aurinkoa, taivasta ja merta. Moottoreiden tuottama hukkalämpö ja pakokaasut ovat kuitenkin merkittävien

infrapunaherätettä aiheuttava tekijä. Pakokaasut lämmittävät lisäksi myös lähellä olevia aluksen muita rakenteita. [37, s. 1–2]

Auringon säteilyn heijastuksia voidaan pienentää maalaamalla alus absorboivalla maalilla. Absorboivan maalin käytöllä on myös heikkouksia. Absorboivan maalin käyttö voi vähentää aluksen reflektiivisyyttä auringon suhteen, mutta samalla yleensä lisää aluksen rungon emissiivisyyttä. Matalaemissiivisellä maalilla maalattu alus taas heijastaa auringon säteilyä enemmän. Vallitsevat sääolosuhteet vaikuttavat siihen, millaisella maalilla alus kannattaa maalata. Erikoismaalit ovat kalliita ja niiden suorituskyky heikkenee merkittävästi tai jopa kääntyy päinvastaiseksi esimerkiksi pakokaasujen aiheuttaman likaantumisen, suolan kertymisen tai hapettumisen seurauksena. Laivastonharmaa on tyypillisesti valittu alusten väriksi kompromissina emissiivisyyden ja reflektiivisyyden suhteen. [37, s. 3–4]

Tutkataajuusalueella häiveteknisinä ratkaisuinä käytetään muotoilua, jolloin kohteesta heijastuu ja siroaa mahdollisimman vähän tutkasäteilyä sekä pinta-materiaaleja, jotka absorboivat tutkasäteilyä. Tutkasäteilyä absorboivia materiaaleja kutsutaan RAM -materiaaleiksi (engl. Radar Absorbent Material) [13, s. 329–333]. Aluksissa tyypillisesti käytettävä RAM -materiaali on hiilikuitu, jota esiintyy erityisesti kansirakenteissa. Alusten rakenteissa käytettävä RAM -materiaali on optimoitava tietylle taajuusalueelle, sillä materiaalin paksuus tulee sovittaa kohdetutkan aallonpituuteen, jotta se vaimentaisi säteilyä mahdollisimman tehokkaasti [13, s. 334]. Dielektriset RAM -materiaalit pyrkivät kumoamaan tutkapulssin vaiheen ja siten häivyttämään koko pulssin ajoittamalla materiaalin pinnasta heijastuvan säteilyn sekä materiaalin läpäisseen ja heijastuneen säteilyn vaiheet käänteisiksi [13, s. 333; 38, s. 459]. Dielektrisen RAM -materiaalin toimintaperiaate on havainnollistettu kuvassa 6.





Kuva 6. RAM -materiaali vaimentaa tutkasäteily kumoamalla sen vaiheen [13, s. 333]

Tutkavaimennusrakenteet (engl. Radar Absorbent Structure, RAS) ovat useista eri materiaaleista koostuvia kerrosmaisista rakenteita, jonka tarkoituksena on vaimentaa tutkasäteily eri taajuuksia kerroksittain [38, s. 460]. Heijastuva tutkasäteily pyritään muotoilun avulla ohjaamaan pois uhkasuunnasta eli kohteena olevan tutkan vastaanottimesta. Perusratkaisuna pyritään välttämään suorassa kulmassa säteilyyn nähden olevia tasaisia pintoja, kahden pinnan välisiä suoria kulmia ja kaarevia pintoja [13, s. 334–335]. Aluksissa varusteet, kuten esimerkiksi veneet ja asejärjestelmät, pyritään yleensä peittämään suojaavin seinin, jotta ne eivät muodostaisi tutkasoppeja.

Alusten elektronisen tuen järjestelmät on suunniteltu havaitsemaan muut pinta-alukset, pintakulussa olevat sukellusveneet ja lentokoneet ennen kuin ne havaitsevat aluksen. Lisäksi elektronisen tuen järjestelmän tehtävänä on tuottaa ennakkovaroitus aktiivisista tutkahakuisista sekä laserilla ohjattavista ohjuksista. Alukset kykenevät suojaautumaan ohjuksia vastaan ampumalla harhamaaliheittimellä soihtuja, silppua ja savua. Harhamaalit voivat myös olla kelluvia, perässä vedettäviä tai itsestään liikkuvia passiivisia harhamaaleja. Alukset voivat olla varustettuina häirintälähetimillä, jotka voidaan sijoittaa itse alukseen, perässä vedettävään lauttaan, kauko-ohjattavaan pinta-alukseen tai ne voidaan ampua raketilla ilmaan. [36, s. 64]

## 4.2. Pinta-alukset Itämeren alueella

Saksalaisilla Braunschweig (K130) -luokan korveteilla korvataan Saksan merivoimien ikääntyvät ohjusveneet. Samalla alusluokka muokkaa Saksan merivoimien tehtäväkenttää entistä kansainvälisempään suuntaan. Alusluokka soveltuu käytettäväksi ympäri maailmaa, on merkittävästi merikelpoisempi kuin aiemmat ohjusveneet sekä niiden toiminta-aika on pidempi. Alusluokan päätehtäväksi on suunniteltu pintatorjunta rannikon läheisyydessä. [51] Aluksia on yhteensä viisi kappaletta ja niiden rakentaminen on aloitettu vuosina 2005–2006. Alukset on otettu käyttöön vuosina 2008–2013. [52] Alusluokan kolmas alus, F262 Erfurt on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7. Braunschweig -luokan korvetti F262 Erfurt [52]

Alusten suunnittelussa on pyritty minimoimaan niiden herätteitä. Tutkapoikkipinta-alaa on pienennetty muotoilemalla suuria pintoja, kuten esimerkiksi aluksen kylkiä, eri kulmille. Asejärjestelmiä ja laitteistoja on sijoitettu laitojen taakse [53]. Valmistaja käyttää rungon muotoilusta nimeä ”X shape” ja sen tarkoituksena on heikentää ja sirottaa tutkakaikua. ”X shape” -muotoilu on havainnollistettu kuvassa 8. [54]



Kuva 8. Braunschweig -luokan korvetin kyljen "X shape" -muotoilu tutkapoikkipinta-alan pienentämiseksi [54]

Alusten infrapunaherätettä pienennetään ruiskuttamalla merivettä vesilinjassa sijaitseviin pääkoneiden pakoputkiin pakokaasujen jäädyttämiseksi [54]. Kylkiin on asennettu suuttimia, joilla voidaan tarvittaessa muodostaa herätettä pienentävää vesisumua. [53]

Meritorjuntaohjuksen havaitsemiseen alusluokan sensorikalusto koostuu EADS:n valmistamasta TRS-3D/16 -valvontatutkasta, ELSO -järjestelmästä sekä kahdesta Thalesin valmistamasta elektro-optisesta Mirador -tulenjohtoseuraimesta [52]. Mirador -järjestelmä kykenee optiseen valvontaan, maalinosoitukseen sekä tulenjohtoon. Se sisältää mustavalko- ja väri-TV -kamerat, keski-infrapuna-alueen lämpökameran sekä 1,574  $\mu\text{m}$ :n aallonpituudella toimivan laseretäisyysmittarin. [55] Alukset kykenevät aktiivisesti torjumaan meritorjuntaohjuksia laivatykistöllään sekä RIM-116 RAM -ilmatorjuntaohjuksilla [52]. Alusluokalla ei ole varsinaista tulenjohtotutkaa.

Braunschweig -luokan alusten elektronisen sodankäynnin järjestelmä koostuu Ewationin valmistamasta UL5000 -osajärjestelmästä, joka sisältää elektronisen tuen sensorit 2–18 GHz:n taajuusalueelle sekä häirintälähettä tutkantaajuusalueelle. Lisäksi aluksilla on kaksi Rheinmetallin valmistamaa MASS -harhamaaliheitintä. Ne ampuvat multispektraalisia heitteitä, jotka sisältävät soihtuja, silppua ja savua. MASS -järjestelmän soihtut vaikuttavat 3–14  $\mu\text{m}$ :n aallonpituuksilla ja silppu 8–18 GHz:n taajuusalueella. [56]

Steregushchy -luokan alukset ovat Venäjän tärkein alushanke pitkiin aikoihin. Se on ensimmäinen täysin uusi alusluokka, jonka suunnittelu on aloitettu Neuvostoliiton hajoamisen jälkeen. Hanke on työllistänyt merkittävän määrän teollisuutta sekä suunnittelu- ja tutkimusorganisaatioita ympäri Venäjää. Alusluokasta on pyritty kehittämään myös vientiversio, jolla käynnistettäisiin uudelleen Venäjän sotalaivojen vientiteollisuutta. [57] Alusluokan rakentaminen on aloitettu vuonna 2001 ja niitä on valmistunut neljä kappaletta [58]. Ensimmäinen sarjatuotantoalus (Projekt 20381) Soobrazitelny on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. Stereguschchy -luokan alus 531 Soobrazitelny [58]

Steregushchy -luokan alukset on suunniteltu suhteellisen pieniksi, mutta kuitenkin tulivoimaisiksi monitoimialuksiksi, joilla voidaan turvata kotimaan aluevedet. Alusluokalla kyetään pinta- ja sukellusveneentorjuntaan ja se on riittävän merikelpoinen osallistuakseen saattue toimintaan myös suuremmissa alustaisteluosastoissa. Niiden runko on terästä, mutta kansi- ja mastorakenteissa on käytetty kolmikerroksista komposiittirakennetta painon vähentämiseksi ja tutkapoikkipinta-alan pienentämiseksi. [57]

Meritorjuntaohjauksen havaitsemiseen alusluokan sensorikalusto koostuu Furke-E -ilmavalvontatutkasta, Granit -pintavalvontatutkasta, 5P10E -tulenjohtotutkasta sekä kahdesta eri puolille mastoa sijoitetusta MTK-201M -seuraimesta. MTK-201M on elektro-optinen seurain, joka on varustettu mustavalko- ja väri-TV -kameroilla, 8–12  $\mu\text{m}$ :n aallonpituudella toimivalla infrapunakameralla sekä 1,06 ja 1,54  $\mu\text{m}$ :n aallonpituuksilla toimivilla laseretäisyysmittareilla. Alukset kykenevät aktiivisesti torjumaan meritorjuntaohjuksia ilmatorjuntaohjuksilla sekä kahdella AK-630M -konetykillä. [57] Alusluokan prototyyppi

(Projekt 20380) on varustettu itsenäisellä Kashtan-M -lähipuolustusjärjestelmällä, joka koostuu tulenjohtotutkasta, elektro-optisesta seuraimesta, kahdesta 30 mm konetykistä sekä komento-ohjatuista ilmatorjuntaohjuksista. Järjestelmän tehokas kantama ohjuksilla on 8 km ja tykeillä 4 km. Alusluokan myöhemmissä sarjatuotantoaluksissa (Projekt 20381) Kashtan-M -järjestelmä on korvattu Redut VLS -ohjuslaukaisujärjestelmällä. [57; 58]

Steregushchy -luokan alusten elektronisen sodankäynnin järjestelmä on Pribor TK-25E-5, joka koostuu lähteestä riippuen 2–18 tai 8–20 GHz taajuuksilla toimivasta elektronisen tuen järjestelmästä sekä tutkataajuusalueen häirintäjärjestelmästä [57; 58; 59]. Antennit on sijoitettu päämaston kummallekin puolelle. Kummallakin puolella mastoa on yksi elektronisen tuen sensori ja kaksi häirintäjärjestelmän antennia. [57] Elektronisen tuen järjestelmä kykenee käsittelemään samanaikaisesti 100 maalia. Reaktioaika havainnosta häirintään on kolme sekuntia. Järjestelmä kykenee yhtäaikaisesti häiritsemään kahta maalia kerrallaan ja sen huipputeho on 80 kW [58; 59] Harhamaaliheitinjärjestelmä PK-10 sisältää neljä kymmenenputkista KT-216 -heitintä, joilla voidaan ampua 120 mm:n heitteitä. Heitteet ovat erillisiä silppu-, soihtu- ja savukranaatteja. [57] Taulukoissa 2 ja 3 on kummankin edellä esitellyn alusluokan perustiedot sekä lueteltu niiden asejärjestelmät ja sensorit.

Taulukko 2. Alusten tekniset tiedot. [52; 58]

	<b>Braunschweig</b>	<b>Steregushchy</b>
Uppouma	1914 t	2235 t
Pituus	88,8 m	104,5 m
Leveys	13,2 m	11,1 m
Syväys	4,8 m	3,7 m
Nopeus (max)	26 sol	26 sol
Toimintamatka	2500 mpk	3500 mpk
Henkilöstö	66	100
Koneteho	2 x 7400 kW	4 x 4400 kW

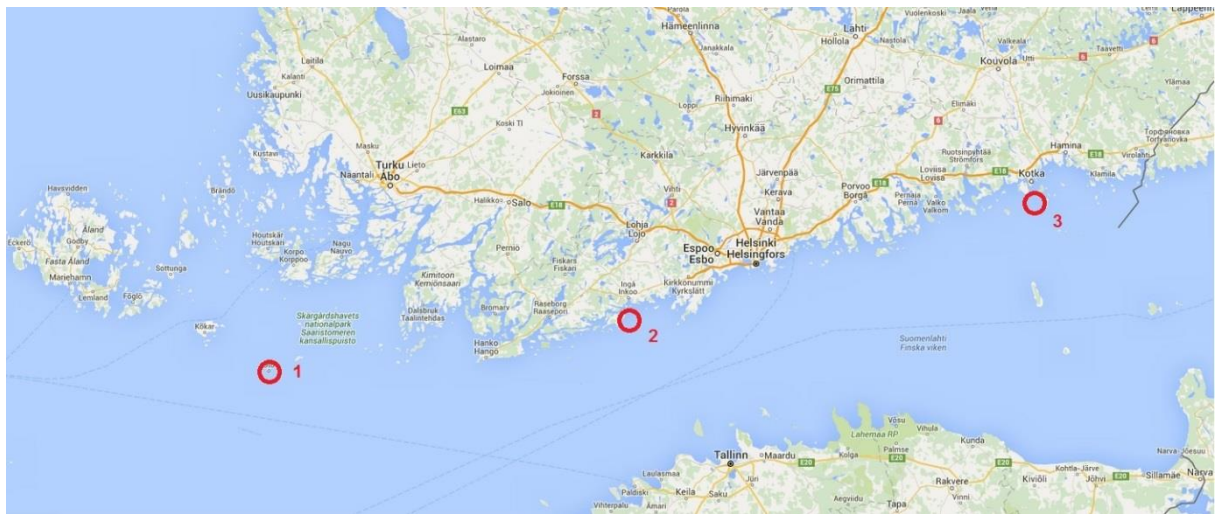
Taulukko 3. Alusten ase- ja sensorijärjestelmät [52; 57; 58; 59]

	<b>Braunschweig</b>	<b>Steregushchy (Projekt 20381)</b>
MTO (kantama)	4 x RBS15 Mk3 (200 km)	8 x SS-N-27 3M54 (300 km)
ITO (kantama)	2 x RIM-116 (10 km)	12 x Redut 9M96 (40 km)
Tykistö	1 x 76 mm, 2 x 27 mm	1x 100 mm, 2 x 30 mm, 2 x 14,5 mm
Harhamaalit	2 x Rheinmetall MASS	4 x PK-10
ELSO	EADS UL 5000 (RESM&RECM)	Pribor TK-25E-5 (RESM&RECM)
Tutkat	Valvontatutka: EADS TRS-3D/16 2 x merenkulkututka	Ilmavalvonta: Furke, pintavalvonta: Granit, TJ: 5P-10E Puma, 1 x merenkulkututka
EO	2 x Thales Mirador	2 x MTK-201M
Sonar	-	Zarya BMS, Vinyetka ACTAS
Torpedo	-	8 x 324 mm Paket (5 km)
Helikopterit	1 keskiraskas heko tai 1 UAV	1 x Ka-27 Helix

Yleistykseenä voidaan todeta, että korvetti -luokan aluksissa on hyödynnetty häivetekniikkaa ainakin tutkataajuusalueella. Lisäksi lämpöherätteen pienentäminen on mahdollista. Alukset on varustettu kattavalla sensorikalustolla ilma- ja pintavalvontaan, käsittäen erilaisia tutkia, elektro-optisia sensoreita sekä elektronisen sodankäynnin sensoreita. Alukset kykenevät lähitorjuntaan ja ohjusten torjuntaan ohjus- ja tykkikalustolla. Ohjusten harhauttamiseen aluksilla on sekä soihtuja, että silppua ampuvia harhamaaliheittäimiä. Alukset kykenevät tutkahakupään elektroniseen häirintään. Aluksilla ei kuitenkaan ole infrapunahakupään häirintään tarkoitettua DIRCM -järjestelmää, sillä elektro-optisten tulenjohtolaitteiden laserit on suunniteltu maalinosoitukseen.

## 5. OLOSUHDEANALYYSI

Olosuhdeanalyysissä tarkastellaan Suomen rannikolla vallitsevaa ilmastoa sekä erilaisten sääilmiöiden esiintymistiheyksiä. Tarkasteluun on valittu Suomen rannikolta kolme sääasemaa, Utö Paraisilla, Bågaskär Inkoossa ja Rankki Kotkassa. Niiden perusteella voidaan muodostaa riittävä yleistys Suomen etelärannikon ja Saaristomeren alueen sääilmiöistä. Mittauspisteiden paikat on havainnollistettu kuvassa 10. Mittauspisteiden säähavainnot on kerätty vuosina 1981–2010.



Kuva 10. Olosuhdeanalyysissä käytettyjen sääasemien paikat: 1. Utö, 2. Bågaskär ja 3. Rankki

Mittauspisteiden keskeisimmät havainnot on koottu liitteen 2 taulukoihin 1–8. Taulukoissa on listattuna suhteellisen ilmakosteuden sekä sademäärien keskiarvoja. Mittaustuloksia on tarkasteltu kuukausien sekä vuoden keskiarvona. Lämpötilat ja ilmankosteudet on mitattu neljästi vuorokaudessa kuuden tunnin välein. Sademäärien osalta tarkastellaan sateen määrää millimetreinä sekä sadepäivien lukumäärää. Sademääriä tarkastellaan kuukausittaisina keskiarvoina keskimääräisenä sademääränä, suurimpana sademääränä, pienimpänä sademääränä sekä suurimpana yhden päivän sademääränä. Sadepäivien lukumäärää tarkastellaan kolmeen eri sademäärään jaettuna.

Suomessa sadetyypit jaetaan karkeasti kahteen luokkaan: Rintamasateisiin, joissa sade on tasaista sekä kuurosateisiin. Kuurosateissa sadevoimakkuus vaihtelee nopeasti ja paikallisesti. Kuurosateet voivat olla voimakkaitakin. Rintamasade kestää yleensä tunteja ja sateen intensiteetti on tyypillisesti 0,2–0,5 mm/h. Voimakas rintamasade on voimakkuudeltaan noin 1 mm/h. Sateiden sisälle voi muodostua ympäröivää sadetta voimakkaampia sateita.

Kuuro sade kestää yleensä alle tunnin ja on tyypillisesti intensiteetiltään korkeintaan muutamia millimetrejä tunnissa. Voimakkaan kuurosateen intensiteetti on hetkellisesti kymmeniä millimetrejä, joskus jopa satoja millimetrejä tunnissa. [35, s. 17–18] Toisen määritelmän mukaan tihkusateen intensiteetti on 0,25 mm/h, heikon sateen 1 mm/h, keskimääräisen sateen 4 mm/h, ankaran sateen 16 mm/h ja rankkasateen 40 mm/h [47, s. 129].

Suhteellisella kosteudella tarkoitetaan ilmassa olevaa vesihöyryn määrää prosentteina siihen nähden, kuinka paljon kyseisen lämpöisessä ilmassa voisi olla enimmillään vesihöyryä. Lämpimään ilmaan kykenee sitoutumaan enemmän vesihöyryä kuin kylmään ilmaan. Sumussa suhteellinen ilman kosteus on 90 % ja udussa 70 %. [60] Suhteellisessa ilman kosteudessa ei ole havaittavissa merkittäviä eroja mittauspisteiden välillä. Eri mittauspisteiden vuoden keskiarvot mukailevat vuoden kokonaiskeskiarvoa. Talvikuukausina ilman kosteus on hieman muita vuodenaikoja korkeampi. Keskimääräinen suhteellinen ilman kosteus Suomen rannikkoalueella on 82,8 % ja keskimääräinen suhteellisen ilmankosteuden vaihteluväli vuodessa on 70–89 % välillä. Keskimääräinen suhteellinen ilmankosteus Suomen rannikolla vastaa voimakkaan udun suhteellista ilmankosteutta.

0,1–1 mm sademäärän sadepäivien määrä vaihteli 160–258 sadepäivän välillä keskiarvon ollessa 197 sadepäivää. Käytännössä tällaiset sadepäivät ovat lyhytkestoisia ja heikkoja kuurosateita. 1–10 mm sademäärän sadepäivien määrässä ei ollut käytännössä vaihtelua mittausasemien välillä. Sadepäivien määrä vaihteli 98–107 sadepäivän välillä keskiarvon ollessa 102 sadepäivää. Tällaiset sadepäivät ovat käytännössä useamman tunnin kestoisia tihkusateita tai heikkoja rintamasateita. Yli 10 mm sademäärän sadepäivien määrässä ei ollut vaihtelua mittausasemien välillä. Sadepäivien määrä vaihteli 10–13 päivän välillä keskiarvon ollessa 11,3 sadepäivää. Sadepäiviä oli keskimäärin yhteensä vuodessa noin 310. Näistä 63,5 % oli 0,1–1 mm sademäärää vastaavia, 32,9 % 1–10 mm sademäärää vastaavia ja 3,7 % yli 10 mm sademäärän päiviä. Tuloksista voidaan todeta, että noin joka kolmas päivä vuodessa sataa pitkäkestoisesti.

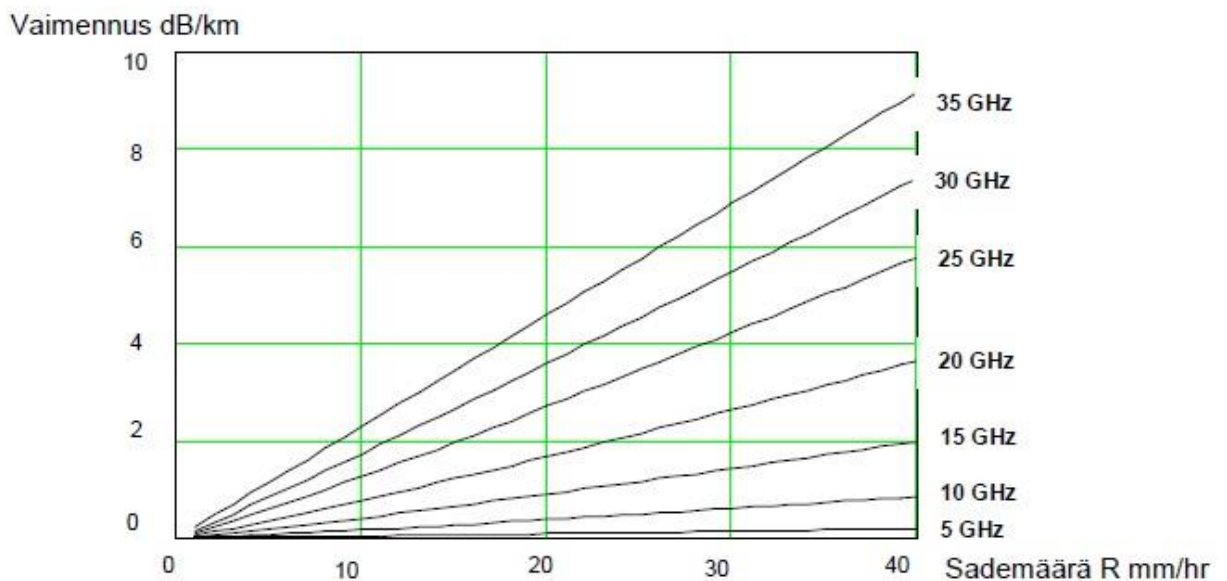
Kuukausittainen sademäärä vaihteli havaintoasemien välillä 43,1–48,1 mm keskiarvon ollessa 45,6 mm. On kuitenkin huomioitava, että yksittäisen aseman kuukausittaisessa sademäärässä voi olla suuriakin vaihteluita, sillä tilastot on kerätty useiden vuosien ajalta. Yksittäisen kuukauden sademäärä saattaa vaihdella jopa yli 100 mm.



## 5.1. Sään vaikutus hakupäiden toimintaan

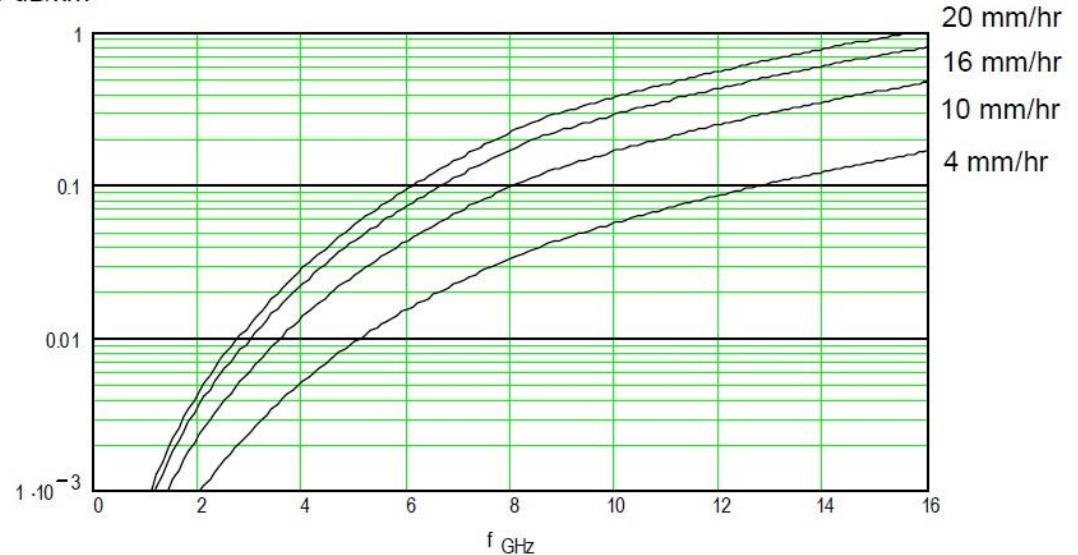
Tutkaa käytettäessä on yleensä tavoitteena vastaanottaa heijastuneita kaikupulsseja vain kiinnostavista kohteista. Tutkan vastaanottimeen tulee kuitenkin paljon myös ei-toivottuja kaikuja, jotka aiheutuvat mittausympäristöstä. Ei-toivottuja kaikuja voivat olla esimerkiksi maastonkohdat, eläimet ja sääilmiöt. Ei-toivotuista maaleista heijastuneita signaaleja kutsutaan välkkeeksi. Välke voidaan jakaa tilavuusvälkkeeseen ja pintavälkkeeseen. Tilavuusvälkkeeseen kuuluvat esimerkiksi sateen aiheuttama välke ja pintavälkkeeseen aallokon aiheuttama merivälke. [47, s. 199] Ilmakehän kaasut ja sateet vaimentavat tutkaa varsinkin suurilla taajuuksilla. Tutkan toimintaperiaatteesta johtuen on huomioitava, että kaasujen ja sateen aiheuttama vaimennus on kaksisuuntainen eli vaimennusta tapahtuu sekä lähetettyyn säteilyyn, että mitattavasta kohteesta heijastuvaan säteilyyn. Hapen ja vesihöyryn muodostama vaimennus on voimakkainta niiden resonanssitaajuuksia lähellä olevilla taajuuksilla. Näistä ainoa tutkataajuusalueen säteilyn etenemiseen merkittävästi vaikuttava on vesihöyryn 22 GHz:n resonanssitaajuus. [47, s. 53–54]

Sateen aiheuttama vaimennus riippuu sateen voimakkuudesta sekä pisarakoosta ja siitä, miten voimakkuus jakautuu säteilyn kulkemalle matkalle. Sadevaimennus syntyy pisaroiden aiheuttamasta absorptiosta sekä sironnasta, joista sironnan vaikutus on suurempi. Pisaroista sironnutta säteilyä palaa myös takaisin tutkan vastaanottimeen, joka ilmaistaa sadevälkkeenä. Kuvissa 11 ja 12 on havainnollistettu sateen vaikutusta radioaaltojen vaimentumiseen taajuuden ja sademäärän funktiona.



Kuva 11. Radiotaajuisen säteilyn vaimennus sademäärän funktiona [13, s. 68]

Vaimennus dB/km



Kuva 12. Radiotaajuisen säteilyn vaimennus taajuuden funktiona [13, s. 68]

Sade vaimentaa radioaaltoja merkittävästi 10 GHz:n taajuudesta alkaen. Sateen vaimennus  $A$  (dB/km) lasketaan kaavalla 6,

$$A = a * R^b \quad (6)$$

missä  $R$  on sademäärä millimetreinä tunnissa,  $a = G_a f_{\text{GHz}}^{E_a}$  ja  $b = G_b f_{\text{GHz}}^{E_b}$ , joissa  $a$ :n ja  $b$ :n tekijät ovat vakioita, jotka saadaan taulukosta 4 käytettävän taajuuden perusteella [13, s. 67–68; 47, s. 53].

Taulukko 4. Sadevaimennuksen vakiot [13, s. 68]

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

Esimerkkinä kaavassa 7 on laskettu RBS15 -meritorjuntaohjuksen Ku -alueen hakupään vaimennus  $A$  keskimääräisessä sateessa. Hakupään tutkan taajuutena käytetään laskussa 15 GHz ja sateen voimakkuutena 4 mm/h.

$$A = (4,21 * 10^{-5} * 15^{2,42}) * (4^{1,41 * 15^{-0,0779}}) \quad (7)$$

15 GHz:n taajuudella toimivan tutkan vaimennus A keskimääräisessä 4 mm/h -sateessa on noin 0,17 dB/km. Vaimennuskertoimeksi saadaan tällöin noin 0,04. Kymmenen kilometrin matkalla vaimennus on 1,7 dB, jolloin säteilyn energiasta on jäljellä noin 68 %, mikäli muita vaimennuksia ei oteta huomioon. Mikäli tutkasignaalin edessä ei ole esteitä, voidaan signaalin vaimentuminen laskea kaavassa 8 esitetyllä vapaan tilan vaimennuksena  $L_v$ , jossa  $R_{km}$  on signaalin kulkema matka ja  $f_{MHz}$  käytetty taajuus [36, s. 134]. Kaavan perusteella voidaan havaita, että signaali vaimenee sitä enemmän, mitä korkeampi on sen taajuus ja mitä pitempi on sen kulkema matka.

$$L_v = 32,4 \text{ dB} + 20 * \lg(R_{km}) + 20 * \lg(f_{MHz}) \quad (8)$$

RBS15 -meritorjuntaohjuksen hakupään tutkan signaali vaimenee 10 km:n matkalla vapaan tilan vaimennuksen vaikutuksesta kaavan 9 mukaan noin 142 dB. Huomioitavaa on tutkasignaalin kulkema edestakainen matka.

$$L_v = 32,4 \text{ dB} + 20 * \lg(20) + 20 * \lg(15000) \quad (9)$$

Sumun aiheuttama vaimennus riippuu sumun sisältämästä vesimäärästä. Jää ja kuiva lumi eivät juuri vaimenna radiotaajuisten säteilyn etenemistä. Märkä lumi sisältää vesihöyryä ja sen aiheuttama vaimennus tutkataajuusalueilla on tihkusateen luokkaa. Millimetriaallonpituuksilla toimiviin tutkiin lumella on merkittävämpi vaimentava vaikutus. [13, s. 68–69; 47, s. 53] Röntgensateen aiheuttama vaimennus on voimakasta, sillä pisaroiden muoto muuttuu matkalla lumihutaleista vesipisariksi. Vaimennuksen lisäksi vesipisarot sirottavat tutkasäteilyä, joka ilmaistaan tilavuusvälkkeenä. Suuret taajuudet aiheuttavat enemmän välkettä, johtuen niiden lyhyemmästä aallonpituudesta. [47, s. 130]

Merivälkkeen mallintaminen on haastavaa, sillä se on epähomogeenista, joka aiheutuu aallokon tutkapoikkipinta-alan jatkuvasta vaihtelusta. Merivälkkeen voimakkuuteen vaikuttaa aallokon lisäksi myös lähetettävän säteilyn kulma suhteessa meren pintaan, säteilyn taajuus ja polarisaatio sekä meren pintajännitys. Myös tutkan erottelukyvyllä on vaikutusta merivälkkeen ominaisuuksiin. Mikäli tutkan keilan peittämä alue on suuri, merivälkkeen tutkapoikkipinta-alan vaihtelu keilan sisällä on keskimäärin pientä. Kapealla keilalla merivälkkeen tutkapoikkipinta-alassa taas tapahtuu paljon vaihtelua, jolloin siitä muodostuu välkepiikkejä, jotka voivat helposti tulla ilmaistuksi kohinasuodatuksen alta. Välkepiikkejä muodostuu myös erityisesti hajoavista aallonharjoista eli vaahtopäistä. Merivälkkeen vaikutusta voidaan pienentää pulssien integroinnilla, taajuushyppytyksellä sekä vaimentamalla

lähialueelta tulevia kaikuja. [47, s. 121–125] Integroinnilla tarkoitetaan yhdellä keilauksella maalista saatujen kaikupulssien yhdistämistä, jolloin maalista saadaan vahvempi kaiku [47, s. 96].

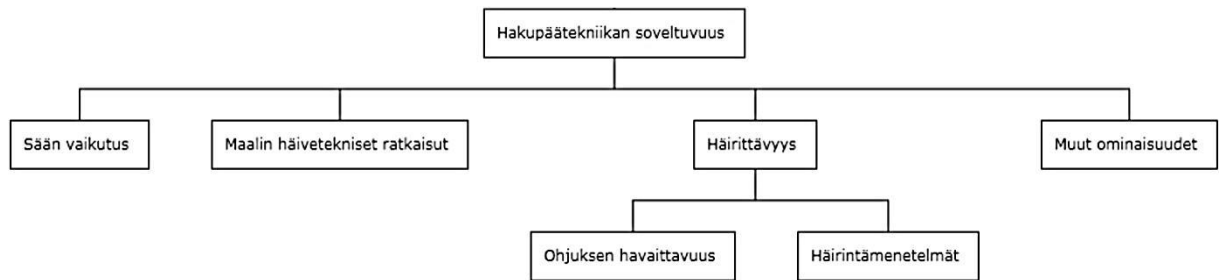
Matalalla lentävät ilmamaalit, kuten esimerkiksi ohjukset, ovat vaikeasti havaittavissa merivälkkeen seasta, sillä niistä heijastuva kaiku interferoi merivälkkeen muodostamien kaikujen kanssa. Lähellä merenpintaa lentävistä kohteista voi myös muodostua monitie-etenemistä, kun maalista heijastunut signaali heijastuu uudelleen merenpinnasta. [47, s. 121–125] Sade- ja merivälkkeen vaikutusta voidaan merkittävästi vähentää käyttämällä tutkassa liikkuvan maalin ilmaisua (engl. Moving Target Indication, MTI), jolloin tutka ilmaisee vain sellaisia maaleja, joista saadaan riittävän suuri dopplertaajuuden muutos. [47, s. 131]

Infrapunahakupäällä havaitaan maali, mikäli maalin ja taustan välinen kontrastiero on riittävän suuri. Kontrastiero heikentävät säteilyn etenemisvaimennus, optisen tien oma säteily, partikkelisirona sekä turbulenssi. Etenemisvaimennuksella tarkoitetaan säteilyn energian absorptiota ilmakehän kaasuihin ja partikkeleihin. Optisen tien omalla säteilyllä tarkoitetaan infrapunäsäteilyn kulkemalla reitillä olevien kaasujen ja partikkelien emittoimaa ja sirottamaa säteilyä. [61, s. 2] Optisen tien oma säteily, partikkelisirona sekä turbulenssi eli ilmakehän taitekerroinvaihtelut heikentävät kontrastia sekoittamalla maalin emittoimaan ja sirottamaan hyötysignaaliin, jolloin kohde erottuu taustasta huonommin. Ilmakehän kaasujen molekyylit ovat kuitenkin kooltaan niin pieniä, että niiden aiheuttama sirona ei ole merkityksellistä yli 0,3  $\mu\text{m}$ :n aallonpituuksilla. Hakupäissä käytettävien aallonpituuksien osalta sironnan merkittävin aiheuttaja on ilmakehässä esiintyvät muut partikkelit, kuten esimerkiksi pöly, erityyppiset vesipisarat ja jääpartikkelit. [61, s. 11–13] Infrapunahakupäessä käytettävällä aallonpituudella ei ole juurikaan vaikutusta sadepisaroiden aiheuttamaan sironaan ja absorptioon [61, s. 24]. Vesipartikkelit sirottavat säteilyä melko tasaisesti eri suuntiin. Käytännön tilanteissa etenemisvaimennus on kokonaan vesisateen tai sumun aiheuttamaa vaimennusta. [61, s. 11–13]

4  $\mu\text{m}$ :n aallonpituudella infrapunäsäteilyn vaimennuskerroin tyypillisessä ilmakehän kosteudessa 7,5  $\text{g}/\text{m}^3$  on 0,955 kilometrillä. Keskimääräisessä 4 mm/h sateessa vaimennuskerroin on 0,631 kilometrillä. Keskimääräisessä vesisateessa kilometrin päässä infrapunäsäteilyn energiasta on siis jäljellä 63 % ja 10 kilometrin päässä jäljellä on vain 1 %. [18, s. 39] Yleistykseenä voidaan todeta, että infrapunäsäteily vaimenee vesisateen vaikutuksesta keskimäärin noin 50 % ja käytännön mittausetäisyydet jäävät noin 2–5 kilometrin suuruisiksi. [18, s. 360]

## 6. VERTAILU

Vertailussa käytetään hierarkiapuun kriteereinä sään vaikutusta eri hakupääteknikoiden suorituskykyyn, häivetekniikan vaikutusta hakupään toimintaan, hakupään häirittevyyttä sekä muita ominaisuuksia. Hakupään häirittevyys -kriteerissä on lisäksi kaksi alakriteeriä, jotka ovat havaittavuus ja häirintämenetelmät. Vertailussa käytettävä hierarkiapu on esitetty kuvassa 13.



Kuva 13. Vertailussa käytettävä hierarkiapu

Sään vaikutusta arvioidaan sateiden ja ilman kosteuden vaikutuksella hakupään suorituskykyyn. Häivetekniikan vaikutusta arvioidaan luvussa 4 esiteltyjen esimerkkialusten kautta arvioimalla eri hakupääteknikoita vastaan kehitettyjen häiveominaisuuksien käyttöä. Hakupään häirittevyyttä arvioidaan alakriteerien avulla. Häirinnän onnistumisen edellytyksenä on ohjuksen havaitseminen, jotta siihen voitaisiin ylipäätään vaikuttaa. Häirintämenetelmiä arvioidaan vertaamalla menetelmäkirjoa eri hakupääteknikoita vastaan sekä erilaisten menetelmien tehokkuutta. Lisäksi arvioidaan erilaisten hakupääteknikoiden mahdollistamia muita ominaisuuksia, jotka eivät lukeudu edellä mainittuihin kriteereihin. Vertailtavina vaihtoehtoina on tutkahakupää ja infrapunahakupää. Infrapunahakupään oletetaan olevan moderni, kuvantava infrapunahakupää.

Kriteereiden keskinäisissä painoarvojen määrittämisessä lähestytään maalia ohjuksen näkökulmasta ulkokehältä ja painotetaan enemmän niitä kriteerejä, joilla on pisimpään vaikutusta ohjuksen hakupään toimintaan. Ensimmäisenä hakupäiden toimintaan vaikuttaa sää, jonka vaikutus alkaa välittömästi hakupään sensorin aloittaessa maalin etsinnän. Maalin löytymisen ja siihen lukkiutumisen tarvittavaan aikaan vaikuttaa maalissa käytettävät häivetekniset ratkaisut. Häivetekniset ratkaisut maalin kannalta eivät todennäköisesti kuitenkaan riitä ohjuksen väistämiseen, vaan tarvitaan lisäksi hakupään häirintää. Häirintätoimenpiteiden aloittamisen edellytyksenä on häirinnän kohteen eli ohjuksen havaitseminen ennen kuin harhamaaleja voidaan laukaista tai häirintää suunnata kohti

ohjuksen sensoria. Ohjuksen havaitseminen mahdollistaa myös asevaikutuksen kohdistamisen ohjukseen. Viimeisimpänä tekijänä vaikuttaa ohjuksen hakupään muut ominaisuudet, kuten esimerkiksi maalin luokittelu- ja tunnistuskyky sekä mahdollinen kyky valita osumakohta.

Edellä mainituilla perusteilla kriteerit painotetaan siten, että sään vaikutus arvioidaan hieman tärkeämmäksi (3) kuin maalin häivetekniset ratkaisut ja häirittevyys sekä selvästi tärkeämmäksi (5) kuin muut ominaisuudet. Maalin häiveteknisiä ratkaisuja sekä häirittevyyttä painotetaan yhtä paljon, joten ne arvioidaan keskenään yhtä tärkeiksi (1) ja selvästi tärkeämmäksi (5) kuin muut ominaisuudet. Häirittevyuden alakriteereistä ohjuksen havaittavuutta arvioidaan hieman tärkeämmäksi (3) kuin häirintämenetelmiä, sillä ohjuksen havaitseminen on edellytys häirintätoimenpiteiden toteuttamiselle ja se mahdollistaa lisäksi asevaikutuksen kohdistamisen ohjukseen.

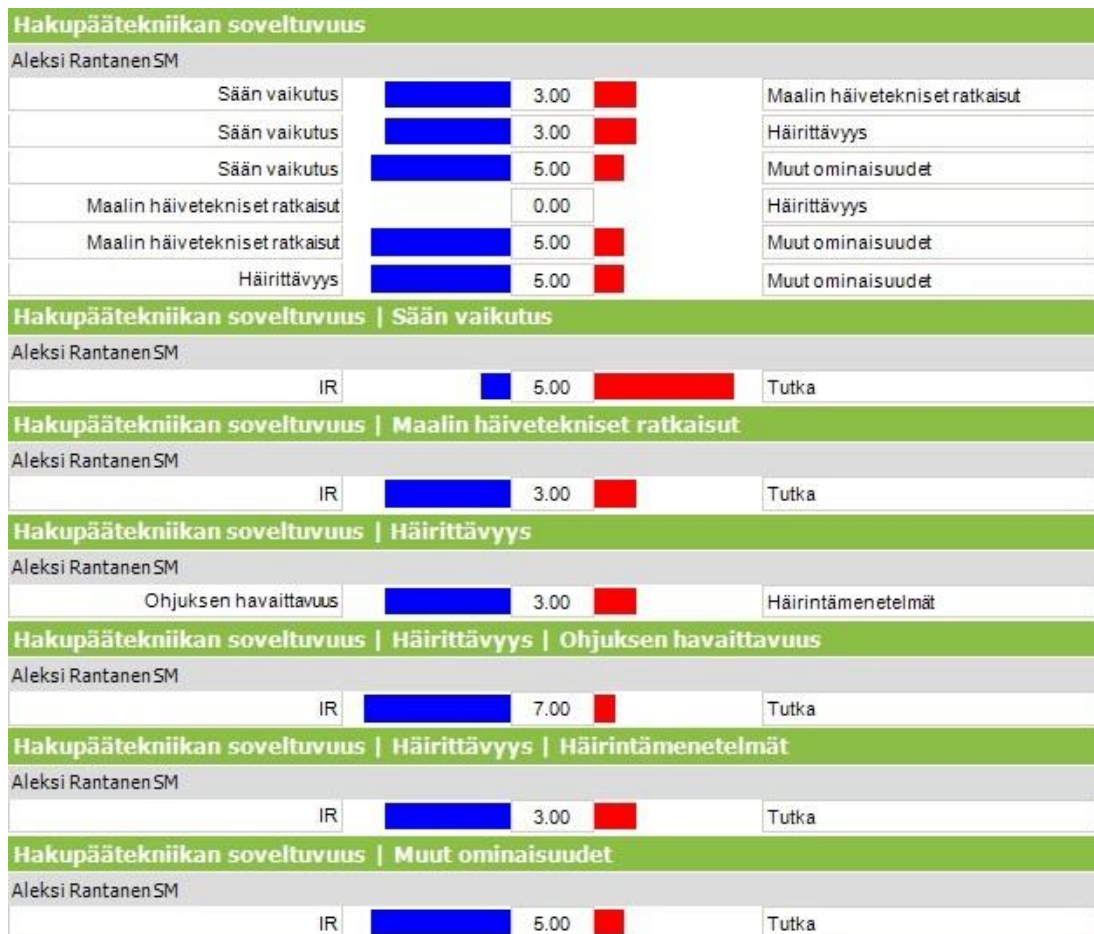
Vaihtoehtojen parivertailussa sään vaikutuksen osalta tutkahakupään arvioidaan olevan selvästi parempi (5) kuin infrapunahakupää. Vesisade ja sumu heikentävät tutkan suorituskykyä suhteellisen vähän. Aallokolla on jonkin verran vaikutusta tutkan suorituskykyyn, mutta sitä voidaan kompensoida signaalin käsittelyllä. Vesisateella ja sumulla sen sijaan on merkittävästi heikentävä vaikutus infrapunahakupään suorituskykyyn, etenkin kauko-infrapuna-alueella. Kauko-infrapuna-alueen heikkoa suorituskykyä voidaan hieman kompensoida kaksivärihakupäällä, joka käyttää lisäksi keski-infrapuna-alueella toimivaa ilmaisinta. Kaksivärihakupään ilmaisimen herkkyys on kuitenkin huonompi kuin yhtä aallonpituusaluetta käyttävän hakupään, sillä ilmaisimen pinta-ala joudutaan jakamaan kahdelle eri taajuusalueelle. Lisäksi keski-infrapuna-alue soveltuu kauko-infrapuna-aluetta huonommin alusmaaleja vastaan. Keski-infrapuna-alueen hakupäällä on tosin mahdollista löytää alusmaalista yksittäisiä kuumia kohteita, kuten esimerkiksi pakoputkia.

Maalin häiveteknististen ratkaisujen osalta infrapunahakupää arvioidaan hieman paremmaksi (3) kuin tutkahakupää. Tutkahakupäätä vastaan suunnitellut rakenteelliset ratkaisut, kuten esimerkiksi aluksen muotoilu, materiaalivalinnat sekä laitteistojen ja asejärjestelmien sijaintien optimointi tutkapaikkipinta-alan minimoimiseksi ovat varsin yleisiä. Näitä piirteitä on myös havaittavissa molemmissa aluksissa, jotka esiteltiin luvussa 4.2. Tutkapaikkipinta-alan minimointi on myös yleensä kompromissi aluksen fyysisen koon suhteen. Lisäksi RAM- ja RAS -rakenteet tulee optimoida tietyille taajuusalueelle, jolloin on tehtävä valintoja, millaista tutkaa vastaan häivemateriaaleilla halutaan suojautua. Infrapunahakupäätä vastaan alusten tyypilliset häivetekniset ratkaisut rajoittuvat reflektiivisyyttä ja emissiivisyyttä pienentävään maalaukseen. Luvussa 4.2. esitellyistä aluksista ainoastaan Braunschweig -

luokassa on kiinnitetty huomiota lämpöherätteen pienentämiseen pakokaasujen ohjauksella sekä rungon vesisuihkujäähdytyksellä. Steregushchy -luokan aluksissa pakokaasujen ohjaus pinnan alle ei ole mahdollista, sillä pakoputkiston ulostulot on aluksien kylkien sijasta sijoitettu korsteeniin.

Häirittävyuden osalta vaihtoehtoja vertaillaan alakriteerien avulla. Ohjuksen havaittavuuden osalta infrapunahakupää arvioidaan erittäin selvästi paremmaksi (7) kuin tutkahakupää. Ohjus voidaan havaita esimerkiksi maalin tutkalla, infrapunasensorilla tai elektronisen tuen järjestelmillä. Ohjuksen omaan tutkapoikkipinta-alaan ja lämpöherätteeseen ei kuitenkaan tässä tutkimuksessa oteta kantaa, joten niiden arvioidaan olevan samanlaiset eri hakupäättyypin omaavissa ohjuksissa. Tutkahakupään aktiivinen lähete paljastuu, kun ohjus aloittaa maalin etsimisen hakualueella. Infrapunahakupää sen sijaan on täysin passiivinen. Häirintämenetelmien osalta infrapunahakupää arvioidaan hieman paremmaksi (3) kuin tutkahakupää. Tutkahakupäätä vastaan suunniteltujen häirintä menetelmien kirjo on melko laaja ja niitä on yleisesti käytössä. Molemmissa luvussa 4.2. esitellyissä aluksissa oli käytössä silppua ampuvia harhamaaliheittämiä sekä häirintälähettämiä. Infrapunahakupäätä vastaan alukset oli suojattu vain soihtuja ampuvilla harhamaaliheittämillä. Kummassakin hakupäättyypissä on käytössä häirinnänväistöominaisuuksia, joilla voidaan vähentää häirinnän tai harhamaalien vaikutuksia. DIRCM -häirintälähettimet eivät vielä ole yleistyneet aluskäytössä.

Muiden ominaisuuksien osalta infrapunahakupää arvioidaan selvästi paremmaksi (5) kuin tutkahakupää. Kvantava infrapunahakupää mahdollistaa maalin luokittelun ja tunnistamisen sen siluetin perusteella. Tutkahakupäällä vastaava luokittelu perustuu ainoastaan tutkakaiun kokoon. Infrapunahakupään luokittelukyky mahdollistaa myös ei-haluttujen maalien lisäämisen ohjuksen maalikirjastoon, jolloin voidaan välttää ohjuksen osuminen esimerkiksi siviilialukseen. Kooste käytettyjen kriteereiden painoarvoista ja vaihtoehtojen hyvyyslukuista suhteessa toisiinsa on esitetty kuvassa 14.



Kuva 14. Kooste vertailussa käytetyistä painoarvoista

Edellä mainituilla kriteereillä ja vaihtoehdoilla sekä niille määritetyillä painoarvoilla ja hyvyyslukuilla laskennasta saatiin normalisoiduksi jakaumaksi tutkahakupäälle noin 51,5 % ja infrapunahakupäälle noin 48,5 %. Vertailun perusteella tutkahakupää on siis noin 6,2 % prosenttia parempi vaihtoehto kuin infrapunahakupää. Consistency ratio -suhdeluku vertailussa on 0,058. Luvun perusteella vertailua voidaan pitää johdonmukaisena, sillä suhdeluku on alle 0,1.



## 7. JOHTOPÄÄTÖKSET

Vertailun perusteella eri hakupäätetekniikat ovat käytännössä yhtä soveltuvia Suomen rannikon toimintaympäristöön vertailtujen kriteerien perusteella. Tutkahakupään hieman parempi tulos selittyy vertailun kriteereiden keskinäisellä painotuksella. Tutkahakupään parempi suorituskyky huonossa säässä ja sään vaikutuksen painottaminen on ratkaisevana tekijä tässä vertailussa, sillä infrapunahakupää arvioitiin paremmaksi kaikilla muilla osa-alueilla. Hyvissä sääolosuhteissa infrapunahakupää on kokonaisuutena selvästi parempi vaihtoehto.

Luvun 5 tilastojen mukaan rannikolla keskimäärin lähes joka kolmas päivä on sadepäivä ja vallitseva suhteellinen ilmankosteus vastaa utua tai heikkoa sumua. Heikkoja kuurosateita esiintyy vielä näiden lisäksi. Näissä olosuhteissa infrapunasaäteilyn eteneminen heikkenee jo merkittävästi. Tutkan suorituskykyyn vastaavilla sääolosuhteilla ei ole juurikaan vaikutusta. Voimakkaammassa sateessa tai sumussa säteilyn eteneminen huonontuu infrapunasaäteilyn osalta entisestään. Voimakkaiden sateiden sadepäivien lukumäärä on kuitenkin melko pieni. Hyvissä sääolosuhteissa ei ole merkittäviä hakupäättyyppien välisiä suorituskykyeroja.

Kehittyneet inertiasuunnistusjärjestelmät ja GPS -avusteinen hakeutumisen mahdollistavat ohjukset tarkan lentämisen maalialueelle, jolloin infrapunahakupään heikkoa suorituskykyä huonossa säässä voidaan tukea muilla ohjautusmenetelmillä. Tämä kuitenkin edellyttää, että ohjuksen GPS -vastaanotinta ei kyetä häiritsemään. Lisäksi maalinosoituksen on oltava mahdollisimman reaaliaikainen ja tarkka. Pitkän kantaman ohjusten pitkä lentoaika laukaisusta maaliin aiheuttaa maalinosoituksen epätarkkuuden kertautumista hakualueella. Ongelmaa voidaan kiertää varustamalla ohjukset datalinkillä, joka mahdollistaa maalitiedon päivittämisen ohjukselle myös laukaisun jälkeen.

Häivetekniset ratkaisut nykyaikaisissa sota-aluksissa ovat yleistyneet ja käytännössä jokaisessa uudessa sota-aluksessa on jonkinlaisia häiveteknisiä piirteitä. Yleisin ratkaisu on aluksen tutkapoikkipinta-alan pienentäminen muotoilulla ja materiaalivalinnoilla. Näitä ratkaisuja ei tosin ole välttämättä suoranaisesti kohdistettu ohjuksen hakupään tutkaa vastaan, sillä RAM -materiaalit tulee sovittaa kohdetutkan aallonpituuteen. Tällöin on rakennusvaiheessa tehtävä valintoja suojautumiseksi matalampia taajuuksia käyttäviä valvontatutkia vastaan tai korkeampia taajuuksia käyttäviä tulenjohto- ja hakupäätutkia vastaan.

Nykyaikaisissa sota-aluksissa lämpöherätteen pienentämiseksi tehdyt toimenpiteet ovat melko vähäisiä. Tyypillisin ratkaisu on emissiivisyyttä tai reflektiivisyyttä pienentävä maalaus, jolla pyritään vähentämään aluksen itse säteilemää tai aluksen heijastamaa infrapunasäteilyä. Lisäksi joissain aluksissa pyritään minimoimaan pakokaasujen aiheuttamaa yksittäistä kuumaa kohdetta sekoittamalla pakokaasujen sekaan vettä pakoputkistossa tai ohjaamaan pakokaasut veden alle. Lisäksi alusten suuria pintoja, kuten kylkiä, voidaan jäähdyttää merivedellä ympäri alusta sijoitettujen suuttimien avulla. Nämä ratkaisut eivät tosin ole kovinkaan laajalti käytössä. Lämpöherätteen pienentäminen tulee todennäköisesti kuitenkin yleistymään infrapunahakupäätä käyttävien meritorjuntaohjusten yleistymisen myötä.

Ohjuksen hakupään häirinnän edellytyksenä on ohjuksen havaitseminen. Infrapunahakupää on tässä suhteessa etulyöntiasemassa verrattuna tutkahakupäähän passiivisuutensa ansiosta. Tutkahakupää paljastuu nykyaikaiselle sota-alukselle lähes varmasti aloittaessaan maalin etsinnän. Tutkahakupää on meritorjuntaohjuksissa yleinen sensori, joten sitä vastaan on kehitetty lukuisia vastatoimia. Vastaavasti ohjusten valmistajat kehittävät menetelmiä harhautuksen ja häirinnän väistämiseksi. Infrapunahakupäätä vastaan erilaisten häirintämenetelmien kirjo on toistaiseksi pienempi. Sotilasilmailussa on kuitenkin käytössä suunnattavia infrapunahäirintälähettämiä, joilla pyritään vaurioittamaan tai tuhoamaan hakupään ilmaisin. Infrapunahakupäiden yleistyminen tulee todennäköisesti johtamaan myös aluskäyttöön suunniteltujen DIRCM -järjestelmien kehitykseen ja laitteiden yleistymiseen.

Ilmaisinmatriisilla toteutettu kuvantava infrapunahakupää mahdollistaa meritorjuntaohjuksilla tehtävään hyökkäykseen uusia ominaisuuksia verrattuna tutkahakupäähän. Kvantava infrapunahakupää kykenee itsenäisesti tunnistamaan maalin sen siluetin perusteella ja vertaamaan sitä ohjuksen muistissa olevaan uhkakirjastoon. Tällä periaatteella infrapunahakupäällä varustettu ohjus kykenee priorisoimaan ensisijaisen kohteen usean maalin joukosta, suodattamaan ei-halutut maalit, kuten esimerkiksi siviilialukset, pois maalien joukosta sekä valitsemaan tunnistetusta muodosta halutun osamakohdan. Osumakohdan valinnalla mahdollistetaan vaikuttaminen maalin kannalta kriittisiin kohtiin. Lisäksi kuvantava infrapunahakupää lisää ohjuksen käytettävyyttä yhteisoperaatioissa, sillä maaliksi voidaan ohjelmoida myös maakohde edellyttäen, että riittävä informaatio maalista on saatavilla ampuvalle yksikölle. Tämä lisää osumatodennäköisyyttä verrattuna nykyisissä ohjuksissa käytössä olevaan menetelmään, jossa maalle meritorjuntaohjuksin tehtävä hyökkäys tehdään ainoastaan inertipaikannukseen sekä GPS -paikannukseen perustuen.

Tässä tutkimuksessa toteutettu vertailu ja siinä käytetyt painoarvot sekä hyvyysluvut eivät perustu niinkään eksaktien mittaustulosten vertailuun ja sitä kautta paremman vaihtoehdon valitsemiseen, vaan tutkijan subjektiivisiin mielipiteisiin, joita on perusteltu teoriaosan havainnoilla. Kahden erityyppisen hakupäättekniikan tasapuolinen vertailu on vaikeaa, ellei jopa lähes mahdotonta. Vertailun toteuttaminen tasapuolisesti esimerkiksi simuloimalla kaikkia mahdollisia häviöitä erilaisissa sääolosuhteissa tuottaisi joka tapauksessa toista hakupäätetyppiä suosivan tuloksen. Samanlaiset sääolosuhteet vaikuttavat eri tavalla eri hakupäätetekniikoihin. Tutkasäteilyn tarvitsee kulkea edestakainen matka, kun taas infrapunasäteilyn tarvitsee kulkea vain matka säteilevästä tai heijastavasta kohteesta ilmaisimelle. Tasapuolisen maailtilanteen simuloiminen on vaikeaa, sillä hakupäiden sensorit mittaavat maalista eri taajuusalueiden sähkömagneettista säteilyä eivätkä maalin emittoima ja refleктоima infrapunasäteily sekä maalin heijastama ja sirottama tutkasäteily ole vertailukelpoisia. Erilaisten häviöiden simuloiminen ei myöskään riitä, sillä viime kädessä sensoreiden toiminta perustuu ilmaisukynnukseen ja signaalin käsittelyyn, joten pelkällä suhteellisten häviöiden mittaamisella ei voida selvittää pienintä ilmaisukynnystä, jolla maali voidaan havaita.

Tarkkaan tutkimustulokseen pääsemisen edellytyksenä olisi jonkin todellisen maalin tutkapoikkipinta-alan ja lämpöherätetasojen simulointi perustuen todellisiin mittauksiin sekä todellisten hakupäiden suorituskykyarvojen, kuten esimerkiksi ilmaisukynnysten, käyttäminen. Näiden perusteella voitaisiin simuloida hakupään suorituskykyä erilaisissa sääolosuhteissa perustuen suurimpaan mittausetäisyyteen tai kiinteään etäisyyteen.

## LÄHTEET

- [1] Rheinmetall Defence. *Moderne Flugkörperabwehr am Beispiel MASS<sup>TM</sup> – Multi Ammunition Softkill System*. Pdf -esitysmateriaali. [viitattu: 11.4.2016] Saatavissa: <http://www.camara-alemana.org.pe/downloads/121204-11-rheinmetall.pdf>
- [2] Kopp, C. *Warship Vulnerability*. Australian Aviation, july 2005. [viitattu: 11.4.2016] Saatavissa: <http://www.ausairpower.net/Warship-Hits.html>
- [3] Schulte, J. *An Analysis of the Historical Effectiveness of Anti-Ship Cruise Missiles in Littoral Warfare*. Pro Gradu -työ (Master's thesis). Monterey, 1994. Naval Postgraduate School. 48 s.
- [4] Lappalainen, E. & Jormakka, J. (toim.). *Tekniset tutkimusmenetelmät Maanpuolustuskorkeakoulussa*. Helsinki: Maanpuolustuskorkeakoulu, Tekniikan laitos, 2004. 203 s. ISBN 951-25-1540-7.
- [5] Saunders, M., Lewis, P. & Thornhill, A. *Research Methods for Business Students*. Sixth Edition. Essex: Pearson Education Limited, 2012. 696 s. ISBN 978-0-273-75075-8.
- [6] Lehtinen, M. *Operaatioanalyysia sotilaille*. Helsinki: Maanpuolustuskorkeakoulu, Tekniikan laitos, 2003. 69 s. ISBN 951-25-1461-3.
- [7] Salminen E. & Lehtinen, M. *Analyttinen hierarkiaprosessi. Expert Choice -ohjelman käyttö*. Helsinki: Maanpuolustuskorkeakoulu, Tekniikan laitos. 38 s. ISBN 951-25-1148-7.
- [8] Saaty, T.L. *The Analytic Hierarchy Process*. Pittsburgh: RWS Publications, 1996. 287 s. ISBN 0-9620317-2-0.
- [9] PvMatLE/elektroniikkaosasto, ohjusjaosto. *Ohjusoppi*. 10.12.2002. Lempäälä.
- [10] Heiskanen S. *Ohjustekniikan perusteita*. 1. painos. Kangasala: AR-kustannus, 1993. 136 s. ISBN 951-95821-3-4.
- [11] Payne, C.M. *Principles of Naval Weapon Systems*. Second Edition. Annapolis. United States Naval Institute. 2010. 412 s. ISBN 978-1-59114-667-4.

- [12] *Yleinen ase- ja asejärjestelmäopas*. Vammala: Puolustusvoimien Koulutuksen Kehittämiskeskus, 2001. 391 s. ISBN 951-25-1277-7.
- [13] Kosola J. & Solante T. *Digitaalinen taistelukenttä - Informaatioajan sotakoneen tekniikka*. Kolmas laitos. Helsinki 2013. ISBN 978-951-25-2503-4.
- [14] Ikonen, I. *GPS -asejärjestelmät, niiden käyttö ja häirittevyys*. Helsinki: Maanpuolustuskorkeakoulu, Tekniikan laitos. 2004. 90 s, ISBN 951-25-1556-3.
- [15] Kaukoranta, T., Hautala, J. & Kakkola, T. *Taisteluvälineet 2020*. Helsinki: Maanpuolustuskorkeakoulu, Tekniikan laitos. 2002. 124 s. ISBN 951-25-1324-2.
- [16] Kumar, R. *Defence of Surface Ships Against Anti Ship Missiles*. Pro gradu -työ (Master's thesis). Monterey, 1990. Naval Postgraduate School. 111 s.
- [17] Annati, M. *Miniaturization of anti-ship missiles*. Naval Forces, 2014. Vol. 35, no. 1, p. 56–60.
- [18] Fleeman, E. L. *Missile Design and System Engineering*. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc., 2012. 879 s. ISBN 978-1-60086-908-2.
- [19] Kari, M., Hakala, A., Pääkkönen, E. & Pitkänen, M. (toim.) *Sotatekninen arvio ja ennuste 2025. STAE 2025, osa 2. Puolustusjärjestelmien kehitys*. Ylöjävi: Puolustusvoimien Teknillinen Tutkimuslaitos. 2008. 279 s. ISBN 978-951-25-1891-3.
- [20] Pasivirta, P. (käänt.) *Teknisen kehityksen suuntalinjat*. Helsinki: Maanpuolustuskorkeakoulu, Tekniikan laitos. 2002. 216 s. ISBN 951-25-1338-2.
- [21] *RBS15*. IHS Weapons: Naval. 7.5.2015. [viitattu 8.2.2016] Saatavissa: <https://janes.ihs.com/Janes/Export/Stream/1499588/PDF>
- [22] Saab Dynamics AB. *RBS15 Missile System Family*. Valmistajan esite. [viitattu 8.2.2016] Saatavissa: [http://saab.com/globalassets/commercial/air/weapon-systems/air-to-surface-missile-systems/rbs15f/rbs15\\_missile\\_system\\_family\\_high.pdf](http://saab.com/globalassets/commercial/air/weapon-systems/air-to-surface-missile-systems/rbs15f/rbs15_missile_system_family_high.pdf)

- [23] Diehl BGT Defence. *RBS15 Mk3*. Valmistajan esite. [viitattu 8.2.2016] Saatavissa: [http://www.diehl.com/fileadmin/diehl-defence/user\\_upload/flyer/RBS15\\_e\\_03\\_2012.pdf](http://www.diehl.com/fileadmin/diehl-defence/user_upload/flyer/RBS15_e_03_2012.pdf)
- [24] Tringham, K. *German Navy unveils RBS 15 Mk 3 cruise missile*. Jane's Navy International. 27.9.2011. [viitattu: 8.2.2016]  
Saatavissa: <https://janes.ihs.com/Janes/Export/Stream/1208881/PDF>
- [25] *Third-generation Game: the evolution of RBS 15*. IHS Jane's International Defence Review. 7.9.2010. [viitattu: 8.2.2016]  
Saatavissa: <https://janes.ihs.com/Janes/Export/Stream/1107423/PDF>
- [26] *Surface attack solutions for K130*. Jane's Navy International. 13.9.2002. [viitattu: 10.3.2016] Saatavissa: <https://janes.ihs.com/Janes/Display/1204110>
- [27] Scott, R. *Pacing the Anti-Ship Missile Threat*. The Journal of Electronic Defense, 2012. Vol. 35, no. 10, p. 24–30. ISSN 0192-429X.
- [28] *NSM*. IHS Weapons: Naval. 7.8.2015. [viitattu 8.2.2016] Saatavissa: <https://janes.ihs.com/Janes/Export/Stream/1499802/PDF>
- [29] Albright, K. *Kongsberg Naval and Joint Strike Missile Update*. In: Precision Strike Annual Review (PSAR-14), Springfield, 18–19. maaliskuuta 2014. Virginia, USA. PDFesitysmateriaali. [viitattu 8.2.2016]  
Saatavissa: <https://janes.ihs.com/Janes/Export/Stream/1107423/PDF>
- [30] Scott, R. *Launching Norway's new spear*. IHS Jane's International Defence Review. Joulukuu 2014. Vol 47. [viitattu 8.2.2016]  
Saatavissa: <http://sveadiesel.se/militart/wp-content/uploads/2014/09/IDR-Kongsberg-reprint.pdf>
- [31] Kongsberg. *NSM Naval Strike Missile*. Valmistajan esite. [viitattu 8.2.2016] Saatavissa: [http://www.kongsberg.com/~/\\_media/KDS/Files/Products/Missiles/140304\\_nsm\\_screen.ashx](http://www.kongsberg.com/~/_media/KDS/Files/Products/Missiles/140304_nsm_screen.ashx)
- [32] Kopp, C. *Thermal Imaging Sensors*. Defence Today. NCW 101 Series. Part 6. [viitattu 3.2.2016]. Saatavissa: <http://www.ausairpower.net/SP/NCW-101-6.pdf>.

- [33] Kopp, C. *Heat-Seeking Missile Guidance*. Australian Aviation, march 1982. [viitattu 7.2.2016] Saatavissa: <http://www.ausairpower.net/TE-IR-Guidance.html>
- [34] Naval Meteorology and Oceanography Professional Development Detachment Atlantic. *Atmospheric Effects on EO Sensors and Systems*. Norfolk, VA: 2005
- [35] Pitkänen, M. *Alailmakehän heijastukset tutkatarajuuksilla*. Ylöjärvi: Puolustusvoimien Teknillinen Tutkimuslaitos, 2012. 45 s. ISBN 978-951-25-2312-2.
- [36] Kosola, J. & Jokinen, J. *Elektroninen sodankäynti. Osa 1 – Taistelun viiden dimensio*. Helsinki: Maanpuolustuskorkeakoulu, Tekniikan laitos. 2004. 223 s. ISBN 951-25-1554-7.
- [37] Thompson, J. & Vaitekunas, D. *IR Signature Suppression of Modern Naval Ships*. [viitattu: 10.3.2016] Saatavissa: [http://www.davis-eng.com/docs/papers/irss\\_paper.pdf](http://www.davis-eng.com/docs/papers/irss_paper.pdf)
- [38] Kari, M., Hakala, A., Pääkkönen, E. & Pitkänen, M. (toim.) *Sotatekninen arvio ja ennuste 2025. STAE 2025, osa 1. Teknologian kehitys*. Ylöjärvi: Puolustusvoimien Teknillinen Tutkimuslaitos. 2008. 564 s. ISBN 978-951-25-1889-0.
- [39] Uotila J. *Uncooled Infrared Imaging Sensors*. Kirjassa: Jormakka J. & Rissanen A. (toim.). *State-of-the-art in Sensors*. Helsinki: Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotatekniikan laitos, 2006. s.44–62. ISBN 951-25-1650-0.
- [40] Quaranta, P. *Missile Sensors and Homing Systems*. Military Technology, 2010. Vol. 34, no. 8, p. 52–58. ISSN 0722-3226.
- [41] Viau, C. R. *Expendable Countermeasure Effectiveness against Imaging Infrared Guided Threats*. [viitattu: 10.3.2016]  
Saatavissa: [http://tti-ecm.com/uploads/resources\\_technical/expendable%20countermeasure%20effectiveness%20against%20imaging%20infrared%20guided%20threats%20%28ewci%202012%29.pdf](http://tti-ecm.com/uploads/resources_technical/expendable%20countermeasure%20effectiveness%20against%20imaging%20infrared%20guided%20threats%20%28ewci%202012%29.pdf)
- [42] Chang, T. L. *The IR Missile (Spin-scan and Con-scan Seekers) Countermeasures*. Pro gradu -työ (Master's thesis). Monterey, 1994. Naval Postgraduate School. 71 s.

- [43] Kopp, C. *The Sidewinder Story. The Evolution of the AIM-9 Missile*. Australian Aviation, april 1994. [viitattu: 7.2.2016] Saatavissa: <http://www.ausairpower.net/TE-Sidewinder-94.html>
- [44] Adamy, D. *Imaging Trackers*. The Journal of Electronic Defense, 2013. Vol. 36, no. 7. p. 44–46. ISSN 0192-429X.
- [45] Liu, Y.; Wang, H. & An, W. *Hit Probability Analysis on Imaging Infrared Guidance Missile Disturbed by Laser*. Journal of Convergence Information Technology, 2012. Vol. 7, no. 15, p. 437–444.
- [46] Liu, Y. *Research on Laser Weapon Soft Damage to IR Seeker*. Journal of Computers, 2011. Vol. 6, no. 6.
- [47] Klemola, O. & Lehto, A. *Tutkatekniikka*. Kolmas painos. Helsinki: Otatiето, 1998. 266 s. ISBN 951-672-278-4.
- [48] Hall, P.; Garland-Collins, T., Picton, R. & Lee, R. *Radar*. Ensimmäinen painos. Brassey's, UK, 1991. 165 s. ISBN 0-08-037711-4.
- [49] Intelligentcomp. *Tracking Radar: Role of Technology in Defense Part-2*. [viitattu: 10.3.2016] Saatavissa: [http://1.bp.blogspot.com/OkKzvk0KA3Q/UJNTn9YocAI/AAAAAAAAAo8/qSj9-N\\_-f8s/s640/Picture6.jpg](http://1.bp.blogspot.com/OkKzvk0KA3Q/UJNTn9YocAI/AAAAAAAAAo8/qSj9-N_-f8s/s640/Picture6.jpg)
- [50] Chia, H. K. *A Simulation of a Combined Active and Electronic Warfare System for the Defence of a Naval Ship Against Multiple Low-Altitude Missiles Threat*. Pro gradu -työ (Master's thesis). Monterey, 1989. Naval Postgraduate School. 86 s.
- [51] *K130 corvette marks sea change for German Navy*. IHS Jane's Defence Weekly. 28.3.2002. [viitattu: 8.2.2016]  
Saatavissa: <https://janes.ihs.com/Janes/Export/Stream/1163575/PDF>
- [52] *Braunschweig (K130) class*. IHS Jane's Fighting Ships. 27.1.2016 [viitattu: 8.2.2016]  
Saatavissa: <https://janes.ihs.com/Janes/Export/Stream/1163575/PDF>



- [53] *Class 130 Corvette*. NATO's Nations & Partners for Peace. 2002. Vol. 2. p. 184–189. [viitattu 8.2.2016]  
Saataavissa: <http://web.b.ebscohost.com/ehost/pdfviewer/pdfviewer?sid=87516069-3005-48da-adc8-4de98b89825c%40sessionmgr113&vid=0&hid=128>
- [54] *K130 Class Corvette of the German Navy*. NATO's Nations & Partners for Peace, 2007. Vol. 52, no. 4, p. 96–98. ISSN 1566-9009.
- [55] *Mirador*. IHS Jane's C4ISR & Mission Systems: Maritime. [viitattu: 4.4.2016]  
Saataavissa: <https://janes.ihs.com/Janes/Display/1522620>
- [56] Fiszer, M. *German Navy receives ESM for K-130 corvettes*. Journal of Electronic Defense, 2005. Vol. 28, no. 1, p. 14–16. ISSN 0192-429X.
- [57] *Steregushchiy heralds a new Russian revolution*. IHS Jane's Navy International. 24.9.2007. [viitattu 9.2.2016] Saataavissa: <https://janes.ihs.com/Janes/Display/1202590>
- [58] *Steregushchiy class (Project 20380/20381/20385)*. IHS Jane's Fighting Ships. 7.1.2016 [viitattu: 9.2.2016] Saataavissa: <https://janes.ihs.com/Janes/Display/1356590>
- [59] *TK-25E series electronic warfare suite/jammer*. IHS Jane's C4ISR & Mission Systems: Maritime. 6.7.2015. [viitattu 9.2.2016]  
Saataavissa: <https://janes.ihs.com/Janes/Display/1747710>
- [60] Ilmatieteen laitos. *Ilman kosteus*. [viitattu: 4.4.2016]  
Saataavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/ilman-kosteus>
- [61] Nieminen, K. & Hyvärinen, T. *IR -kuvauksen erottelukykyyn vaikuttavien tekijöiden selvitys ja mallintaminen*. Helsinki: Maanpuolustuksen tieteellinen neuvottelukunta. Raporttisarja A. 1/A/91. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Elektroniikan laboratorio. 38 s. ISBN 951-25-0542-8.
- [62] Pirinen, P., Simola, H., Aalto, J., Kaukoranta, J-P., Karlsson, P. & Ruuhela, R. *Tilastoja Suomen ilmastosta 1981-2010*. Helsinki: Ilmatieteen laitos, Raportteja No. 2012:1, 2012. 96 s. ISBN 978-951-697-766-2.

**LIITTEET**

LIITE 1:	SÄHKÖMAGNEETTISEN SÄTEILYN JAOTTELU	1 s
LIITE 2:	SÄÄTILASTOT	4 s

**SÄHKÖMAGNEETTISEN SÄTEILYN JAOTTELU**

Taulukko 1. Infrapuna-alueen jaottelu [13, s. 80]

Jaottelu	Suomennot	Aallonpituus
Near Infrared (NIR)	Lähi-infrapuna	780 nm – 3 µm
Middle Infrared (MIR)	Keski-infrapuna	3–6 µm
Far Infrared (FIR)	Kaukoinfrapuna	6–15 µm
Extreme Infrared (XIR)	Ääri-infrapuna	15–1 000 µm

Taulukko 2. Radiotaajuisten säteilyn alueet [13, s. 61]

Lyhenne	Nimi	Taajuus	
ELF	Extremely Low Frequency	30–3 000 Hz	Radioaallot
VLF	Very Low Frequency	3–30 kHz	
LF	Low Frequency	30–300 kHz	
MF	Medium Frequency	0,3–3 MHz	
HF	High Frequency	3–30 MHz	
VHF	Very High Frequency	30–300 MHz	
UHF	Ultra High Frequency	0,3–3 GHz	
SHF	Super High Frequency	3–30 GHz	Mikro-aallot
EHF	Extremely High Frequency	30–300 GHz	

Taulukko 3. Tutkatabaajuuskaistat [13, s. 65]

Nimi	Taajuusalue
P	230 MHz – 1 GHz
L	1–2 GHz
S	2–4 GHz
C	4–8 GHz
X	8–12 GHz
Ku	12–18 GHz
K	18–26,5 GHz
Ka	26,5–40 GHz

**SÄÄTILASTOT**

Taulukko 1. Kaikkien havaintoasemien sadetilastojen keskiarvot [62]

<i>Kaikki</i>	<b>Sademäärä (mm)</b>				<b>Sadepäivät (lkm)</b>			
	Keskim	Suurin	Pienin	Suurin vrk	≥ 0,1 mm	≥ 1,0 mm	≥ 10 mm	
Kuukausi								
1	42,3	75,1	6,9	21,2	18,3	10,3	0,3	
2	31,7	84,8	2,9	23,7	14,7	8,0	0,0	
3	31,7	64,2	5,5	19,8	13,0	7,7	0,0	
4	25,3	58,8	3,5	19,0	10,7	6,0	0,0	
5	31,0	74,2	3,2	36,6	9,3	5,3	1,0	
6	45,0	103,3	7,3	30,0	11,3	7,3	1,3	
7	49,7	111,4	4,3	53,0	10,3	7,0	1,0	
8	65,3	141,1	4,4	48,5	12,7	9,0	2,0	
9	54,7	141,3	8,4	38,5	12,7	8,7	1,3	
10	63,0	131,2	19,3	32,4	48,3	10,7	2,0	
11	57,7	139,5	4,8	28,8	17,3	11,0	1,3	
12	50,3	97,3	11,0	22,3	18,3	11,0	1,0	
Vuoden KA	45,6	-	-	-	197	102	11	Yhteensä/v
			Sadepv	310	63,5 %	32,9 %	3,7 %	85,0 %
			Pv yht	365	54,0 %	27,9 %	3,1 %	

Taulukko 2. Utö sadetilastot [62]

<i>Utö</i>	<b>Sademäärä (mm)</b>				<b>Sadepäivät (lkm)</b>			
	Keskim	Suurin	Pienin	Suurin vrk	≥ 0,1 mm	≥ 1,0 mm	≥ 10 mm	
Kuukausi								
1	44,0	78,2	8,2	26,9	18	10	1	
2	31,0	76,1	3,0	21,9	14	8	0	
3	33,0	66,0	5,5	26,6	13	8	0	
4	26,0	57,9	1,6	21,0	10	6	0	
5	28,0	61,6	4,5	40,4	9	5	1	
6	41,0	83,8	6,1	34,9	10	6	1	
7	49,0	127,3	3,3	70,2	10	6	1	
8	59,0	150,7	8,9	40,5	12	9	2	
9	55,0	176,0	7,1	48,0	12	8	2	
10	65,0	129,4	23,9	29,8	16	11	2	
11	63,0	145,6	6,1	32,9	18	12	2	
12	55,0	101,2	13,8	29,1	18	12	1	
Vuoden KA	45,8	-	-	-	160	101	13	Yhteensä/v

Taulukko 3. Bågaskärin sadetilastot [62]

<b>Bågaskär</b>	<b>Sademäärä (mm)</b>				<b>Sadepäivät (lkm)</b>			
Kuukausi	Keskim	Suurin	Pienin	Suurin vrk	≥ 0,1 mm	≥ 1,0 mm	≥ 10 mm	
1	38,0	63,9	4,4	20,2	17	10	0	
2	28,0	79,8	2,6	18,6	13	7	0	
3	25,0	55,4	4,7	12,4	12	7	0	
4	24,0	57,0	3,4	17,5	11	6	0	
5	29,0	78,3	0,2	22,8	9	5	1	
6	42,0	91,0	10,9	24,2	12	8	1	
7	49,0	111,9	2,6	39,1	10	7	1	
8	73,0	143,4	2,9	61,1	13	9	2	
9	53,0	125,4	8,3	32,0	13	9	1	
10	59,0	121,1	21,1	36,8	114	10	2	
11	52,0	152,0	2,1	25,9	16	10	1	
12	45,0	76,1	10,3	16,8	18	10	1	
Vuoden KA	43,1	-	-	-	258	98	10	Yhteensä/v

Taulukko 4. Rankin sadetilastot [62]

<b>Rankki</b>	<b>Sademäärä (mm)</b>				<b>Sadepäivät (lkm)</b>			
Kuukausi	Keskim	Suurin	Pienin	Suurin vrk	≥ 0,1 mm	≥ 1,0 mm	≥ 10 mm	
1	45,0	83,2	8,1	16,6	20	11	0	
2	36,0	98,5	3,0	30,5	17	9	0	
3	37,0	71,1	6,4	20,3	14	8	0	
4	26,0	61,6	5,6	18,5	11	6	0	
5	36,0	82,8	4,8	46,7	10	6	1	
6	52,0	135,0	5,0	30,9	12	8	2	
7	51,0	94,9	7,1	49,8	11	8	1	
8	64,0	129,1	1,3	43,8	13	9	2	
9	56,0	122,6	9,8	35,5	13	9	1	
10	65,0	143,2	12,9	30,7	15	11	2	
11	58,0	120,9	6,3	27,6	18	11	1	
12	51,0	114,7	9,0	21,0	19	11	1	
Vuoden KA	48,1	-	-	-	173	107	11	Yhteensä/v

Taulukko 5. Kaikkien havaintoasemien suhteellisten ilmankosteuksien keskiarvot [62]

<b>Kaikki</b>	<b>Suhteellinen ilmankosteus (%)</b>				
	UTC-aika				
Kuukausi	00	06	12	18	Päivän KA
1	87	87,3	86,3	86,7	87
2	87,3	88,0	84,3	86,0	86,7
3	87,3	88,7	79,7	85,3	85,3
4	86,0	84,0	74,0	81,0	81,7
5	85,0	79,3	70,3	76,3	78,0
6	86,0	80,0	72,0	77,0	79,0
7	86,3	81,0	71,0	78,0	79,0
8	86,0	83,0	71,7	79,3	80,3
9	84,7	85,0	73,7	80,7	81,0
10	84,7	86,0	79,0	82,3	83,0
11	86,0	86,0	84,0	85,0	85,3
12	87,0	87,0	86,0	86,3	86,7
Vuoden KA	86,1	84,6	77,7	82,0	82,8

Taulukko 6. Utön suhteelliset ilmankosteudet [62]

<b>Utö</b>	<b>Suhteellinen ilmankosteus (%)</b>				
	UTC-aika				
Kuukausi	00	06	12	18	Päivän KA
1	85,0	86,0	85,0	85,0	85,0
2	86,0	87,0	85,0	85,0	86,0
3	86,0	88,0	82,0	86,0	86,0
4	86,0	85,0	77,0	83,0	83,0
5	86,0	83,0	75,0	79,0	81,0
6	87,0	83,0	76,0	80,0	82,0
7	87,0	83,0	74,0	80,0	81,0
8	85,0	83,0	74,0	80,0	81,0
9	82,0	83,0	75,0	80,0	80,0
10	82,0	83,0	79,0	81,0	81,0
11	84,0	84,0	83,0	83,0	84,0
12	84,0	84,0	84,0	84,0	84,0
Vuoden KA	85,0	84,0	79,0	82,0	83,0

Taulukko 7. Bågaskärin suhteelliset ilmankosteudet [62]

<b>Bågaskär</b>	<b>Suhteellinen ilmankosteus (%)</b>				
	UTC-aika				Päivän KA
Kuukausi	00	06	12	18	
1	88,0	88,0	87,0	87,0	88,0
2	88,0	88,0	84,0	86,0	87,0
3	88,0	89,0	79,0	85,0	85,0
4	86,0	83,0	73,0	80,0	81,0
5	84,0	78,0	69,0	75,0	77,0
6	85,0	78,0	71,0	75,0	77,0
7	86,0	80,0	70,0	77,0	78,0
8	87,0	83,0	71,0	79,0	80,0
9	87,0	86,0	73,0	81,0	82,0
10	87,0	88,0	79,0	83,0	84,0
11	87,0	87,0	85,0	86,0	86,0
12	88,0	88,0	87,0	87,0	88,0
Vuoden KA	87,0	85,0	77,0	82,0	83,0

Taulukko 8. Rankin suhteelliset ilmankosteudet [62]

<b>Rankki</b>	<b>Suhteellinen ilmankosteus (%)</b>				
	UTC-aika				Päivän KA
Kuukausi	00	06	12	18	
1	88,0	88,0	87,0	88,0	88,0
2	88,0	89,0	84,0	87,0	87,0
3	88,0	89,0	78,0	85,0	85,0
4	86,0	84,0	72,0	80,0	81,0
5	85,0	77,0	67,0	75,0	76,0
6	86,0	79,0	69,0	76,0	78,0
7	86,0	80,0	69,0	77,0	78,0
8	86,0	83,0	70,0	79,0	80,0
9	85,0	86,0	73,0	81,0	81,0
10	85,0	87,0	79,0	83,0	84,0
11	87,0	87,0	84,0	86,0	86,0
12	89,0	89,0	87,0	88,0	88,0
Vuoden KA	87,0	85,0	77,0	82,0	83,0