

MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU

TILANNEKUVAN MUODOSTAMINEN SEURAAVAN SUKUPOLVEN HÄVITTÄJÄSSÄ

Esiupseerikurssin tutkielma

Insinöörikapteeni
Kalle Passoja

Esiupseerikurssi 63
Ilmasotalinja

Huhtikuu 2011

Kurssi Esiupseerikurssi 63	Linja Ilmasotalinja
Tekijä Insinöörikapteeni Kalle Passoja	
Tutkielman nimi Tilannekuvan muodostaminen seuraavan sukupolven hävittäjässä	
Oppiaine, johon työ liittyy Sotatekniikka	Säilytyspaikka MPKK:n kurssikirjasto
Aika Huhtikuu 2011	Tekstisivuja 37
<p>TIIVISTELMÄ</p> <p>Tutkielmassa on tarkasteltu tilannekuvan muodostamista 5. sukupolven hävittäjässä. Tarkastelu on tehty kirjallisuusselvityksenä, jota on tuettu analysoimalla ja laskemalla suorituskykyarvoja muutamissa esimerkkitalanteissa. Tarkastelussa on keskitytty radiotaajuisten sensoreiden ja lentokoneiden keskinäisen verkottamisen suomien mahdollisuuksien arviointiin. Käytettävissä oleva sensoritekniikka tulee parantumaan huomattavasti nykyisiin 4. sukupolven hävittäjiin verrattuna. Aktiivisen, elektronisesti keilaavan tutkan ohella koneissa tulee olemaan tutkavaroitin rinnalla ESM-järjestelmä, joka on liki välttämätön modernien uhkasignaalien havaitsemiseksi riittävän etäältä. Verkottamalla hävittäjien ESM-järjestelmät keskenään, voidaan saavuttaa paikannustarkkuus, joka riittää ilmataisteluohjusten ja ilmasta/maahan-ohjusten laukaisuun. Tehokkaan verkottamisen mahdollistaa suurikapasiteettinen datalinkki, jonka havainnointi on äärimmäisen vaikeaa eikä se näin paljasta hävittäjää signaalillaan. Vaikka 5. sukupolven hävittäjästä puhuttaessa huomiota kiinnitetään ensisijaisesti sen häiveominaisuuksiin, tapahtuu myös tilannekuvaan vaikuttavissa järjestelmissä sellaista kehitystä, joka mahdollistaa täysin uusia toimintoja. Näin tulevaisuuden hävittäjäryhmä kykenee tarvittaessa tuottamaan tilannekuvan yksin, kun siihen aiemmin vaadittiin koko ilmapuolustusjärjestelmän tuki.</p>	
<p>AVAINSANAT</p> <p>Tilannekuva, 5. sukupolven hävittäjä, datalinkki, lähetinpaikannus, radiotaajuinen sensori, AESA-tutka</p>	

SISÄLLYSLUETTELO

TERMIT, LYHENTEET JA SYMBOLIT	iv
1 Johdanto	1
2 Radiotaajuusjärjestelmien perusteita	5
2.1 Radioaaltojen eteneminen	5
2.2 Sensorit	6
2.2.1 Tutka	6
2.2.2 ESM-vastaanotin ja tutkavaroitin.....	7
2.3 Lähettimen paikannus aikaeromenetelmällä	7
2.4 Radiotiedonsiirto	10
3 Radiotaajuisten sensoreiden hyödyntäminen.....	11
3.1 Tutka	11
3.1.1 AESA-tutka	11
3.1.2 Tutkan havaittavuus	15
3.1.3 Monipaikkatutka ilma-aluksessa	17
3.2 Passiivinen radioläheteiden havainnointi	18
3.2.1 Tutkavaroitin ja ESM-vastaanotin	18
3.2.2 Lähetinpaikannus.....	21
4 Datalinkit ja verkottuminen	25
4.1 Nykyiset taktiset datalinkit	25
4.2 Multifunction Advanced Data Link (MADL).....	27
4.3 Linkin havaittavuus.....	29
5 Johtopäätökset.....	32
LÄHTEET.....	38

TERMIT, LYHENTEET JA SYMBOLIT

AESA	Active Electronically Scanned Array
CDL	Common Data Link
CW	Continuous Wave
DD	Differential Doppler
DRFM	Digital Radio Frequency Memory
EIRP	Equivalent Isotropic Radiated Power
ESA	Electronically Scanned Array
ESM	Electronic Support Measures
FDOA	Frequency Difference of Arrival Differential Doppler, DD
FMCW	Frequency Modulated Continuous Wave
IFM	Instantaneous Frequency Measurement
IFDL	Intra/Inter Flight Data Link
ISAR	Inverse Synthetic Aperture Radar
ISTAR	Intelligence, Surveillance Target Acquisition, Reconnaissance
JSF	Joint Strike Fighter
LE-TDOA	Leading Edge-Time Difference of Arrival
LPI	Low Probability of Intercept
MADL	Multifunction Advanced Function Data Link
OFDMA	Orthogonal Frequency-Division Multiple Access
OODA	Observe Orientate Decide Act
PAK FA	Perspektivny Aviatsionny Kompleks Frontovoy Aviatsii
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RF	Radio Frequency
RMS	Root mean square
SAR	Synthetic Aperture Radar
TDOA	Time Difference Of Arrival
WIMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
λ	aallonpituus
δ	tutkapoikkipinta-ala
σ_τ	aikaeromittauksen mittausvirheen standardipoikkeama
σ_d	Doppler-taajuuksien eron mittausvirheen standardipoikkeama

σ_x	x-koordinaatin standardipoikkeama
σ_y	y-koordinaatin standardipoikkeama
b	vastaanottimien muodostaman kannan pituus
B	vastaanottimen kaistanleveys
c	valonnopeus
f	taajuus
F	kohinaluku
f_D	Doppler-taajuus
G_{ant}	antennivahvistus
G_R	vastaanottoantennin vahvistus
G_T	lähetyksantennin vahvistus
k	Boltzmannin vakio
L	antennin leveys
P	antennin pituus
P_R	vastaanotettu teho
P_T	lähetysteho
R	etäisyys
S/N	signaalikohinasuhde
$(S/N)_i$	signaalikohinasuhde korrelaattorin sisäänmenossa
$(S/N)_{min}$	<i>pienin sallittu signaalikohinasuhde</i>
$(S/N)_O$	signaalikohinasuhde korrelaattorin ulostulossa
T	lämpötila
T_d	Doppler-prosessointiin käytettävä integrointiaika FDOA-mittauksessa
v	nopeus
W	signaalin kaistanleveys
y	lähettimen etäisyys havainnoivien vastaanottimien muodostamasta kannasta

1 JOHDANTO

”Ilmataistelun A ja O on vastustajan näkeminen ensin. Hävittäjien keskinäisen taistelun tulokseen vaikuttaa ratkaisevasti se, että vastustaja havaitaan niin aikaisin kuin suinkin mahdollista, jotta voitaisiin päästä parhaaseen mahdolliseen lähtöasetelmaan” [1]. Tätä Saksan toisen maailmansodan aikaisten hävittäjäilmavoimien komentajan Adolf Gallandin havaintoa hyödynsi myös USA:n ilmavoimien eversti John Boyd kehittäessään tunnetun OODA (Observe Orientate Decide Act)-periaatteen. OODA-periaatteen mukaan taistelussa voittaa se osapuoli, joka pystyy toteuttamaan OODA-toimintaprosessin nopeammin [2]. OODA-prosessissa keskeisestä on tilannetietoisuus. Ensimmäisessä ja osin toisessa maailmansodasakin tilannetietoisuus perustui lähinnä lentäjän näköhavaintoihin. Tilannetietoisuutta pystyttiin parantamaan toisen maailmansodan aikana tutkien tullessa laajamittaisemmin käyttöön ja radioiden avulla kyettiin johtamaan hävittäjiä lähelle kohdetta. Varsinainen hävittäjätaistelu käytiin yhä näköyhteyden päässä. Maailmansotien jälkeen tutkat alkoivat lentokoneissa yleistyä ja ohjusten avulla taisteluja saatettiin nyt kyetä käymään näköyhteyden ulkopuolellakin. Hävittäjätutka paransi ohjaajan tilannetietoisuutta ratkaisevasti. 1900-luvun loppupuolella kehitettiin datalinkit, joiden avulla voidaan lähettää tietoa muista lentokoneista tai maasta suoraan ohjaamon näytöille. Näin saatava tiedustelu-, valvonta- ja johtamisjärjestelmien tuottama ja koostama tieto antaa ohjaajalle huomattavasti paremman tilannekuvan kuin hävittäjän omat sensorit voivat tuottaa. Sensoreiden ja datalinkkien tuottaman tilannekuvan merkitys kasvaa entisestään kun nykyohjuksia nopeammat, pitkän kantaman ramjet-ohjukset tulevat käyttöön tällä vuosikymmenellä. Tilannetietoisuuden merkitys ilmasodankäynnille näkyy esimerkiksi Iso-Britannian ilmavoimien strategiassa [3] ja ilmaoperaatiokonseptissa [4], joissa tulevaisuuden ilmasodankäynnissä hyvin keskeisenä nähdään kehittynyt johtamisjärjestelmä ja ISTAR (Intelligence, Surveillance, Target Acquisition, Reconnaissance)-kyky.

Nykyisen hävittäjä sukupolven seuraajavaihtoehtoja tarkastellaan usein erityisesti herätteiden hallinnan näkökulmasta. Lentokoneiden järjestelmissä tapahtuu kuitenkin myös merkittävää kehitystä ja tämä kehitys on huomioitava myös Suomessa F-18 Hornetin seuraajaa tarkasteltaessa.

Tilannetietoisuudelle on useita määritelmiä mm. ” A pilot’s continuous perception of self and aircraft in relation to the dynamic environment of flight, threats, and mission, and the ability to forecast, then execute tasks based on that perception [5].” Tilannetietoisuuteen vaikuttaa käytävissä oleva tilannekuva, jolle myös löytyy erilaisia määritelmiä näkökulmasta riippuen.

Nykysuomen sanakirjan mukaan ”tilannekuva on tiettyä tilannetta esittävä kuva tai kuvaus. Tilannekuva on tuokiokuva jostain. Se on tietystä tilanteesta saatu kuva tai käsitys” [6]. Iso-Britannian puolustusministeriön määritelmä tunnistetulle ilmatilannekuvalle [7] on ”An electronically-produced display from primary and secondary radar, and ESM sources covering a 3-dimensional volume of interest in which all detected air contact have been evaluated against specific threat parameters and then assigned a recognition category and track number.” Ohjaajan käytettävissä oleva tilannekuva voi sisältää sekä tunnistettuja että tunnistamattomia kohteita sekä maalla, merellä että ilmassa ja siksi edellä esitetty tunnistetun ilmatilannekuvan määritelmä ei ole mielestäni täysin kattava. Tässä työssä tilannekuvalla käsitetään eri sensorilähteistä ohjaajalle tuotettua kuvaa, jossa näkyy tunnistettuja ja/tai tunnistamattomia kohteita.

Suomen ilmavoimilla on tällä hetkellä pääkalustona käytössä F-18 C/D-hävittäjä, joka suunniteltiin pääosin 1970-luvulla, mutta järjestelmiä ja ohjelmistoja päivitetään edelleen. F-18:n ohella länsimaissa on laajasti käytössä saman aikakauden suunnittelun tuote F-16 ja näitä molempia kutsutaan yleensä 4. sukupolven hävittäjiksi. Yhdysvaltain kongressin määritelmän mukaan 4.5. sukupolven on 4. sukupolven hävittäjä (F-15, F-16, F-18), jonka tutkan, datalinkin ja avioniikan suorituskyky on kehittynyttä ja jolla on kyky käyttää kehittynyttä aseistusta[8]. 5. sukupolven hävittäjinä pidetään esimerkiksi yhdysvaltalaisia F-22 Raptor- ja F-35 Joint Strike Fighter (JSF)-hävittäjiä sekä venäläistä PAK FA-hävittäjää [9], joiden suunnittelussa huomio on kiinnitetty erityisesti herätteiden hallintaan. Toisaalta viidennen sukupolven hävittäjiä väittävät valmistavansa nekin yritykset, joiden hävittäjissä (esim. F-18 E/F sekä Eurofighter) tutkaherätteen minimointia ei ole yhtä painokkaasti huomioitu. Tässä tutkimuksessa seuraavan sukupolven hävittäjällä tarkoitetaan 5. sukupolven hävittäjiä, joiden suunnittelun keskeinen lähtökohta on ollut herätteiden hallinta sekä edistyneet sensori- ja datalinkijärjestelmät. Edistyneillä sensorijärjestelmillä tarkoitetaan tässä lukuisilla aktiivikomponenteilla toteutettua sähköisesti keilaavaa tutkaa (Active Electronically Scanned Array, AESA) ja edistyneellä datalinkijärjestelmällä erittäin suuren tiedonsiirtonopeuden omaavaa ja vaikeasti havaittavaa (Low Probability of Intercept, LPI) datalinkkiä. Kehittyneiden sensoreiden merkitystä 5. sukupolven hävittäjässä ovat korostaneet mm. JSF:n hankintaan päätyneet Norja[10] ja Kanada [11] vaatimuksissaan. Taktisten datalinkkien merkitys nykysukupolven hävittäjissä on osoitettu sekä tutkimuksella [12] että Suomenkin ilmavoimien käyttökokemusten perusteella ja datalinkki nousee tulevaisuudessa nykyistäkin merkityksellisemmäksi [13].

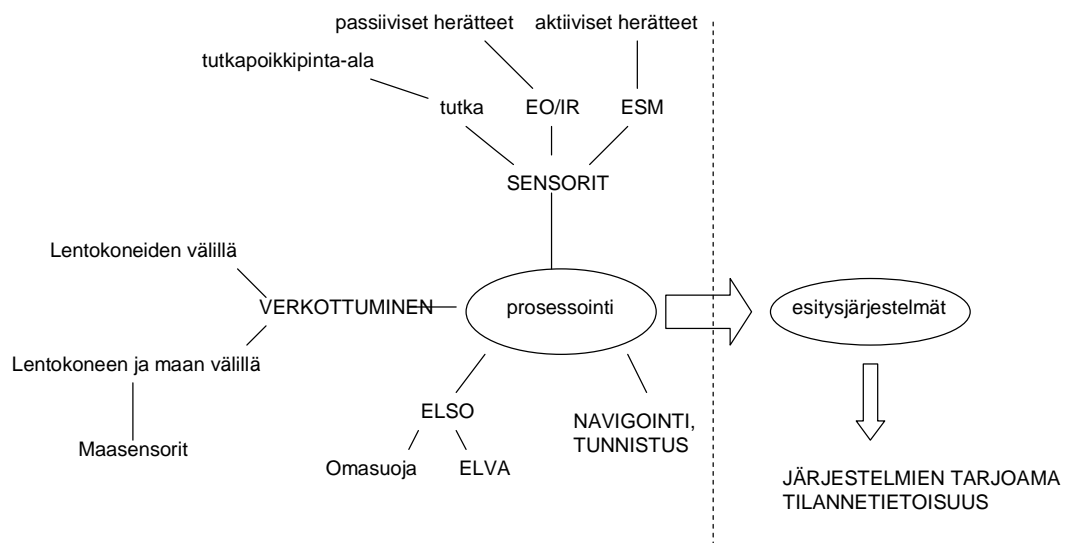
Tutkielman pääkysymys on, miten tilannekuva muodostetaan seuraavan sukupolven hävittäjässä. Pääkysymys on jaettu kahteen alakysymykseen: 1) mitkä ovat hävittäjien radiotaajuuksien (Radio Frequency, RF) sensoreiden kehitysnäkymät ja arvio suorituskyvyn parantumisesta 4. sukupolven hävittäjiin nähden ja 2) mitkä ovat hävittäjän datalinkkien kehitysnäkymät ja arvio verkottuneisuuden tarjoamista mahdollisuuksista sekä suorituskyvyn parantumisesta 4. sukupolven hävittäjiin nähden.

Optroniset sensorit tulevat myös olemaan oleellisena osana viidennen sukupolven hävittäjien sensorivalikoimaa, vaikkakin Suomessa sääolosuhteet heikentävät niiden käytettävyyttä. Ajankäytöllisistä syistä optronisia sensoreita sivutaan tässä työssä vain kevyesti. Ohjaajan tilannekuvan muodostumisen kannalta keskeistä on eri lähteistä tulevan pirstaleisen tiedon yhdistäminen luotettavasti, tarkasti ja helposti ymmärrettävällä tavalla. Esimerkiksi JSF-hävittäjässä [14] onkin panostettu huomattavasti sekä hajatiedon yhdistämiseen että sen havainnolliseen esittämiseen. Tähän asiaan liittyvän tarkastelun jätän kuitenkin tutkielmani ulkopuolelle, koska molempien toimintojen suorituskkyky on pitkälti kiinni implementoinnista ja sen arviointi on vaikeaa. Kuvassa 1 on esitetty käsittekartta, jossa on kuvattu tilannekuvan ja edelleen tilannetietoisuuden luomista hävittäjäohjaajalle. Tässä tutkielmassa ei käsitellä navigointijärjestelmiä ja omatunnuskyselijöitä ja sivutaan vain kevyesti omasuojaa sekä elektronista vaikuttamista, joilla voidaan heikentää vastustajan tilannetietoisuutta suhteessa omaan.

Tutkimusmenetelmä on kvalitatiivinen kirjallisuusselvitys, jota tuen matemaattisella analyysillä. Tutkittavina järjestelminä ovat taistelukurin havainnointiin tarkoitettu valvontavastaaotinjärjestelmä (Electronic Support Measures, ESM), AESA-tutka sekä lentokoneiden väliseen tiedonsiirtoon tarkoitettu hävittäjien välinen datalinkki. Tarkastelunäkökulman painopiste on ilmasta/ilmaan-tilanteissa, vaikka järjestelmiä voidaan käyttää myös ilmas- ta/maahan-operaatioissa.

Viidennen sukupolven hävittäjään liittyen on tehty Maanpuolustuskorkeakoulussa muutamia tutkielmia. Näissä tutkielmissa on käsitelty viidennen sukupolven hävittäjää yleisellä tasolla [15,16] tai häiveteknisestä näkökulmasta [17,18]. Tässä työssä käytetään lähinnä ulkomaisia lähteitä. Osa lähteistä käsittelee käytettäviä aihealuetta periaatteellisella tasolla ja näissä lähteissä, jotka tyypillisesti ovat oppikirjoja tai tiedeyhteisön esim. Institute of Electrical and Electronics Engineers:n julkaisuja, esitettyjen menetelmien, teorioiden ja tuloksien voidaan katsoa olevan pääsääntöisesti luotettavia. Tosin näidenkin osalta on huomioitava, että käytetyt

parametrit kuvaavat usein vain tiettyä tilannetta. Teorian ja simulointien antamat tulokset eivät myöskään käytännön sovelluksiin ja laitteisiin implementoituna usein saavuta osoitettua suorituskykyä. Käytän tutkielmassani lähteinä myös aikakauslehtiartikkeleita sekä yritysten ja puolustushallintojen tuottamaa aineistoa huomioiden kuitenkin niiden rajoitteet. Lehtiartikkelit ovat toisinaan pintapuolisia eivätkä luotettavuudessaan luonnollisestikaan tutkimustekstin tasolla, yritysten tuottamaa materiaalia taas leimaa paikoittain tarkoitushakuisuus. Tässä työssä käytetään kaikkia em. lähteitä, koska uusien järjestelmien parametreja on saatavilla lähinnä viimeksi mainituista lähteistä ja usein ei sieltäkään.



Kuva 1. Tutkielman käsitekartta hävittäjäohjaajan tilannetietoisuuden luomisesta.

2 RADIOTAAJUUSJÄRJESTELMIEN PERUSTEITA

Tässä luvussa käsitellään tutkielmaan liittyvien radiojärjestelmien peruseriaatteita sekä esittää kaavat ja menetelmät, joita käytetään esimerkkitalanteiden laskennassa luvuissa 3 ja 4.

2.1 Radioaaltojen eteneminen

Sähkömagneettinen säteily on poikittaista valonnopeudella c etenevää aaltoliikettä. Aallonpituus λ saadaan taajuuden f ja valonnopeuden c avulla:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

Mikäli radioaaltoa lähetetään liikkuvalla lähettimestä tai mikäli se osuu liikkuvaan kohteeseen, signaaliin syntyy Doppler-siirtymä, jota voidaan hyödyntää maalin nopeuden arvioinnissa, kohteen tunnistamisessa tai lähetinpaikannuksessa. Mikäli tutkan suuntaan liikkuu nopeudella v kohde, aiheuttaa se heijastuneeseen tutkataajuuteen Doppler-taajuuden f_D seuraavasti:

$$f_D = \pm \frac{2v}{\lambda} \quad (2)$$

Radioaaltojen etenemiseen vaikuttaa taajuusalue, maasto ja ilmakehän ominaisuudet. Lentokoneympäristössä käytettävät radiotaajuussensorit ja datalinkit toimivat useimmiten 100 MHz -20 GHz taajuusalueella. Näillä taajuusalueilla tärkein etenemismekanismi on eteneminen näköyhteysreitillä pitkin. Muutaman gigahertsin taajuudesta ylöspäin on tiedonsiirtoa arvioitaessa otettava huomioon myös ilmakehän aiheuttama vaimennus. Vastaanotettavan tehon suuruutta voidaan arvioida karkeasti etäisyyden, lähetetyn tehon, aallonpituuden ja käytettävien antennien vahvistuksen avulla. Lähetettäessä tehoa P_T vahvistuksen G_T omaavan antennin kautta näköyhteysolosuhteissa etäisyydellä r olevalle vastaanottimelle, saadaan vastaanottimen antenninvahvistuksen G_R jälkeen vastaanottimelle tuleva teho P_R seuraavasti:

$$P_R = G_T G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 P_T \quad (3)$$

Antennien ominaisuudet vaihtelevat käytettävän rakenteen mukaan. Antennin vahvistusta G_{ant} voidaan kuitenkin arvioida antennin fyysisten mittojen leveys L ja pituus P avulla seuraavasti [19]:

$$G_{ant} \leq \frac{4\pi LP}{\lambda^2} \quad (4)$$

Yhtälö antaa teoreettisen maksimivahvistuksen ja todellinen vahvistus on pienempi johtuen antennihäviöistä.

2.2 Sensorit

2.2.1 Tutka

Hävittäjäkoneiden tärkein sensori on tutka. Tutkan keskeisimmät tehtävät ovat seuraavat [20]:

- Maalin olemassaolon ilmaiseminen havaitsemalla maalista heijastunut kaikusignaali
- Maalin etäisyyden määrittäminen mittaamalla aika, joka tutkan lähettämältä sähkömagneettiselta pulssilta kuluu matkaan maaliin ja takaisin.
- Maalin suunnan selvittäminen kapeakeilaisen antennin avulla.
- Maalin nopeuden arvioiminen mittaamalla Dopplerin ilmiön aiheuttama lähetetyn ja vastaanotetun taajuuden ero.

Edellisten lisäksi tutka saattaa kyetä tunnistamaan maaleja perustuen esim. moottorin turbii-
nin tutkataajuuteen aiheuttamaan Doppler-siirtymään ("Jet Engine Modulation").

Tutkan havaintoetäisyyttä voidaan arvioida käytettävän tehon, antennivahvistuksen, vastaanottimen herkkyuden, taajuuden sekä kohteen tutkapoikkipinta-alan δ avulla. Jos tutkan lähetys- ja vastaanottoantennit ovat samat $G_T = G_R$, saadaan tutkan mittausetäisyys perusmuodossa [20]:

$$R = \sqrt[4]{\frac{P_T G_T^2 \lambda^2 \delta}{(4\pi)^3 P_R}} \quad (5)$$

Pienintä vastaanotettua tehotasoa, jolla informaation vastaanotto radiokanavan yli onnistuu vielä hyväksyttävällä virhetasolla, kutsutaan radiovastaanottimen herkkyudeksi. Mikäli yhtälössä (5) $P_R = P_{min}$, jossa P_{min} on pienin hyväksyttävään ilmaisuun riittävä teho, on P_R vastaanottimen herkkyys ja R tutkan maksimikantama. Herkkyys P_{min} voidaan ilmaista vastaanottimen sisään redusoidun kohinatehon ja pienimmän sallitun signaalikohinasuhteen $(S/N)_{min}$ tulona

$$P_{min} = kFT B(S/N)_{min} \quad (6)$$

k =Boltzmannin vakio= 1.38×10^{-23} Ws/K, F =kohinakerroin, T =lämpötila

B = vastaanottimen kaistanleveys

2.2.2 ESM-vastaanotin ja tutkavaroitin

Tutkaa tai muuta lähetettä havainnoivan vastaanottimen havaintoetäisyyteen vaikuttavat edellä esitetyn kaltaiset tekijät. Signaali, jonka teho on P_t ja jonka lähetysantennin vahvistus on G_T , voidaan havaita ESM-vastaanottimella tai tutkavaroitimella, mikäli signaalin taso vastaanottimessa ylittää vastaanottimen herkkyyden. Mikäli em. vastaanottimissa antennivahvistuksen oletetaan olevan 0 dB, voidaan maksimihavaintoetäisyyttä arvioida seuraavasti [21]:

$$R_{\max} = \sqrt{\frac{P_T G_T \lambda^2}{(4\pi)^2 (S/N)_{\min} kT_o B F}} \quad (7)$$

Tutkavaroitin on hyvin laajakaistainen eikä tarkasti tietyn signaalin aaltomuotoon sovitettu toisin kuin tutkan tai radiolinkkijärjestelmän vastaanotin. Verrattuna tutkan vastaanottimeen yhtälössä (7) olevat vaadittava signaalikohinasuhde $((S/N)_{\min})$ ja kaistanleveys (B) ovat ESM-vastaanottimessa ja tutkavaroitimessa suurempia, mikä pienentää vastaanottimen herkkyyttä ja maksimihavaintoetäisyyttä verrattuna esim. tutkan vastaanottimeen.

2.3 Lähettimen paikannus aikaeromenetelmällä

Lähettimen paikannus nykyaikaisella taistelukentällä on tärkeää hyvän tilannekuvan muodostamiseksi. Lähettimen paikannus perustuu yleensä signaalin tulokulman, Doppler-eron (Frequency Difference of Arrival, FDOA) tai kulkuajavaihteiden (Time Difference Of Arrival, TDOA, aikaeromittaus) [22] mittaamiseen. Tulokulmamittaus on perinteisempi ja laajasti käytetty menetelmä, aikaeromittaus taas teknisesti haastavampi uudempi menetelmä, jota tässä tarkastellaan yhdessä Doppler-eromittauksen kanssa.

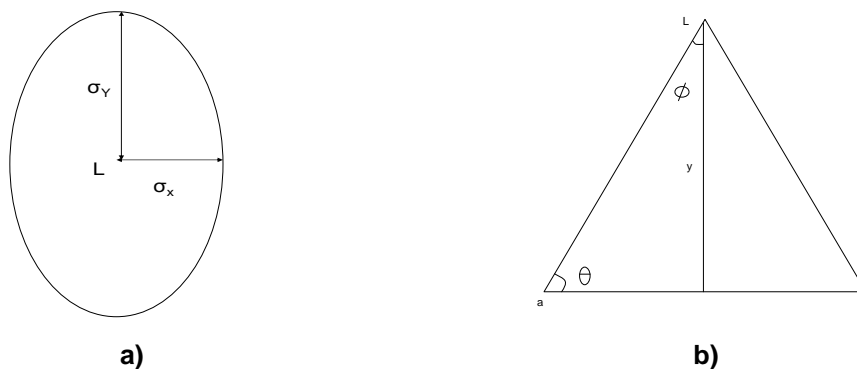
Aikaeromittauksessa paikannus perustuu signaalin kulkuajavaihteisiin. LE-TDOA (Leading Edge-Time Difference of Arrival)-menetelmässä ESM-vastaanottiin tulevien pulssien/signaalien nousevan reunan tuloaika mitataan. Kun pulssin tuloaikaa verrataan eri paikoissa sijaitsevien ESM-vastaanottimien välillä, saadaan selville lähettimen sijainti. Menetelmä vaatii hyvän tiedonsiirtoyhteyden. Paikannustarkkuus riippuu vastaanottimien ja lähettimen keskinäisistä sijainneista ja siitä, kuinka tarkasti pulssin reuna kyetään mittaamaan. Jälkimmäinen riippuu mm. signaalien voimakkuudesta, signaalin nousevan reunan muodosta ja vastaanottimien keskinäisestä ajan tarkkuudesta. Edellytyksenä on, että signaali on pulssimaista tai siinä on digitaalisille läheteille ominaisia nousevia reunoja. TDOA-menetelmän hyödyntäminen lentokoneissa tapahtuvaan paikantamiseen on yleensä vaikeampaa keskinäisen tie-

donsiirtoyhteyden tarjoaman tiedonsiirtokapasiteetin vähäisyyden vuoksi. Lentokoneiden välisen tiedonsiirtokapasiteetin kasvaessa voidaan aikaeromittaustakin hyödyntää. Lähteen [22] mukaan TDOA-menetelmä sopii pulssimaisiin lähetteisiin eikä sovi lainkaan koodaamattomiin jatkuvan kanta-aallon (Continuous Wave, CW) signaalien havaitsemiseen. Ilmeisesti kirjoittajat ovat tarkoittaneet nousevan reunan havaitsemiseen perustuvaa LE-TDOA-menetelmää. Signaalien keskinäiseen korrelointiin perustuvan TDOA-menetelmää voidaan käyttää lähes kaikenlaisia signaaleja vastaan, mutta aivan erityisen hyvin se sopii laajakais- taisten CW-signaalien havaitsemiseen[21]. Menetelmässä eri vastaanottimissa vastaanotetut signaalit voidaan siirtää samaan paikkaan keskitetysti korreloitavaksi. Menetelmän avulla voidaan havaita paremmin heikkoja LPI-signaaleja tai jatkuvaa lähetettä esim. taajuusmodu- loituja kanta-aaltotutkia eli FMCW-tutkia.. Menetelmä vaatii paitsi prosessointikykyä niin myös erittäin hyviä tiedonsiirtoyhteyksiä. Kuitenkin yhä yleisemmiksi tulevien LPI-signaalien havaitsemiseksi menetelmä olisi houkutteleva.

Doppler-eromenetelmä hyödyntää mittauksessa havaittavaa lähettimen tai vastaanottimen liikkeestä vastaanotettuun signaaliin syntyvää Doppler-taajuuksien eroa. Doppler-ero riippuu vastaanottimien ja lähettimen keskinäisistä sijainneista ja edellyttää, että joko lähettimen tai ainakin osan vastaanottimista tulee olla liikkuvia. Doppler-eromenetelmä sopii lentokoneym- päristöön luontevasti, koska lentokoneen eteneminen tarjoaa menetelmässä tarvittavan liik- keen Doppler-eron syntymiseksi. Mittaamalla tyypillisesti muutamien sekuntien ajan signaa- lia saadaan Doppler-taajuus selville[21] ja sen perusteella signaalin tulosuunta.

Aikaero- ja Doppler-eromenetelmien käyttämistä puoltaa useampi seikka. Jo kahdella senso- rilla saadaan yksikäsitteinen paikka ja menetelmät myös täydentävät hyvin toisiaan. Aikaero- menetelmä sopii hyvin suunnanmääritykseen ja Doppler-eromenetelmä taas etäisyyden määri- tykseen. Hyödynnettäessä molempia menetelmiä yhdessä (TDOA/FDOA) yhdessä voidaan lähetteet paikantaa kymmenien metrien tarkkuudella[23].

Paikannettaessa maalia on paikannustarkkuus keskeinen arviointikriteeri menetelmän hyödyllisyyttä tarkasteltaessa. Jos mittauksen suuntavirhe on normaalijakautunut, voidaan paikan- nustarkkuutta kuvata virhe-ellipseillä, joissa kohteen oletettu paikka on 50% todennäköisyy- dellä ellipsin sisällä[21]. Kuvassa 2a on esitetty virhe-ellipsi sekä x- ja y- koordinaattien pai- kannusvirheiden standardipoikkeamat σ_x ja σ_y .



Kuva 2. Lähettimen paikannusvirhettä kuvaava virhe-ellipsi (a) ja esimerkki lähettimen paikannusgeometriasta (b), jossa kolmion kärjessä on paikannettava lähetin L ja paikannukseen käytetään vastaanottimia paikoissa a ja b.

Oletetaan kuvan 2b mukainen geometria, jossa on aluksi kaksi vastaanotinta paikoissa a ja b ja vastaanottimet hyödyntävät TDOA/FDOA-menetelmää. Vastaanottimet vaihtavat keskenään tietoja havaitsemistaan signaaleista. Paikannettavan lähettimen x-koordinaatin standardipoikkeama (neliöllinen keskiarvo) σ_x saadaan seuraavasti[21]:

$$\sigma_x = \frac{c\sigma_\tau \sqrt{(ab/2)^2 + y^2}}{ab} \quad (8)$$

σ_τ = aikaeromittauksen mittausvirheen standardipoikkeama

ab = vastaanottimien välisen kannan pituus

y = lähettimen etäisyys kannasta

TDOA/FDOA-menetelmässä x-koordinaatin tarkkuuteen vaikuttaa siis aikaeromittauksen mittausvirhe kuten yhtälöstä (8) voi päätellä. Y-koordinaattiin vaikuttaa Doppler-eromittauksen mittausvirhe. Y-koordinaatin standardipoikkeamaa voidaan arvioida seuraavasti [21]:

$$\sigma_y = \lambda\sigma_{fd} \frac{[(b/2)^2 + y^2]^{3/2}}{vby} \quad (9)$$

σ_{fd} = Doppler-taajuuksien eron mittausvirheen standardipoikkeama

v = vastaanottimien nopeus

Jotta menetelmillä saavutettavaa paikannustarkkuutta voidaan arvioida, tarvitaan yhtälöissä (8) ja (9) tietoa sekä Doppler- että aikaeromittauksen mittaustarkkuudesta. Mittaustarkkuuteen vaikuttaa signaaleja keskenään korreloivassa vastaanottimessa verrattavien signaalien signaalikohinasuhde, signaalien kaistanleveys ja käytettävissä oleva integrointiaika. Korrelaatiomenetelmää hyödynnettäessä voidaan signaalimittauksen standardipoikkeamia arvioida signaalin

kaistanleveyden W , integrointiajan T_d sekä korrelaattorin ulostulon signaalikohinasuhteen $(S/N)_o$ avulla seuraavasti:

$$\sigma_\tau = \frac{1}{W\sqrt{2(S/N)_o}} \quad (10)$$

$$\sigma_{fd} = \frac{1}{T_d\sqrt{2(S/N)_o}} \quad (11)$$

$$(S/N)_o = WT \frac{1}{\left[1 + \frac{1}{(S/N)_{i1}}\right] \left[1 + \frac{1}{(S/N)_{i2}}\right]} \quad (12)$$

jossa

$(S/N)_{i1}$ =vastaanottimelta 1 tulevan signaalin signaalikohinasuhde korrelaattorin sisäänmenossa

$(S/N)_{i2}$ =vastaanottimelta 2 tulevan signaalin signaalikohinasuhde korrelaattorin sisäänmenossa

Kahden eri lentokoneen vastaanottaman signaalin korrelointiin perustuva TDOA-järjestelmä voi havaita signaaleja, joita yksittäinen vastaanotin ei havaitse. Tämän voi todeta asettamalla kaavassa (4) sisäänmenon signaalikohinasuhteiksi $(S/N)_i = 1$, jolloin $(S/N)_o$ voi WT :stä riippuen olla hyvinkin iso. Mitä suurempi on vastaanottimien välinen tiedonsiirtokanava, sitä tarkemman vertailun ja signaalien korreloinnin vastaanottimet voivat tehdä

2.4 Radiotiedonsiirto

Radiotiedonsiirron suorituskykyä on vauhdittanut eritoten siviilipuolella tehty kehitystyö. Siviilikäytössä radiotiedonsiirtomenetelmien tavoitteina on parantaa tiedonsiirtokapasiteettia ja virheettömyyttä. Virheitä tiedonsiirtoon aiheuttaa radiokanavan vaimennus ja heijastukset sekä eri käyttäjien keskinäishäiriöt. Käytetyt virheiden korjaus- ja ehkäisymenetelmät tehoavat usein myös tahallisiin häiriöihin ja siviilisektorin tiedonsiirtomenetelmiä voidaan hyödyntää arvioitaessa sotilastiedonsiirron suorituskykyä. Radiotiedonsiirrossa yhteysetäisyyksiä voidaan arvioida yhtälön (7) avulla. Vastaanottimen herkkyys riippuu mm. valitusta modulaatiosta, kanavakoodauksesta, bittinopeudesta, radiokanavan ominaisuuksista ja vastaanottimen toteutuksesta. Radiokanava poikkeaa lentokoneiden yhteyksissä jonkin verran maanpäällisistä yhteyksistä. Lentokoneympäristössä kanava on usein suora näköyhteys ja monitie-etenemisen vähäisyys helpottaa radiojärjestelmäsunnittelua, toisaalta suuret doppler-siirtymät heikentävät vastaanotinten suorituskykyä.

3 RADIOTAAJUISTEN SENSOREIDEN HYÖDYNTÄMINEN

3.1 Tutka

3.1.1 AESA-tutka

Keskeinen muutos tutkatekniikassa on AESA-tutkien käyttöönotto, mikä parantaa selvästi tutkien suorituskykyä. AESA-tutka toimii perinteisiin tutkiin nähden nopeammin ja joustavammin. Se pystyy suojautumaan paremmin häirinnältä, havaitsemaan kohteen kauempaa sekä seuraamaan useampia maaleja samanaikaisesti, mutta kuitenkin tarkasti [24]. Toisaalta myös kohteiden havaittavuus heikentyy uusien lentokoneiden tutkapoikkipinta-alan pienene-
misen myötä. AESA-tutkia ollaan ottamassa myös jo nyt käytössä oleviin hävittäjiin.

AESA-tutka perustuu lukuisten pienehköjen lähetin-vastaanotin-antennimodulien tuottamaan signaaliin. Sähköinen keilaus mahdollistaa erittäin nopean keilan siirron, joka on suuruusluokaltaan noin 100 kertaa nopeampi[25] verrattuna perinteiseen mekaanisesti ohjattuun anteniin ja seurantoja voidaan tehdä laajemmalla alueella. Nopean keilansiirron vuoksi se kykenee helposti seuraamaan liikehtiviä kohteita ja sovittamaan toimintaparametrinsa esim. päivitysvälin ja valaisuaajan kohteen mukaan parantaen näin havaitsemistodennäköisyyttä[26]. Samoin se mahdollistaa joustavan keilanmuodostuksen siten, että AESA-tutkalla kyetään seuraamaan montaa maalia tai toimimaan ilmasta/ilmaan tai ilmasta/maahan-moodeissa samaan aikaan usealla eri keilalla. Se voi muodostaa häirinnän suuntaan keilan nollakohdan, jolla minimoidaan häirinnän vaikutus. AESA-tutkalla saadaan parempi keilanmuodostus myös synteettisen apertuurin tutkakäyttöön (Synthetic Aperture Radar, SAR) ja käänteisen synteettisen apertuurin tutkakäyttöön (Inverse SAR, ISAR) [27]. ISAR-toiminnon avulla kyetään saamaan kohteesta tarkka kuva, jota voidaan hyödyntää kohteen tunnistuksessa. ISAR-toiminta vaatii kohteen liikkumisen siten, että kohteesta saadaan heijastuneita tutkasignaaleja eri kulmista tarkan kuvan muodostamiseksi. F-22:n tutkassa on tietävästi ISAR-toiminto, jonka avulla se kykenee tunnistamaan uhkan kaukaa hyökkäyspäättöstä helpottamaan[28]. Tutkan kuvantamiskyky noussee tärkeäksi sikäläkin, että koska hävittäjien moottorit ja ilmaottoaukot pyritään yhä paremmin suojaamaan tutkasäteilyltä havainnoin vaikeuttamiseksi, moottorin tutkasignaaliin aiheuttama modulaatio tasoltaan oletettavasti heikkenee ja tähän perustuva tunnistus vaikeutuu.

AESA-tutkan etu on parempi luotettavuus, koska yksittäisten lähetin-/vastaanotinmodulien rikkoutuminen ei juuri vaikuta kokonaissuorituskykyyn ja tutkassa ilmenevien kriittisten viikkojen vähenee merkittävästi jopa yli viisinkertaisesti[29]. Sähköisen keilanmuodostuksen avulla havaintoetäisyys on myös suurempi kuin perinteisellä tutkalla, koska lähetysteho kasvaa ja vastaanottimen kohinaluku pienenee. Lähteessä [29] oli verrattu aktiivisen ja passiivisen (Electronically Scanned Array, ESA, antenni, jossa keilan muokkaus on toteutettu pelkästään vaihesiirtimillä) elektronisesti keilaavan antennin avulla toteutetun tutkan vastaanottimen kohinalukua. Johtuen erilaisista siirtolinjojen ja vaihesiirtimien aiheuttamista vaimennuksista kohinaluvun on arvioitu olevan ESA:tutkassa noin 3 dB suurempi. Oletettavasti myös vähäkohinainen etuvahvistimen kohinaluku on uudemmalla teknologialla ainakin hieman pienempi. Vastaavalla tavalla lähetinpuolella on ESA-tutkassa ja mekaanisesti keilaavassa antennissa säteilytehoa pienentäviä vaimennuksia. AESA-tutkassa on myös vahvistimien tuottama kokonaisteho kehittyneemmän teknologian vuoksi suurempi kuin perinteisissä tutkissa. Lähteessä [29] on arvioitu uusien AESA-tutkien antavan noin 50% kasvun havaintoetäisyyksiin verrattuna edellisen sukupolven tutkiin (havaintoetäisyydet ovat taulukossa 1). Viidennen sukupolven hävittäjien tutkapoikkipinta-ala on kuitenkin pieni. JSF:n tutkapoikkipinta-alan esitetään olevan alle 0.1% nykyisten hävittäjien tutkapoikkipinta-alasta [29]. Tällöin tutkayhtälön (5) avulla voidaan laskea AESA-tutkallakin saavutettavan havaintoetäisyyden pienentyvän noin 75% verrattuna nykytutkien havaintoetäisyyksiin nykyisiä maaleja vastaan.

	F-16, Mig-29	F-15C, SU-27	F-18 E/F	F-15C AESA	JSF	F-22
Havaintoetäisyys (meripeninkulma)	45	60	80	90	95	125

Taulukko 1. Hävittäjätutkien havaintoetäisyyksiä tutkapoikkipinta-alaltaan 1 m²:n maaliin[29].

Uusien koneiden tutkien havaintokykyä pyritään kasvattamaan myös laajentamalla avaruudellista havaintoaluetta. Ruotsalaisen SAAB:n uusi AESA-tutka kykenee katsomaan paremmin sivuille, koska AESA-antennia voi kääntää myös mekaanisesti, jolloin saavutetaan laajempi tilannekuva sekä ilmasta/ilmaan- että ilmasta/maahan-toiminnassa. SAAB:n mukaan havaintoalue ± 100 astetta[30]. Tästä saavutettava etu erityisesti näkökantaman ulkopuolella käytävässä ilmataistelussa on päivitysväistö 90 asteen kulmalla, jolloin maalin voi pitää edelleen tutkalukossa. AESA-tutkalla saavutetaan mainitulla järjestelyllä myös pienempi tutkapoikkipinta-ala[31].

Venäläisten kehitteillä oleva PAK FA on tutkiensa puolesta monessa suhteessa innovatiivinen. PAK FA:ssa on tämän hetkisten tietojen [32] mukaan Tikhomorov NIIP X-alueen AESA-tutka, jossa on noin 1500 aktiivista lähetin-/vastaanotinmodulia ja jonka havaintoetäisyys-

deksi valmistaja väittää 400 km maaliin, jonka tutkapoikkipinta-ala on 1 m^2 . Ohjaamon sivulla on myös pienehköt kiinteät tutka-antennit eli eräänlaiset ”sivututkat”. Edessä olevan tutka-antennin halkaisija on noin 1 metri, jolloin pinta-ala on 0.785 m^2 . Kuvien perusteella X-alueen sivututka-antennien koko voisi olla kertaluokkaa $0.4 \times 0.5 = 0.2 \text{ m}^2$. Mikäli oletetaan, että ohjaamon sivuilla olevissa X-alueen ”sivututkissa” käytetään vastaavaa tekniikkaan kuin koneen nokalla olevassa ”pääutkassa”, voidaan yhtälöiden (4) ja (5) avulla ”sivututkien” havaintoetäisyyden laskea olevan noin 50% päätutkan havaintoetäisyydestä. Arvio on vain suunta-antava, koska antennien kokoa voi arvioida vain hahmotelmakuvien perusteella. Suorituskykyä voi heikentää esimerkiksi sijoitus rakenteiden sisään, mikä väistämättä rajoittaa havainnointialuetta. Samoin antennin suuntaavuuden mahdollistama suuntatarkkuus on heikompi pienemmän antennin myötä. Sivuantennit parantavat selvästi PAK FA:n lentäjän tilannetietoisuutta eikä vastaavia tutkia ole muissa hävittäjissä toistaiseksi käytetty. JSF:ssä lentäjän tilannetietoisuutta sivusuunnissa luodaan elektro-optisella lämpökamerajärjestelmällä (”Distributed aperture system”). Suomalaisessa säässä tällainen optroniikkaan perustuva ratkaisu on usein havaintoetäisyydeltään paljon tutkaan perustuvaa järjestelmää heikompi.

Toinen länsihävittäjistä poikkeava suunnitteluratkaisu on L-aaltoalueen tutka siiven etureunoissa ja järjestelmän väitetään sisältävän ”usean aaltoalueen tutkan, tunnistusjärjestelmän sekä elektronisen vaikuttamis- ja tiedustelujärjestelmän[33]. L-alueen tutkan havaintoetäisyyksiä on laskettu lähteessä [34]olettaen, että tutkaa käytetään SU-27/30/35-hävittäjässä. Tarkasteltavassa tilanteessa hävittäjän siivessä oletetaan olevan kaksi antennijärjestelmää puolellaan toimien noin 1 GHz:n taajuusalueella.. Oletetuilla parametreilla ja konfiguraatiolla suunta-antava havaintoetäisyys on noin 90 km maaliin, jonka tutkapoikkipinta-ala on 1 m^2 . Tarkastelu pätee PAK FA:han, tosin PAK FA:ssa siipien muotoilu poikkeaa SU-27/30/35-hävittäjistä ja siihen saattaisi mahtua suurempikin antennijärjestelmä parantaen edelleen havaintoetäisyyttä ja -tarkkuutta. Havaintoetäisyys on selvästi heikompi kuin X-alueen tutkassa, mikäli tutkapoikkipinta-ala on sama molemmilla taajuuksilla. On kuitenkin huomioitava, että tutkapoikkipinta-ala on luonteeltaan taajuusriippuva ja se on usein optimoitu – ja helpompi optimoida - ylemmille taajuusalueille eli etenkin X-alueelle. Mikäli vastustajan koneen tutkapoikkipinta-ala on merkittävästi heikompi 1 GHz:lla kuin 10:llä GHz:lla ja tutkan ominaisuuksia esim. integrointikykyä kyetään parantamaan, voi L-alueen tutka olla tärkeä sensori hyvät häiveominaisuudet omaavia maaleja vastaan. Tutkan käyttäminen SAR-käyttöön voi myös tulla kysymykseen. Tällöin oleellinen etu verrattuna X-alueen tutkiin olisi parempi havainnointikyky metsän suojassa oleviin maaleihin, koska L-alueella puuston ja lumen aiheuttama vaimennus on selvästi pienempää kuin X-alueella.

PAK FA:n häirintä tilannetietoisuuden heikentämiseksi voi olla vaikeaa, koska häirintälähettimen tulee kyetä toimimaan tehokkaasti sekä L- että X-alueilla. Pelkästään X-alueella toimiviakin tutkia on nykyistä hankalampi häiritä, mikäli maali on sekä päätutkan että sivututkan havaintoalueella ja mikäli tutkat käyttävät eri moodeja samaan aikaan. PAK FA:n sensorijärjestelmien implementointi on luultavasti hankalaa. Useiden suuren tehon omaavien lähettimien olemassaolon ja sijoittelun vuoksi eri lähettimien ja vastaanottimien esim. tutkavaroittimen välisten keskinäishäiriöiden hallitseminen voi olla vaikeaa, mikä saattaa heikentää PAK FA:n järjestelmien tuottaman tilannekuvan luotettavuutta.

Uusissa tutkissa on usein myös monipuolisemmat aaltomuodot, vaikkakaan tämä ei suoranaisesti ole AESA-tekniikan ansiota. Monipuolisten aaltomuotojen avulla suorituskyky voidaan optimoida paremmin eri tilanteissa. Vastustajan omasuojaa ja häirintää voidaan heikentää adaptiivisella keilanmuodostuksella, jolloin antennikuvion nollakohta voidaan suunnata kohti häiritsevää lähetintä.

AESA-tutkiin on tulossa myös täysin uusia toimintoja. Niitä voidaan tulevaisuudessa käyttää elektroniseen vaikuttamiseen, tiedonsiirtoon, ESM-käyttöön, lähetinpaikannukseen ja bistaattisena tutkana [31,35]. ESM-järjestelmän osana antennin suuren suuntaavuuden myötä kyetään havaitsemaan kohteita passiivisesti hyvinkin kaukaa tai vastaavasti suuren signaalikohinasuhteen vuoksi mittaamaan tarkkoja parametreja esim. lähetinpaikannuksen avuksi. Elektroniseen vaikuttamiseen käytettäessä AESA-tutkalla saadaan suuri lähetysteho ja se kykenee vaikuttamaan usealla keilalla samanaikaisesti eri kohteisiin. ESM- ja tiedonsiirtokäytössä hyvin suuntaavalla antennilla kyetään saamaan korkeita signaalikohinasuhteita, mikä mahdollistaa erittäin suuret tiedonsiirtonopeudet. Koejärjestelyssä AESA-tutkalla lähetettiin muokattua yleisesti käytössä olevaa Common Data Link:n aaltomuotoa 274 Mbps:n nopeudella, jolloin 72 Mbyten SAR-kuvan siirto kesti noin 3.5 sekuntia, kun esim. laajasti käytössä olevalla Link-16:lla siirto olisi kestänyt yli tunnin[36].

Tutkien rinnalla voidaan käyttää myös optronisia sensoreita, esimerkiksi Eurofighterin sisäänrakennetun optronisen sensorin havaintoetäisyys hävittäjään on noin 40 merimailia [29] tai jopa 120 merimailia [37]. Yhdistämällä sensoreiden tietoa keskenään eli esimerkiksi tutkan kanssa optronisen tai ESM-sensorin havaintoja, voidaan saavuttaa useita etuja. Toiminta on robustimpaa eli esimerkiksi vastustajan on vaikeampi häirinnän avulla heikentää tilannekuvan muodostusta, mikäli havaintoja tulee useammasta eri sensorista ja yhden sensorin vioittumisen vaikutus on pienempi[38]. Avaruudellinen ja ajallinen kattavuus on parempi, havainto on

luotettavampi ja yksiselitteisempi [39]. Laajempaa spektriä tarkkailevalta sensorifuusiojärjestelmältä on myös vaikeampi suojautua herätteen hallinnan keinoin.

3.1.2 Tutkan havaittavuus

Perinteisesti tärkein syy tavoitella tutkalle vaikeaa havaittavuutta eli hyviä LPI-ominaisuuksia on ollut elektronisten vastatoimien välttäminen[31]. Häivetekniikkaa merkittävästi hyödyntävien lentokoneiden yleistyessä LPI-ominaisuuksien merkitys on entisestään kasvanut. Erittäin kalliisti kehitettyjä tutkassa heikosti näkyviä lentokoneita ei ole mielekästä paljastaa tai ainakaan helpottaa havaitsemista heikosti suunniteltujen tutkasignaalien vuoksi. Ääritapauksessa häivekoneessa ei ole havaitsemisen välttämiseksi tutkaa ollenkaan ja tästä esimerkkinä on F-117 Nighthawk[40]. Nighthawk oli tarkoitettu ilmasta/maahan-toimintaan, minkä vuoksi tutka ei ole yhtä tärkeä kuin ilmasta/ilmaan-toimintaan tarkoitetuissa hävittäjissä, joille tutkan poistaminen ei ole mielekäs vaihtoehto, vaan havaittavuutta pyritään heikentämään taktiikalla ja tekniikalla.

Nykyaikaisessa ilmasodankäynnissä hävittäjien lähetitteitä etsivät eri järjestelmät. Jo rauhan aikana lähetitteitä pyrkivät havainnoimaan vieraiden valtioiden signaalitiedustelun järjestelmät. Saatuja signaalihavaintoja voidaan hyödyntää esim. vastustajan taktiikan arvioinnissa tai ohjelmoitaessa ESM- ja häirintäjärjestelmiä. Sodan ajan tilanteessa vastustajan lähetitteitä etsivien järjestelmien kirjo laajenee. Modernit passiiviset verkottuneet valvontajärjestelmät kuten tshekkiläinen Vera[41] pyrkivät luomaan ja täydentämään ilmatilannekuvaa. Vastustajan hävittäjän ESM- ja tutkavarointijärjestelmät havainnoivat ympäristöään ja uhkaavaa kohdetta vastaan voidaan käyttää häirintälähetintä, jonka vastaanotin tarkkailee häirittävää signaalia. Uhkaa vastaan voidaan käyttää myös tutkasäteilyyn hakeutuvaa ohjusta, jonka vastaanotin etsii kohteen lähettämää signaalia ja ohjaa ohjuksen maaliin signaalihavaintojen perusteella.

Passiivisten järjestelmien havainnointia voidaan heikentää operaation suunnittelulla, hyödyntäen matalia lentokorkeuksia ja lentämällä EMCON (emission control)-tilassa ts. ei lähetetä mitään aktiivisia lähetitteitä. Ilmasta/maahan-operaatio saatetaan kyetä suunnittelemaan ja toiminta ennakoimaan siten, että tutkaa tai muita lähetitteitä ei ehkä tarvitse käyttää. Sen sijaan ilmasta/ilmaan-operaatioissa kuten puolustuksellisessa vastailmatoiminnassa, on hyvä reaaliaikainen tilannekuva välttämätön. Tilannekuvaa voidaan pyrkiä parantamaan ja jonkin verran luodakin passiivisilla sensoreilla ml. optroniset sensorit sekä verkottumalla. Passiivisten sensoreiden hyöty on riippuvainen sääolosuhteista, vastustajan EMCON-käytännöistä ja oman

signaalitiedustelun ja elektronisen tukitoiminnan kyvystä tuottaa oikeita kirjastotietoja sensoreihin. Dynaamisessa ilmataistelussa oma tutka on useimmiten välttämätön ja tutkan suunnittelussa onkin huomioitava LPI-ominaisuudet.

Tutkan LPI-ominaisuuksia voidaan parantaa seuraavilla tavoilla[31]:

- Tutkan tehonsäädöllä ts. käytetään vain teho, mikä tarvitaan, jotta voidaan havaita maalit halutulta minimietäisyydeltä.
- Käyttämällä laajakaistaisia lyhytkestoisia pulsseja, pulssikompressoimalla ja koodaamalla, jolloin saadaan tarkka etäisyysresoluutio.
- Käyttämällä montaa eri keilaa eri taajuuksilla, jolloin huipputehoa voidaan vähentää $1/N$, jossa N on keilojen/keilattavien sektoreiden määrä. Modernien AESA-tutkien myötä tämäkin on mahdollista.
- Keilan ja aaltomuodon parametrien satunnaistaminen esim. kantoaaltotaajuus, pulssintoistotaajuus, pulssin leveys, keilausnopeus, pulssin modulointi, keilan leveys ja polarisaatio. Mainittuja parametreja ja signaalin tulosuuntaa hyödynnetään ESM:ssä, mutta jos parametreja satunnaistetaan, tehtävä vaikeutuu ja asettaa haasteita sekä vastaanottimelle että vastustajan tiedustelulle ja ELSO-tukitoiminnalle. Tulosuuntaakin voi josain määrin harhauttaa, jos kahden eri koneen tutkia käytetään sopivasti vuorotellen.
- Antennin matalilla sivukeilatasoilla

Edellä mainittujen menetelmien hyödyntäminen täysimääräisesti vaatii suurta prosessointikykyä ja joiltain osin myös AESA-tutkaa. Prosessointikapasiteetti kuitenkin kasvaa koko ajan ja monet mainitut LPI-piirteet parantavat myös tutkan vastaanottimen herkkyyttä parantaen näin tutkan havaintoetäisyyttä.

Modernissa verkottuneessa ilmapuolustusjärjestelmässä voidaan havaittujen signaalien perusteella nopeasti ja etäältä paikantaa ja tunnistaa kohde, mikäli läheteitä ei ole suunniteltu riittävän haastaviksi. Aaltomuotosuunnittelun merkitystä korostaa myös digitaalisten radiotaajuusmuistien (Digital Radio Frequency Memory, DRFM) yleistymisen häirintälähtetmissä. Riippumatta siitä, onko lavetti liki huippuunsa suunniteltu 5. sukupolven häivehävittäjä kuten F-22 vai 4.5 sukupolven hieman perinteisempi hävittäjä kuten Gripen NG, on emissioiden hallinta tärkeää.

3.1.3 Monipaikkatutka ilma-aluksessa

Valvontakäyttöön on kehitetty viimeisen vuosikymmenen aikana bi-/multistaattisia tutkia täydentämään ja osittain jopa korvaamaan maasijoitteisia aktiivisia tutkia. Bistaattiset tutkat hyödyntävät yleisradio- ja TV-lähetteitä tai matkapuhelintukiasemien lähetteitä. Menetelmä perustuu siihen, että lähetteet siroavat kohteesta esim. lentokoneesta ja järjestelmän kehittynyt vastaanotin kykenee laskemaan kohteen paikan ja nopeuden verratessaan suoraan edenneitä ja sironneita signaaleja keskenään. Järjestelmien kiistämätön etu on vastaanottimien passiivisuus ja sillä saavutettava taistelunkesto, koska tavanomaiseen tutkaan verrattuna lähetteitä ja lähettimiä on moninkertainen määrä ja periaatteessa järjestelmät voivat hyödyntää haluttaessa myös mahdollisen vastustajan lähetteitä. Em. järjestelmissä hyödynnettävät signaalit ovat normaaleihin tutkiin verrattuna huomattavan matalataajuisia, mikä parantaa huomattavasti häivekoneiden havaintomahdollisuuksia. Myös lähettimen ja vastaanottimien sijainti eri paikoissa parantaa häivekoneiden havaitsemista, koska häivekoneissa keskeinen tavoite on pyrkiä heijastamaan tutkan signaali tulosuunnasta poikkeavaan suuntaan, mikä ei aina heikennä bistaattisen tutkan havaintokykyä. Bi-/multistaattisen tutkan havainnoilla saavutettavalla tarkkuudella voidaan laukaista jopa ohjuksia[42].

Hävittäjäkäytössä bistaattisella toiminnalla tarkoitetaan yleensä kykyä hyödyntää omalla tutkallaan toisen lentokoneen tutkalähetteitä ja aiheesta on julkisuudessa niukahkosti tietoa. Keskeisinä etuina nähdään[31,43]:

- Kyky havaita vastustajan häivekoneita on parempi kuin tavanomaisella tutkalla.
- Vain tutkan vastaanotinta hyödyntävän lentokoneen havainnointi passiivisin keinoin on mahdotonta, mikä on tärkeää erityisesti häivekoneelle, jotta ei menetetä kallisarvoisilla häiveominaisuuksilla saavutettua etua.
- Lähetin voi olla turvallisemmassa paikassa kuin vastaanotin tai lähettävää konetta voidaan vaihdella, jolloin säteilyyn hakeutuvalla ohjuksella vaikuttaminen on tilanteessa vaikeampaa tai jopa mahdotonta..
- Häirinnällä vaikuttaminen vastaanottimeen on vaikeampaa, koska vastaanottimen paikka ei ole tiedossa.
- Lentokone voi *mahdollisesti* hyödyntää jonkin isomman ja matalataajuisemman tutkan lähetettä, jolloin havaintoetäisyys voi olla pidempi kuin koneen omalla tutkalla.

- Tutkan tai muiden järjestelmienkään järjestelmien vastaanottimia ei tarvitse sulkea ("blanking") tutkan lähetyksen ajaksi, jolloin koneen havaitsemis- ja toimintakyky säilyy parempana.

Bistaattinen tutka vaatii toimiakseen tarkan synkronoinnin sekä tarkan tiedon lähettimen paikasta, antennikeilan suunnasta ja muista lähetyksparametreista [31]. Tämä vaatii todennäköisesti perinteisiä datalinkkejä suurempaa tiedonsiirtonopeutta, mutta kuten jäljempänä osoitetaan, JSF:ssä ja F-22:ssa on edellytykset siirtää erittäin suuria tietomääriä reaaliaikaisesti ja em. parametrien välitys ei ole tällöin kovinkaan suuri haaste. Signaaliprosessointi on varmasti haastavaa, koska paitsi kohteet niin myös vastaanottimet ja mahdollisesti myös lähettimet liikkuvat aiheuttaen muuttuvia tutkaheijastuksia ja monimutkaisemman doppler-vaikutuksen signaaliin. Menetelmiä prosessointiongelmien ratkaisemiseksi on esitetty [43] ja oletettavasti myös prosessoreiden jatkuva suorituskyvyn kehitys osaltaan helpottaa implementointia. Vastustajan lähettimien signaalien hyödyntäminen on niiden siirrettävyyden vuoksi haasteellista, toisaalta jäljempänä esitetyn mukaisesti uusissa koneissa todennäköisesti olevien verkotettujen ESM-järjestelmien (joita ei ollut vielä lähteen [31] julkaisun aikaan näkyvissä) avulla vastustajan lähettimien paikat ovat nopeasti todettavissa ja näin periaatteessa hyödynnettävissä myös bistaattiseen käyttöön.

Parven sisällä toisen koneen tutkan hyödyntäminen ei todennäköisesti auta merkittävästi etäällä olevien pienien häivemaalien havainnoinnissa, koska parven koneet ovat liian lähellä ja signaali ei heijastu haluttuun vastaanottimeen. Sen sijaan selvästi erillään olevien parvien tutkasignaalien tai jopa muiden järjestelmien signaalien vastaanotto parantanee häivemaaalienkin havaitsemista. Muiden järjestelmien läheteiden käyttö on implementoinnin kannalta ongelmallisempaa, koska tutkan pitää osata käsitellä erilaisten ja mahdollisesti eri taajuusalueiden aaltomuotoja.

3.2 Passiivinen radioläheteiden havainnointi

3.2.1 Tutkavaroitin ja ESM-vastaanotin

Tutkavaroitin on keskeinen osa lentokoneiden omasuojajärjestelmää. Tutkavaroitimen tehtävä on antaa nimensä mukaisesti välitön varoitus havaitusta mahdollisesti uhkaavasta tutkasta, sen toimintatilasta, suunnasta ja mahdollisesti signaalilähteen ja alustan tyypistä. Herkkyys on perinteisesti varsin heikko ja pääpaino on hyvällä taajuus- ja aikatason kattavuudella. Tutkavaroitimien tulee olla etukäteen ohjelmoituja havaitakseen uhkaavan tutkan. Nykyisin käy-

tössä olevat tutkavaroitimet perustuvat usein laajakaistaiseen kidevastaanottimeen. Uudemmat tutkavaroitimet voivat käyttää tukena myös kapeakaistaisia vastaanottimia CW- ja pulssidoppler-tutkien signaalien havaitsemiseksi. Kapeakaistaiset tutkavaroitimet perustuvat usein superheterodynerakenteeseen. Jo tällä hetkellä mutta varsinkin tulevaisuudessa tutkien lähetteet ovat yhä vaikeammin havaittavia LPI-lähetteitä, jotka asettavat tutkavaroitimelle tiukempia vaatimuksia.

ESM-vastaanottimen tehtäväkenttä on laajempi kuin tutkavaroitimen. Elektroniseen tukeen (Electronic Support) käsitetään [44] kuuluvaksi uhkavaroitin, läheteiden paikannus ja muu läheteiden havainnointiin perustuva välittömään tarpeeseen tuleva tiedonkeräys. ESM-vastaanotin on suorituskykyisempi kuin tutkavaroitin ja usein ESM-järjestelmällä kyetään lähettimien paikannukseen. Hävittäjissäkin on vähitellen tulossa tutkavaroitimen rinnalle ESM-järjestelmä tai niiden muodostama kokonaisuus. Esimerkkinä tällaisesta on Saab:n BOW-järjestelmä, jossa on mm. digitaalinen vastaanotin, interferometri ja kyky FDOA/TDOA-periaatetta hyödyntävään lähetinpaikannukseen lentokoneiden välillä. Jo pelkästään interferometrin avulla järjestelmä kykenee yhden asteen suuntimistarkkuuteen[45], johon oletettavasti vaaditaan erittäin hyvä signaalikohinasuhde.

Tutkavaroitimen ja ESM-vastaanottimen ja toisaalta tutkan vastaanottimen välillä on havainnointitilanteessa perustavaa laatua olevia eroja. Vastustajan tutkavaroitimeen tai ESM-vastaanottimeen tuleva signaali on huomattavasti vähemmän vaimentunut verrattuna tutkan vastaanottamaan signaaliin. Toisaalta tutkan vastaanotin on sovitettu juuri tutkasignaalille ja se kykenee koherentisti integroimaan pulsseja, kun taas tutkavaroitimen ja ESM:n pitäisi havaita yksittäisiä pulsseja etenkin tutkavaroitimen tapauksessa luotettavasti. Tutkan antennivahvistus vastaanottotilanteessa on myös huomattavan suuri verrattuna tutkavaroitimiin ja tyypillisiin ESM-järjestelmiin.

Laajakaistaisen kidevastaanottimen tyypillinen herkkyys on -40...50 dBm[46] ja esivahvistuksen kanssa -60 dBm[47]. Jos tutkavaroitimessa käytetään digitaalista vastaanotinta suurella näytteenottotaajuudella esim. 500 MHz:n kaistalta kerrallaan, voidaan päästä erinomaiseen herkkyYTEEN, mutta säilyttää silti korkea sieppaustodennäköisyys. Arvioitaessa modernin ESM-vastaanottimen suorituskykyä voidaan olettaa sen käyttävän Patrian valmistaman ARIS-vastaanottimen kaltaista rakennetta, jossa ilmaisu tehdään kanavoinnin jälkeen[48]. Tyypillinen vaadittava signaalikohinasuhde $(S/N)_{min}$ tutkavaroitimelle automaattisella ilmaisulla on noin 10-14 dB, mutta mikäli tehdään myös amplitudi-, saapumisaika- ja taajuusmittauksia, tulee signaalikohinasuhteen olla 14..18 dB[46].

Lasketaan seuraavaksi modernilla ESM-vastaanottimella saavutettava havaintoetäisyys tyypilliseen nykyiseen hävittäjäutkaan sekä moderniin hyvät LPI-ominaisuudet omaavaan laivatutkaan. ESM-vastaanottimen herkkyyttä arvioidaan seuraavilla oletuksilla:

Kohinakaistanleveys:	$B_{ilmaisu} = 5 \text{ MHz}$
RF-etupään kohinaluku:	$F = 5 \text{ dB}$
Vaadittava signaalikohinasuhde:	$(S/N)_{min} = 15 \text{ dB}$

Edellä mainituilla arvoilla voidaan laskea yhtälön (6) avulla saavutettava herkkyyks $S_{RX} = -87 \text{ dBm}$. Herkkyyks tämänkaltaisessa ESM-järjestelmässä on näin huomattavasti nykyisiä tutkavaroitimia parempi ja havaintoetäisyydet kasvavat radikaalisti. Tämä tuo haasteita uhkakirjastojen laatijoille, koska havaintoalueen kasvamisen myötä havaittuja signaaleja voi olla paljon enemmän, jolloin uhkasignaalien luotettava käsittely vaikeutuu. Jotta sieppaustodennäköisyys erityisesti lähellä oleville uhkille on 100 %, voinee olettaa, että kuvatuslaisen digitaalisen vastaanottimen rinnalla on myös IFM (Instantaneous Frequency Measurement)-vastaanotin tai joku muu erittäin korkean sieppaustodennäköisyyden ja herkkyyden omaava vastaanotin. Saavutettavaa herkkyyttä voi edelleen heikentää antennitekniikka ja kaapelihäviöt. Tyypillisen tutkavaroitimen antennin vahvistus on 10 GHz:lla 0 dBi:tä kaikkiin suuntiin, mutta vähemmän tärkeällä taajuusalueella voi antennivahvistus olla -15 dBi:äkin [23]. JSF:n antennit tulevat ainakin osittain perustumaan laajakaistaisiin aktiivisiin konformaalisiin antenneihin [49,50], minkä ansiosta vaimennus ennen vastaanotinta lienee vähäinen.

Verrataan seuraavaksi perinteisen laajakaistaisen kidevastaanottimen (herkkyyks -50 dBm) ja digitaalisen vastaanottimen (herkkyyks -87 dBm) havaintoetäisyyttä venäläisessä SU-27-hävittäjässäkin käytössä olevaan varsin perinteiseen N001 Myech-tutkaan, jonka huipputeho on noin +66 dBm ja antennivahvistus noin 35 dB [51]. Tällöin EIRP= +101 dBm. Yhtälön (7) avulla voidaan laskea, että perinteisellä tutkavaroitimella, jonka herkkyyks on -50 dBm, on havaintoetäisyys ko. tutkaan noin 85 km. Sen sijaan edellä kuvatus kaltaisella modernilla ESM-vastaanottimella, jonka herkkyyks on -87 dBm, olisi teoreettinen havaintoetäisyys noin 6000 km. Havaintoetäisyys rajoittuisi käytännössä radiohorisonttiin. Herkkyyks on kuitenkin niin suuri, että todennäköisesti moderni ESM-vastaanotin havaitsisi ko. tutkan sen sivukeilasta ennen kuin perinteisempi tutkavaroitin havaitsee sen tutkan pääkeilan perusteella.

Lähettimien paikannus käy kuitenkin yhä vaikeammaksi aaltomuotojen monipuolistuessa ja huipputehojen laskiessa. Esimerkiksi CW-signaaleihin perustuvia tutkia on vaikea havaita, koska niiden huipputeho kyetään pitämään pienenä. Tutkassa heikosti näkyvä ruotsalainen

Visby-korvettiluokka käyttää CW-signaaliin perustuvaa SAAB:n Pilot-tutkaa [52] ja vastaavien tutkien käyttö lienee lisääntymässä. Säädetävän lähetystehon omaavan Pilot-tutkan huipputehoksi on ilmoitettu 1 W. Pilot-tutka hyödyntää laivan navigointitutkan antennia, jonka antennivahvistusta ei ole ilmoitettu. Samalla taajuusalueella toimii esim. Aerial:n suunnittelema merivalvontakäyttöön tarkoitettu ARA1834 antenni[53], jonka ilmoitettu antennivahvistus on 34 dBi. Antenni on 5.5 metriä pitkä, mikä lienee korvettikäyttöön on fyysisiltä mitoiltaan liian iso. Jos oletetaan, että korvettikäytössä antennin pituus on noin 1 metri, voidaan laskea yhtälöä (4) hyödyntäen Pilot-tutkan antennivahvistukseksi 27 dBi. Tällöin 1 Watin lähetinteholla säteilyteho $EIRP_{Pilot} = +57$ dBm. Perinteisellä tutkavaroitimella Visby-korvetti havaittaisiin tutkasignaalin perusteella noin puolen kilometrin etäisyydeltä. Modernilla ESM-vastaanottimella havainto olisi mahdollista noin 40 kilometrin päästä. Laskennassa on jätetty huomioimatta kaapelivaimennukset ja mahdolliset antennivahvistukset, koska tarkoituksena on kuvata vain erojen suuruusluokkaa.

Perinteisen kaltainen laajakaistainen tutkavaroitin, jolla on suuri havaitsemistodennäköisyys lähellä sijaitseviin uhkiin esim. lähestyviin ohjuksiin, on oletettavasti tärkeä myös tulevaisuudessa. Todennäköistä kuitenkin on, että rinnalle nousee ESM-vastaanotin, jonka herkkyys on merkittävästi perinteisiä tutkavaroitimia parempi. Tätä puoltavat seuraavat seikat:

- Uhkasignaalien aaltomuodot monimutkaistuvat ja keskimääräinen teho alenee.
- Havainnointi helpottuu ja luotettavuus kasvaa. Mikäli havainnointi voidaan aloittaa jo etäämpää, kohteen mahdollisia lähetteitä voidaan korreloida pidemmän ajan yli muiden havaintojen kanssa kasvattaen näin luotettavuutta.
- Tutkan havaintoetäisyys on usein pienempi kuin ESM:n mahdollistama havaintoetäisyys. ESM voi tukea tutkan havainnointia.

Seuraavassa luvussa osoitetaan, että verkottuneella passiivisella ESM-vastaanottimen havainnoinnilla saatava sijaintitarkkuus voi mahdollistaa jopa ohjuksen laukaisun vihollisen hävittäjää kohti, mikäli havaintojen käsittelyviiveet ovat riittävän pienet. Tämän merkitys korostunee pitkän kantaman omaavien ramjet-ohjusten myötä.

3.2.2 Lähetinpaikannus

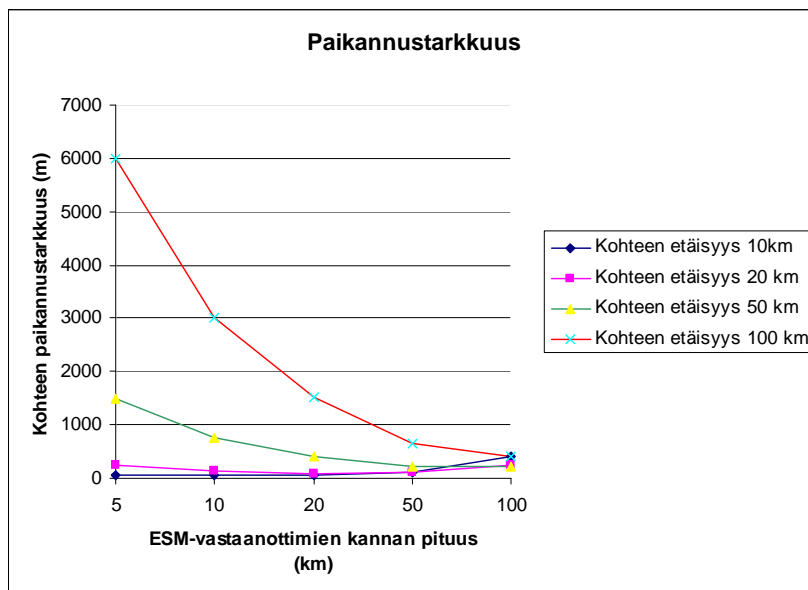
Paikallaan olevien kohteiden paikannukseen voidaan käyttää yksittäisen koneen tekemiä tulo- kulmamittauksia tai usean koneen yhteisesti mittaamaa havaitun signaalin kuluaikaeroa, jota voi käyttää myös liikkuvan kohteen paikannukseen. Kuluaikaeromittauksen keskeiset edut

ovat nopeus ja paikannustarkkuus ja ongelmina kompleksisuus sekä lentokoneiden välille tarvittava erittäin korkea tiedonsiirtonopeus[21].

Passiivisten sensoreiden nykyistä tehokkaampi hyödyntäminen viidennen sukupolven hävittäjässä olisi erityisen hyödyllistä, jotta tutkan käyttöä voidaan vähentää ja toisaalta havainto- ja tunnistuskykyä parantaa. F-22:n seuraaviin kehitysaskeliin kuuluu mm. parantunut maalittaminen hyödyntäen usean hävittäjän välistä lähetinpaikannuskykyä [54]. Aikaeromenetelmän hyödyntämistä usean hävittäjän muodostamassa verkossa on demonstroitu [55]. Mikäli lähetinpaikannustarkkuus on riittävä, voidaan asevaikutus kohdistaa pelkästään passiivisten sensoreiden havainnon pohjalta. Ilmasta/maahan-operaatiossa voidaan vastustajan ilmatorjunnan sensorit pyrkiä paikantamaan lähetinpaikannuksen avulla. Kun kohde on paikannettu, lähetinpaikannustarkkuuden signaalin sammuttaminen, mikä nykyisin on normaali toimintatapa säteilyyn haakeutuvia ohjuksia vastaan, ei enää auta. Sensorin on tällöin nopeasti siirryttävä, mikäli halutaan välttää sen tuhoutuminen etenkin, jos ohjus hyödyntää kuvantavaa sensoria loppuhakeutumisen. Myös ilmasta/ilmaan-ohjus saatetaan kyetä laukaisemaan ilman oman tutkan käyttöä, mikäli vastustaja käyttää tutkaa tai muuta paikannettavissa olevaa lähetettä. Erityisenä etuna ilmasta/ilmaan-tilanteessa on se, että vastustaja ei välttämättä havaitse laukaisua ollenkaan, koska vastustajan tutkavaroittimelle ei tule laukaisua paljastavaa signaalia varsinkin, jos ohjuksen loppuhakeutuminen perustuu muuhun kuin tutkaan. Ohjuksen laukaisun tai lähestymisen havainnointiin tarvitaan tällöin muuhun kuin tutkasignaalin havaitsemiseen perustuva ohjusvaroitussysteemi.

Lasketaan edellisessä luvussa esitetyn ruotsalaisen Pilot-tutkan kaltaisen FMCW-tutkan paikannettavuutta hyödyntäen korrelaatioon perustuvaa TDOA/FDOA-menetelmää ja käyttäen kaavoja (8)-(12). Oletetaan tilanne, jossa ESM-vastaanottimet ovat eri etäisyyksillä sijaitsevilla lentokoneilla. Signaalien korrelointi suoritetaan keskitetysti tavoitteena paikantaa FMCW-tutka, jonka kanta-aalto on 10 GHz ja kaistanleveys 5 MHz ja korrelointiaika 1 ms. Tutkan on laskennan helpottamiseksi oletettu pysyvän paikallaan. Tarkastelun painopiste on havainnoijien ja maalin keskinäisen geometrian vaikutuksen arvioimisessa paikannustarkkuuteen. ESM-vastaanottimessa vastaanotettu signaalikohinasuhde $S/N=1$, vaikka todellisuudessa S/N -suhde luonnollisesti vaihtelee ja tässä oletettu signaalikohinasuhde on varsin pieni. Oman hävittäjäparven kaksi konetta, jotka muodostavat kuvassa 2b kannan ab , liikkuvat samaan suuntaan nopeudella 200 m/s. Uhkatutka sijaitsee kantaan nähden kohtisuorassa (kuvassa 2b pisteessä L). Uhkan etäisyyttä hävittäjien välisestä kannasta vaihdellaan välillä 10..100 km. Doppler-prosessoinnin integrointiaika on 1 ms.

Kuvassa 3 on laskettu paikannustarkkuus kohtisuoraan kantaa olevan akselin (kuvassa 2b oleva y-akselin) suhteen. X-akselin eli hävittäjissä olevien ESM-vastaanottimien muodostaman kannan suuntaisia virhe-ellipsin tuloksia ei ole esitetty, koska annetuilla arvoilla tarkkuus on kaikissa tapauksissa laskelmien mukaan alle 50 metriä. Kuten kuvassa näkyy, on keskinäisellä geometrialla varsin merkittävä vaikutus. Äärimmäisen hyvä tarkkuus X-akselin suuntaisessa paikannuksessa tarkoittaa, että uhkan suunta koneisiin suhteen nähden havaitaan erittäin tarkasti, mutta etäisyyden suhteen voi olla epätarkkuutta enemmän. Mikäli koneita on pareittain tai parvina riittävän erillään siten, että saadaan kaksi kantaa, voidaan päästä kymmenien metrien tarkkuuteen sekä x- että y – akseleiden suhteen[21]. Tässä laskenta on tehty vain tietylle yksinkertaiselle geometrialle, toisaalta parven koneet lentävät usein esim. peräkkäisinä parina monen kilometrin porrastuksella ja tämä geometria antaa moneen suuntaan varsin hyvän tarkkuuden. Erilaiset signaalista ja implementoinnista esim. rajallisen tiedonsiirron vaikutuksesta aiheutuvat virheet on jätetty huomiotta. Tulokseen on suhtauduttava varauksella, mutta saavutettavissa oleva tarkkuus vaikuttaa silti niin suurelta, että paikannuksen perusteella voidaan laukaista esim. pitkän kantaman ilmataisteluoheutus.



Kuva 3. Kahden lentokoneen muodostaman ESM-ryhmän paikannustarkkuus laskettuna paikallaan pysyvään FMCW-tekniikkaa käyttävään tutkaan eri etäisyyksillä korrelointimenetelmään perustuvaa TDOA/FDOA-menetelmää hyödyntäen Y-akselin suhteen. X-akselin suhteen paikannustarkkuus on < 50 metriä.

Käytetyn korrelointiin perustuvan TDOA/FDOA-menetelmän keskeinen ongelma on sen vaatima korkea tiedonsiirtonopeus kahden ESM-vastaanottimen välillä. Mikäli ESM-vastaanottimena toimii Patrian ARIS:n kaltainen vastaanotin, tulee raakadataa näytteistetyistä

signaalista noin 15 Gbps:n nopeudella [48], joka on liian suuri mille tahansa linkille. Lähetinpaikannuksen vaatimaa tiedonsiirtokapasiteettia voidaan pienentää tekemällä korrelointia vain jaksottaisesti, jolloin kohteen paikkaa päivitetään harvemmin. Tällä ei kokonaisuuden kannalta liene kuitenkaan ratkaisevaa merkitystä edes aikakriittisessä toiminnassa. Toinen tapa on kompressoida vastaanotettua signaalia ennen tiedon siirtämistä yhteiseen prosessointiin. Käytettäessä TDOA/FDOA-menetelmää pulssimaisten tutkasignaalien havaintoon on lähteessä [56] esitetyllä kompressoitimenetelmällä mahdollista pienentää tiedonsiirtotarve 1/100:en ilman että paikannustarkkuus heikkenee. Tällöin ARIS-vastaanottimen kaltaista ESM-vastanotinta käytettäessä vaadittava tiedonsiirtonopeus olisi 150 Mbps, mikä on JSF:lle mahdollista kuten seuraavassa luvussa laskelmin osoitetaan.

Huolimatta implementointiin liittyvistä haasteista on TDOA/FDOA-menetelmään perustuvaa lähetinpaikannusta tarkasteltu usein nimenomaan ilmavoimallisessa toimintaympäristössä ja viitteissä esitetyt tulokset tukevat yllä olevaa laskelmaa. Viitteessä [57] tarkasteltiin teoreettisesti lentokoneasenteista korrelointi-TDOA/FDOA:a menetelmää käyttävää havaintojärjestelmää, jossa muutaman lentokoneen sensoreilla kyettiin 50-100 km:n päässä oleva lähetin paikantamaan erittäin tarkasti eli 50 %:n virhe-ellipsi oli vain kymmenen neliömetrin luokkaa. Aikaeromittauksen paikannustarkkuus riippuu vahvasti geometriasta ja ajantarkkuudesta, lyhyttä kantaa voidaan kompensoida hyvällä ajantarkkuudella ja päinvastoin[58]. Aikaeromittauksen tiedonsiirtoon tarvittava kapasiteetti on Mbps:ien kertaluokkaa[59], mikä ei ole edistyneelle datalinkille ongelma. Vaikka havaintokyky tällöin ei ole yhtä hyvä kuin korrelointimenetelmässä, voidaan olettaa päästävän ilma-aluksissa olevien ESM-sensoreiden paikantamisen perusteella TDOA/FDOA-menetelmällä alle sadan metrin tarkkuuteen, vaikka kohteet ovat kymmenien kilometrien päässä[58].

Yllä oleva tarkastelu on suuntaa-antava ja on huomioitava, että todellisuudessa tilanteeseen vaikuttaa monet eri tekijät esim. keskinäiset geometriat, liikenopeedet ja –suunnat ja käytännön implementoinnin aiheuttamat kompromissit. Varsin ilmeistä on, että kahden koneen välisellä lähetinpaikannuksella saadaan usein erittäin tarkka suuntatieto. Tutkalla taas suuntatieto on karkeampi, mutta etäisyystieto on hyvinkin tarkka. Yhdistämällä molempien järjestelmien edut, voidaan saavuttaa monissa geometrioissa erittäin tarkka paikkatarkkuus.

4 DATALINKIT JA VERKOTTUMINEN

4.1 Nykyiset taktiset datalinkit

Useimpien maiden ilmavoimat käyttävät edelleen johtamisessa ja tilannekuvan luomisessa samankaltaista toimintatapaa kuin esimerkiksi Iso-Britannia ja Saksa toisessa maailmansodassa. Maassa olevien tutkien tieto koostetaan ja taistelunjohtajat johtavat hävittäjiä tämän kokonaiskuvan perusteella. He antavat suusanallisesti tietoja myös havaittujen vastustajien sijainnista. Hävittäjien välillä ohjaajat voivat vaihtaa havaintojaan radioteitse, mutta kiivaammassa monimaalitalanteessa on kokonaisuuden hahmottaminen vaikeaa. Tilannetietoisuuden parantamiseksi teknisesti kehittyneemmät ilmavoimat ovat ottaneet käyttöön taktisia datalinkkejä, joiden avulla voidaan johtaa ja parantaa tilannetietoisuutta. Linkeillä voidaan lähettää oman koneen tilanne- ja paikkatietoa ja toisaalta havaintoja vastustajan koneista ja muista kohteista. Amerikkalaistutkimuksessa [12] vertailtiin ilmataistelua tasavertaisten osapuolten välillä lukuisissa tilanteissa, joissa ainoana erona oli, että toisella osapuolella oli käytössä datalinkki ja puheyhteys ja toisella osapuolella vain puheyhteys. Tutkimuksen mukaan pudotussuhde oli datalinkkiä käyttäneen osapuolen hyväksi noin 2.5-kertainen. Tulevaisuudessa sensoreiden ja verkottumisen merkitys oletettavasti vain kasvaa ilmasta/ilmaan-toiminnassa, koska kohteiden herätteet pienenevät ja toisaalta ilmataisteluohjusten kantama kasvaa merkittävästi.

Tällä hetkellä useiden länsimaiden käytössä oleva Link-16 on erittäin häirinnänsietoinen ja sen tiedonsiirto voi olla enimmillään satoja kilobittejä sekunnissa, mikä on merkittävästi enemmän kuin esim. 1960-luvulla kehitetyllä Link-11:llä. A/G-toimintaan liittyen on Variable Message Format (VMF)-standardi nousemassa tärkeäksi tiedonsiirtomenetelmäksi ilma- ja maakomponenttien välille. Erittäin suuren tiedonsiirtonopeuden (max 274 Mbps) omaava Common Data Link (CDL) on käytössä lähinnä miehittyissä ja miehittämättömissä tiedustelukoneissa esim. Global Hawk:ssa[60]. Alhaisempia taajuuksia käyttävä Link-22 on tulossa käyttöön, mutta sitä käyttävät ensisijaisesti eri maiden laivastot.

Iso-Britannian asevoimien vuodelta 2001 olevan näkemyksen mukaan taktisen reaaliaikaisen tiedonsiirron tulisi kyetä suureen tiedonsiirtonopeuteen, korkeatasoiseen häirinnänsietoon ja tietoturvaan sekä lyhyeen viiveeseen[61]. Tyypillisesti vaatimukset kasvavat uusien sukupolvien myötä. Euroopan puolustusvirastossa (EDA) on tunnustettu Future Combat Air Sys-

tems:in liittyen tarve jopa 300 Mbps:n tiedonsiirtokyvylle miehitettyjen ja miehittämättömien lentokoneiden sekä aseiden välille[62]. Link-16:n kehityksessä näkyy myös tarve kasvattaa tiedonsiirtonopeutta tarvittaessa häirinnänsiedon kustannuksella. RAND-organisaation USA:n ilmavoimille tekemän raportin mukaan olemassa olevilla datalinkkeillä kuten Link-16:lla ei ole riittävän suurta tiedonsiirtonopeutta tai linkit esim. Common Data Link eivät sovi haastavaan elektronisen sodankäynnin uhkaympäristöön. RAND:n raportissa [63] on tunnistettu mm. tarve hyvin suuntaavien, nopeasti suunnattavien antennien hyödyntämiseen tai korkean vaimennuksen omaavan radiotaajuuden valintaan tiedustelu- ja häirintäuhkan välttämiseksi.

Viidennen sukupolven hävittäjiin tavoitellaankin nykyistä kehittyneempiä menetelmiä. F-22:n, JSF:n sekä B-2-pommittajan tiedonsiirtotarpeita varten ollaan kehittämässä Multifunction Function Data Link:a (MADL). MADL:n tavoitteet ovat samat kuin edellä mainitussa brittinäkemyksessä, mutta ko. tavoitteiden lisäksi halutaan hyvät LPI-ominaisuudet [64]. Tämä on erityisen ymmärrettävää, koska äärimmäisen kalliiden häivekoneiden olemassaoloa tai sijaintia ei ole mielekästä paljastaa liikennöimällä Link-16:n kaltaisella helpohkosti havaittavalla signaalilla. Tämän vuoksi F-22:ssa onkin toistaiseksi vain F-22:ien keskinäiseen tiedonsiirtoon tarkoitettu datalinkki (Intra Flight Data Link, IFDL) sekä Link-16-vastaanotin[65].

Eräs keskeinen kysymys kuuluu, mihin nykyistäkin suurempaa tiedonsiirtonopeutta voitaisiin hyödyntää. Se voisi tuoda etuja ainakin seuraavissa toiminnoissa:

- **Kvantavan sensorin kuvan välitys.** SAR-kuva tai optronisen sensorin kuva, joka on kooltaan yleensä erittäin iso, voidaan välittää koneelta toiseen koneeseen tai maahan ja hyödyntää tätä maalinosoitusprosessissa.
- **Lähetinpaikannus ja -tunnistus.** Mikäli ESM-vastanottimien välillä on riittävän suuri tiedonsiirtoyhteys, voidaan ESM-vastanottimien vastaanottama signaali tai sen piirteitä prosessoida kootusti ja saavuttaa parempi tarkkuus kuin yksittäisen hävittäjän ESM-vastanottimella tai tutkavaroitimella.
- **Tiedon viiveettömämpi välitys.** Nykyisten datalinkkien siirtämän tiedon tehokkaampi päivitys ja jakaminen nopeudella, joka mahdollistaa helpommin ja tarkemmin esim. aseiden ohjaamisen maaliin.
- **”Collaborative targeting”, yhteinen maalinosoitus.** Osin edellä mainittuihin toimintojen ansiosta asevaikutuksen suuntaaminen parantuu, mikäli tiedon fuusiointi on toteutettu hyvin. Eri lähteistä tulevaa tietoa kyetään yhdistämään huomattavasti nykyis-

tä enemmän ja oikea-aikaisemmin, jolloin yksittäiseen sensoriin ja/tai lentokoneeseen nähden havaintoetäisyydet kasvavat, tunnistuskyky paranee, tarkkuus kasvaa ja OODA nopeutuu[66].

- **Tehokkaampi häirintä.** Monikäyttötutkien myötä jokaisella hävittäjällä on kyky elektroniseen vaikuttamiseen ja hyvien yhteyksien avulla voidaan samanaikainen häirintä useammasta lentokoneesta koordinoida paremmin ja vaikuttaa kohteisiin tehokkaammin [67].
- **Vastustajan häirinnän vaikutuksen heikentäminen.** Hyödyntämällä lentokoneiden tutka- ja ESM-tietojen välitystä voidaan aikakriittisessä tilanteessa heikentää esim. vastustajan DRFM-häirinnän vaikutusta[68].
- **Monipaikkatutkan toimintaan,** mikä vaatii toimiakseen hyvät viiveettömät tiedonsiirtoyhteydet.

4.2 Multifunction Advanced Data Link (MADL)

MADL:n voinee olettaa olevan keskeinen tiedonsiirtomekanismi USA:n ja lähimpien liittolaisten viidennen sukupolven hävittäjissä 2020-luvulla. MADL:sta ei ole toistaiseksi julkaistu juuri mitään teknisiä parametreja. Seuraavaksi tehtävissä laskelmissa joudutaankin tekemään useita oletuksia arvioitaessa linkin tarjoamaa suorituskykyä.

Linkkijärjestelmän antennin valmistajalla[69] on hieman tietoa MADL:n ja IFDL:n antennijärjestelmästä web-sivuillaan ja konferenssiesitelmä [70] koskien satelliittien tiedonsiirtoa. Satelliittijärjestelmän ratkaisuksi on esitetty käytännössä samannäköistä antennijärjestelmää, joka on käytössä F-22:ssa. Antennijärjestelmä perustuu kytkettäviin torvi- ja linssi-antennien avulla luotaviin antennikeiloihin, joita on 106 kappaletta ja antennien vahvistus on noin 30 dB. Antennit toimivat 20 ja 30 GHz:n alueilla ja toisaalla on kerrottu, että MADL toimii noin 20 GHz:n tienoilla. Seuraavassa lasketaan, millaisia tiedonsiirtonopeuksia voi MADL:n kaltainen datalinkki tarjota ja kuinka helposti ko. datalinkin voi havaita.

Viestijärjestelmien tiedonsiirtokykyyn vaikuttaa ratkaisevasti käytettävissä oleva kaistanleveys ja saavutettavat signaalikohinasuhteet aiotussa käyttöympäristössä. Radiojärjestelmien kaistanleveyttä rajoittavat keskeiset tekniset tekijät ovat antennien ja tehovahvistimien kaistanleveydet. Vastaanottimet ovat yleensä helpommin suunniteltavissa laajakaistaisiksi. Antennivalmistajien valikoimia esim.[71] tarkastelemalla voi päätellä, että torvi-antennien kaistanleveys on yleensä ainakin 10% kantoaaltotaajuudesta. Tehon vahvistaminen laajakaistaisesti on pienempi ongelma, koska vahvistimia voidaan haluttaessa tehdä useampi rinnakkain.

Esimerkiksi Link-16 toimii taajuusalueella 969-1206 MHz eli yli 20% kantoaaltotaajuudetaan. Arvioitaessa MADL:n kaistanleveyttä voitaneen olettaa sillä olevan käytettävissä ainakin 5% kantoaallostaan käytettävissä, mikä 20 GHz:lla tarkoittaa 1 GHz kaistaleveyttä.

Arvioitaessa saavutettavissa olevaa tiedonsiirtokapasiteettia, voidaan käyttää arvioinnin pohjana siviilikäytössä olevien ”point-to-point”-linkkien suorituskykyä. Esimerkkinä tarkastellaan tilannetta, jossa MADL käyttäisi IEEE 802.16-standardiin perustuvan WIMAX:n (Worldwide Interoperability for Microwave Access) kaltaista tiedonsiirtomenetelmää. WIMAX:n ilmarajapinta perustuu rinnakkaisia kantoaaltoja käyttävää Orthogonal Frequency-Division Multiple Access (OFDMA)-tekniikkaan. WIMAX-standardia ei ole tarkoitettu hävitäjäkäyttöön, mutta tarkastelu antaa kuitenkin suuntaa, millaisia tiedonsiirtonopeuksia voidaan saavuttaa.

Kanavanleveys MHz	Modulointitapa	Bittinopeus [Mbps]	S/N_{\min} [dB]	Herkkyys [dBm]
20	QPSK	32	8.5	-76
20	16-QAM	64	15.0	-69
20	64-QAM	96	21.0	-63

Taulukko 2. IEEE 802.16 standardin mukainen vastaanottimen herkkyys eri bittinopeuksilla[72].

Taulukossa 2 on IEEE 802.16 standardin vaatimukset herkkyyksille eri bittinopeuksilla, mikä pohjalta voidaan laskea, millaisia yhteysetäisyyksiä voidaan järjestelmällä saavuttaa. Laskettaessa linkin kantamaa taulukon 2 mukaisilla herkkyyksillä, tehdään seuraavat oletukset:

$$\text{Taajuus } f = 22 \text{ GHz}$$

$$\text{Antennivahvistus } G_R = G_T = 30 \text{ dB}$$

Lähetysteho $P_T = +47$ dBm. [Toshiballa on KU-kaistalle satelliittitiedonsiirtoon tarkoitettuja tehovahvistimia[73], joiden kaistanleveys on 500 MHz ja lähtöteho +47 dBm].

Taajuuden oletetaan olevan 22 GHz, joka on vesihöyryn absorptiotaajuus ja jolla on tämän vuoksi poikkeuksellisen suuri lisävaimennus eli 0.2 dB/km [74]. Tällaisella taajuusvalinnalla kyetään heikentämään lähetteen havaittavuutta. Lentokoneiden välillä oletetaan olevan näköyhteysreitti ja tarvittava lähetysteho lasketaan kaavan (7) avulla ja tulos on esitetty taulukossa 3.

Datanopeus (Mbps)	Herkkyyys (dBm)	G_{TX}	G_{RX}	Tarvittava lähetysteho (dBm)			
				R =10(km)	R =50(km)	R =100(km)	R=200(km)
32	-76	30 dB	30 dB	3	17	23	29
96	-63	30 dB	30 dB	16	30	36	42

Taulukko 3 Tarvittava lähetysteho laskettuna eri etäisyyksille käytettäessä WIMAX:n kaltaista aaltomuotoa.

Taulukosta 3 voidaan havaita, että 96 Mbps:n datanopeudellakin päästään 200 km etäisyyteen käytettäessä edellä mainittua Toshiba vahvistinta, jolloin jää vielä 5 dB:n marginaali. Haluttaessa suurempia tiedonsiirtonopeuksia voidaan lähettää OFDMA-signaaleja rinnakkaisilla kanavilla, jolloin päästään helpohkosti satojen Mbps:ien nopeuteen. Tällöin tosin joko etäisyys lyhenee tai on käytettävä rinnakkaisia vahvistimia. Mikäli oletetaan vaadittavan 5 dB:n marginaali, voidaan taulukon 3 perusteella arvioida, että esim. 100 km:n etäisyydellä voidaan lähettää tietoa yhtäkin vahvistinta käyttäen $4 \times 96 \text{ Mbps} = 385 \text{ Mbps}$:n nopeuksilla. Saavutettava suorituskykyä heikentää kuitenkin Doppler-siirtymän aiheuttama vaihesiirto signaalissa. Toisaalta taas ilmasta/ilmaan-ympäristössä ei suunta-antenneilla ole tyypillisessä WIMAX:n käyttöympäristössä esiintyviä monitieongelmia, mikä voi lieventää vaadittavaa signaalikohtinaisuutta.

Yllä olevat laskelmat osoittavat, että uusilla datalinkkiratkaisuilla voidaan saavuttaa tiedonsiirtonopeuksia, jotka ovat erittäin paljon korkeampia kuin esimerkiksi Link-16:n mahdollistama tiedonsiirto. Tiedonsiirron puolesta luultavasti kaikki kappaleessa 4.1 mainitut toiminnot ovat mahdollisia. Todennäköisesti Link-16 tulee kuitenkin säilymään kauan rinnalla, jotta tietoa kyetään tarvittaessa vaihtamaan ja etenkin vastaanottamaan AWACS:n ja vanhemman sukupolven hävittäjien kanssa.

4.3 Linkin havaittavuus

Link-16 käyttää noin 1 GHz:n taajuutta ja hävittäjäkäytössä lähetysteho on noin 200 W ja kanavan kaistanleveys on noin 3 MHz. Matalahko taajuusalue ei mahdollista mielekkään kokoisia suuntaavia antennia ja käytössä olevat antennit ovat tyypillisesti ympärisäteileviä. Käytettävällä taajuusalueella ilmakehän vaimennus on myös hyvin pieni eikä helpota tiedustelulta suojautumista. Mikäli käytössä on luvussa 3.4.2 kuvattu moderni ESM-vastaanotin ympärisäteilevällä antennilla, voidaan laskea kaavan (7) avulla sen havaitsevan optimitilanteessa Link-16:n noin 240 km:n etäisyydeltä.

Oletetaan MADL:n hyödyntävän edellisessä luvussa kuvatus kaltaista aaltomuotoa ja käytävän suurta tiedonsiirtonopeutta 96 Mbps, mikä vaatii suurempaa tehoa heikentäen tiedustelusuojaa. Oletetaan yhteysetäisyyden olevan 100 km, joka on useimmissa ilmataisteluskennärioissa riittävä parven sisäinen ja parvien välinen yhteysetäisyys. Tällöin käytettävä lähetysteho on +36 dBm. Linkin oletetaan käyttävän myös tehonsäätöä, joka on ollut matkapuhelimi-ssa käytössä jo yli vuosikymmenen ajan. Käytettävät antennit ovat samat kuin edellisessä luvussa. Antenneille ei ole ilmoitettu sivukeilatasoa. Lähteessä [75] on esitetty arvioita vastaavan kaltaisten torviantennien sivukeilatasosta ja tämän perusteella voitaneen olettaa, että sivukeilataso voi olla kertaluokkaa -30 dBc. Tiedustelijalle tulevien sivukeilojen tehotaso on tällöin +36 dBm. Tiedustelija käyttää edeltävän kaltaista modernia ESM-vastaanotinta ja antennia, jonka vahvistus on 0 dBi. Tällöin voidaan laskea ESM-vastaanottimen havaitsevan MADL-lähetteen optimiolosuhteissa sivukeilasta noin 1.5 km:n etäisyydeltä.

Havaitakseen MADL:a hyödyntävän hävittäjän, tulee havainnoijan vastaanottimen olla lähe-tyksen pääkeilassa tai käyttää hyvin suuren vahvistuksen omaavaa antennia. MADL:ssa käy-tettävät torviantennit ovat kuitenkin erittäin suuntaavia ja todennäköisyys ESM:n sijoittumi-esta pääkeilaan ei ole kovin suuri. Tilanne poikkeaa selvästi tutkasta, jonka tehtävä on yleensä pyrkiä etsimään kohteita suuresta tilavuudesta, jolloin keila pyyhkii laajoja alueita. Häive-koneeseen suunniteltu datalinkki on ”point-to-point”-tyyppinen järjestelmä, jonka tavoite on lähettää juuri ja juuri riittävä tehotaso tiettyyn pisteeseen ilmassa. Jos kuitenkin oletetaan, että ESM-vastaanotin sattuisi pääkeilaan, voidaan laskea havaintoetäisyyden olevan optimitilan-teessa noin 25 km.

Havaitsemista vaikeutetaan todennäköisesti hajaspektritekniikalla. Suomen ilmavoimien ja kotimaisen teollisuuden datalinkkikehitys osoitti jo vuosia sitten, että esim. suorahajoitustek-niikalla voidaan hyötysignaali levittää datalinkkisovelluksessa helpokosti useiden megahert-sien taajuuskaistalle prosessointivahvistuksen ollessa yli 20 dB. Nykytekniikalla taajuuskais-ta ja prosessointivahvistus ovat todennäköisesti merkittävästi suuremmat. Kuitenkin jo 20 dB:n prosessointivahvistuksella saadaan tehosiheys ESM-vastaanottimella pienentymään 1/100:an. Havaintoetäisyys putoaa tällöin 90%, jolloin parhaassakin tapauksessa vastustaja havaitsisi lähetteen pääkeilasta noin 2.5 km:n etäisyydeltä.

On huomioitava, että havaitsemisetäisyydet on laskettu suurehkolle yhteysetäisyydelle ja erit-täin suurelle tiedonsiirtonopeudelle. Jos tiedonsiirtonopeus pudotetaan samalle tasolla kuin

esim. Link-16:ssa on käytössä, on MADL:n havaitseminen käytännössä mahdotonta, ellei havainnointiin käytetä hyvin suuria ja epäkäytännöllisiä maasijoitteisia antennoja tai erittäin tiheää vastaanotinverkostoa. Suurillakin tiedonsiirtonopeuksilla havaintoetäisyys on ainakin dekadia pienempi kuin nykyisissä datalinkeissä ja MADL tarjoaa oivallisen verkottumismenetelmän häivekoneisiin. Havaitsemisen välttämiseen käytettävät keinot vaikeuttavat myös häirintää. Mikäli kaikesta huolimatta linkkiyhteydellä esiintyisi häirintää, MADL:ssa on todennäköisesti käytössä häirinnän väistön sopivia menetelmiä esim. hajaspektritekniikka, adaptiivinen tiedonsiirtonopeus ja virheenkorjauskoodit, jotka ovat laajasti käytössä siviilisoveluksissa.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Nykyisten 4. sukupolven hävittäjien seuraajaehdokkaita tarkasteltaessa huomio kiinnittyy usein koneen häivetekniikkaan. Tässä tutkielmassa tehdyn tarkastelun perusteella havaitaan myös merkittävästi nykyistä suurempi tilannekuvan muodostamiseen liittyvä potentiaali, joka uusiin hävittäjiin on tarjolla. Yksittäiset modernit uudet järjestelmät kuten AESA-tutka ja kehittynyt ESM-järjestelmä jo itsessään parantavat merkittävästi ohjaajalle tarjolla olevaa tilannekuvaa ja sen myötä tilannetietoisuutta. Verkottamalla uudet sensorit voidaan saavuttaa täysin uusia kykyjä, joita ei nykyisin ole lainkaan käytettävissä hävittäjätasolla. Muutosten myötä taktiikkaa on tarkastettava ja huomioitava myös uhka, joka aiheutuu vastustajien käytäessä näitä samoja mahdollisuuksia.

AESA-tutkan myötä havaintoetäisyys samankokoiseen maaliin kasvaa nykyisiin tutkiin verrattuna noin 50% (taulukko 1), mutta kohteiden tutkapoikkipinta-alan pienentyessä käytännön havaintoetäisyydet saattavat pienentyä kymmeniä prosentteja nykyisestä. Tällöin voi syntyä tilanne, jossa ramjet-ohjuksiin perustuva ilmasta-ilmaan-vaikutuskyky ulottuu selvästi kauemmas kuin vain tutkiin perustuva havainto- ja maalinosoituskyky. Havaintosektorin suuruus voi kasvaa, koska AESA-tutkienkin antennit ovat usein mekaanisesti käännettävissä tai tutka-järjestelmässä on jopa useita eri antennia kuten venäläisessä PAK FA-hävittäjässä. Suuremman havainnointisektorin myötä ohjuksen maalitiedon päivitys onnistuu helpommin ja AESA-tutkan mahdollistaman nopean keilauksen myötä tarkemmin, mikä lisää ohjuksien osumatodennäköisyyttä. PAK FA:ssa ohjaamon sivulla olevat tutkat parantavat joka sään tilannetietoisuutta ja edelleen lähitaistelukykyä JSF:än verrattuna, jossa sivusektoreiden tilannetietoisuuden muodostaminen perustuu suomalaisessa säässä ongelmallisempaan lämpökameratekniikkaan.

AESA-tutkan tuottaman tilannekuvan luotettavuus kasvaa, koska hävittäjän on vaikeampi irrottautua tutkaseurannasta liikehännän avulla. Luotettavuutta lisää myös adaptiivisen keilanmuodostuksen, satunnaisen keilauksen ja haastavampien aaltomuotojen myötä parantuva häirinnänsietoisuus, mitä digitaalisiin radiotaajuusmuisteihin perustuvien häirintälähetimien aikakaudella ei ole syytä aliarvioida. Hävittäjäparven ulkopuolisen tausta- ja saattohäirinnän vaikutusmahdollisuudet heikkenevät myös, koska antenni kykenee suuntaamaan nollakohdan kohti häirintää. Monipuolisemmat ja kompleksisemmat aaltomuodot aiheuttavat todennäköisesti omasuoja- ja ESM-järjestelmien kirjastojen suunnittelulle nykyistä suurempia haasteita.

Häivekoneiden tunnistaminen moottorimodulaation perusteella todennäköisesti vaikeutuu, mutta kehittyneen tutkan ISAR-kyvyllä tunnistuskykyä voidaan parantaa. Kehittyneen AESA-tutkan elektronisen vaikuttamisen kyky voi heikentää vastustajan tilannekuvan muodostusta ja parantaa näin tilannekuvaa *suhteessa* vastustajaan ainakin, mikäli vastustajalla ei ole vastaavaa kykyä.

Passiivinen havainnointikyky siirtynee suuren harppauksen eteenpäin nykytilanteesta, jossa useimmissa koneissa on vain tutkavaroitin lähinnä varoitusjärjestelmänä. Tutkavaroitimen rinnalle tulee kehittynyt ESM-järjestelmä. Kuten luvussa 3 osoitettiin, voidaan uhkat kyetä havaitsemaan yli 100 kertaa nykyistä kauempaa tai nykyisillä etäisyyksillä sivukeilasta ja määrittämään paikka tarkemmin. ESM:n merkitystä korostaa uhkasignaalien aaltomuotojen monimutkaistuminen ja keskimääräisen tehon aleneminen. Perinteinen tutkavaroitin pystyy havaitsemaan moderneja aaltomuotoja vasta lähietäisyyksiltä ja ESM.-järjestelmä on luultavasti välttämätön uhkasignaalien havaitsemiseksi riittävän etäältä. AESA-tutkan hyödyntäminen ESM-järjestelmän antennina voi parantaa havainnointikykyä vielä merkittävästi. Uusissa koneissa tulee olemaan myös kehittyneet optroniset järjestelmät, jotka tosin tässä tarkastelussa jätettiin vähälle huomiolle. ESM-vastaanottimen nykyisiä tutkavaroitimia huomattavasti parempi havaintoetäisyys ja tätä kautta suurempi samanaikaisten signaalien määrä asettaa järjestelmien evästysprosessille haasteita, kun tarkoituksena on pitää havaintojen luotettavuus kaikissa tilanteissa korkealla tasolla. Myös aaltomuotojen muuttuminen monimutkaisemmiksi ja tutkan keilauksen nopeutuminen vaikeuttaa ELSO-tukitoimintaa nykyisestä.

Monipaikkatutkakyvyn avulla voidaan passiivisesti havainnoida maaleja, joiden lähetteitä ei kyetä havaitsemaan. Erityisesti monipaikkatutkalla voidaan parantaa kykyä havaita häivekoneita. Vaikka ilmasijoitteisiin järjestelmiin liittyy haasteita, on ratkaisujakin ongelmiin tarjolla. Monipaikkatutkain liittyy etenkin häivekonetoimintaan liittyen niin merkittäviä etuja, että niiden hyödyntäminen ainakin myöhemmässä vaiheessa 5. sukupolven hävittäjien elinkaarta lienee ilmeistä.

Nykyisten keskenään heikohkosti integroitujen sensorijärjestelmien sijaan lentokoneen sensorit ovat tiiviimmin integroituja keskenään. Tällöin saavutetaan suurempi havaintoetäisyys, tarkkuus ja luotettavuus. Hyöty korostuu maalien koon pienentyessä ja ramjet-ohjusten mahdollistaman vaikutusetäisyyden kasvaessa. Luotettava tunnistus kaikissa olosuhteissa helpottaa tulenavauspäätöstä parantaen hävittäjän tehtävnsuoritus- ja selviämiskykyä ja toisaalta pienentäen todennäköisyyttä ampua omia lentokoneita. Vastustajan modernit häirintäjärjes-

telmät voivat heikentää tutkan suorituskykyä, mutta passiivisten sensoreiden ollessa tutkan tukena havainnointikykyä on vaikeampi heikentää.

Jo nykyisellään datalinkkien merkitys on tärkeä tilannetietoisuuden parantamisessa. Viiden sukupolven koneessa datalinkkien tiedonsiirtonopeus voi luvussa 4 tehdyn analyysin mukaan olla satoja Mbps:a eli huomattavan paljon enemmän kuin Link-16:ssa. Teknologian kehityksen myötä hävittäjät kyetään verkottamaan tehokkaasti ja viiveettömästi mahdollistaen täysin uusia toimintoja. Sensoreiden kuvaa voidaan välittää koneelta toiselle tukien yhteistä maalinsoitusta ("collaborative targeting"). Tutkien käyttö on nykyistä koordinoitumpaa ja käytettävissä on liki reaaliaikaisesti parven toisen koneen SAR-kuva tai optronisen sensorin tuottama kuva, jota voi hyödyntää tehtäessä laukaisupäätöstä. Eri koneiden sensorit ja niiden tuottama tieto kyetään integroimaan keskenään nykyistä huomattavasti tehokkaammin, jolloin vaikutus suurempi kuin osiensa summa. Parven jäsenillä on reaaliaikainen tieto laajalta alueelta havaituista läheteistä, niiden tarkka paikka, suunta ja tunnistetieto. Verkottamalla lentokoneiden ESM-järjestelmät keskenään saavutetaan paikannustarkkuus, jonka perusteella voidaan todennäköisesti laukaista iltataisteluoetus tai ilmasta/maahan-ohjus näkökantaman ulkopuolelle. Tällöin vastustajan tutkavaroitin ei voi havaita hyökkäystä ennen kuin ohjuksen hakupää käynnistyy, sikäli kuin hakupää on aktiivinen. Mikäli ohjuksen hakupää perustuu IR- tai millimetriaaltoalueen sensoriin, tutkavaroitin ei luultavasti havaitse koko hyökkäystä. Vastaavasti jos vastustajalla on tämä kyky, olisi uudessa hävittäjässä syytä olla ohjusvaroitinjärjestelmä, jotta hyökkäys voidaan havaita. Erittäin hyvä paikannustarkkuus yhdistettynä kuvantavalla hakupäällä varustettuun ilmasta/maahan-ohjukseen aiheuttaa haasteita myös maassa sijaitseville tutkille. Vaikka tutka vaaran uhatessa sammutetaan, se voi olla jo riittävän tarkasti paikannettu ja siihen voidaan vaikuttaa. Tämän vuoksi valvonta- ja ilmatorjuntatutkien käyttöä ja toimintatapoja on edelleen kehitettävä ja niiden tulisi olla erittäin nopeasti siirrettävissä.

Nykyisten hävittäjien verkottumisen selkärankana toimiva Link-16 on erittäin häirintäsietoinen, mutta suuren tehon ja alhaisen taajuusalueen vuoksi se on varsin helppo havaita modernilla ESM-vastaanottimella. Huolimatta uusien linkkien tiedonsiirtonopeuden merkittävästä kasvusta havaintoetäisyys Link-16:en verrattuna pienenee uusien linkkien myötä ainakin dekadilla antennin pääkeilasta ja sivukeilasta vielä huomattavasti enemmän. Nämä piirteet mahdollistavat parven sisäisen tiedonvaihdon häiriöttömästi ja käytännössä havaitsemattomasti suurillakin tiedonsiirtonopeuksilla.

Tutkielmassa tehdyt laskelmat olivat yksinkertaistetuissa tilanteissa ja arviot tulee ymmärtää suuntaa-antavina. Käytännön implementoinnin vaatimat kompromissit heikentävät usein suorituskykyä. Paikantamisessa on eri vastaanottimien määrällä, käytettävissä olevalla ajantarkkuudella sekä lähettimien ja vastaanottimien keskinäisellä geometrialla ratkaiseva merkitys. Verkottamisesimerkissä käytetty OFDMA-aaltomuoto ei välttämättä ole optimaalisin valinta ilma-alusten väliseen liikennöintiin, mutta vastaavan kertaluokan nopeuksiin päästään myös muilla tekniikoilla. AESA-tutkien havaintokyvyn parannus suhteessa 4. sukupolven hävittäjäututkiin jäi tutkielmassa täysin ulkopuolisen lähteen varaan, koska laskentaparametreja ei ollut käytettävissä. Käytettävissä olevan lähteen [29] tietojen voi kuitenkin olettaa olevan objektiivisia. Eri lähteistä tulevan tiedon fuusiointia ei käsitelty, vaikka se voi merkittävästi vaikuttaa tilannekuvan tarkkuuteen ja luotettavuuteen.

Viidennen sukupolven hävittäjät etenkin ryhmänä toimiessaan voivat itse tuottaa tilannekuvaa, mihin aiemmin tarvittiin ilmapuolustusjärjestelmän tuki, joka toki parantaa edelleen kokonaissuorituskykyä. Kyky omaan tilannekuvan tuottamiseen korostuneen tunkeuduttaessa syvälle vastustajan ilmatilaan, kun taas perinteisessä suomalaisessa lähinnä omalla alueella suoritettussa hävittäjätorjunnassa tämän merkitys on pienempi, mikäli valvonta- ja johtamisjärjestelmä kykenee tukemaan hävittäjiä reaaliaikaisesti riittävän kattavalla tilannekuvalla. Voidaan perustellusti väittää, että OODA-prosessi nopeutuu ainakin maamaaleja vastaan uuden hävittäjä sukupolven myötä. Nopeamman päätöksenteon lisäksi myös päätösten luotettavuus lisääntyy ja vaikutuksen tarkkuus kasvaa. On kuitenkin huomioitava, että tulevaisuudessa kohteet ovat nykyistä vaikeammin havainnoitavia. Mikäli vastakkain ovat 5. sukupolven hävittäjät ja havainnointi perustuu vain tutkiin, saatetaan ehkä ajautua aiottua useammin näköyhteyden sisällä käytävään ilmataisteluun. Verkottamisella ja lähetinpaikantamisen hyödyntämisellä tätä voidaan välttää, mutta riittävän maalinosoituskyvyn varmistamiseksi tulee viiveiden olla erittäin lyhyet.

Tarkasteltaessa vaatimuksia F-18 Hornetin seuraajalle on huomioitava tilannetietoisuutta lisäävien ja mahdollista etumatkaa vastustajaan lisäävien kykyjen kehittyminen. Mikäli mahdollisella vastustajalla on käytössä hyvät häiveominaisuudet omaava kone, jossa on edellä kuvatuista kaltaisten järjestelmien tuottamia kykyjä, on tilannekuvan suhteellinen ero 4. sukupolven hävittäjään kuten Hornetiin murskaavan ylivoimainen. Kaikkia kuvattuja järjestelmien tuottamia ominaisuuksia ei välttämättä ole käytössä 5. sukupolven koneiden käyttöönottovaiheessa, mutta ne tulevat todennäköisesti saataville myöhempien ohjelmistopäivitysten myötä. Toisaalta 4.5 sukupolven hävittäjään kuten Gripen NG:hen voidaan periaatteessa sisällyttää

vastaavia järjestelmiä kuin JSF:ssä. Potentiaali voidaan kuitenkin hyödyntää täysimääräisesti vain, mikäli järjestelmät on huomioitu hävittäjän suunnittelussa alusta pitäen. Tilannetietoisuutta luovia järjestelmiä päivitetään tyypillisesti koko lentokoneen elinkaaren ajan ja päivitysten määrä ja edistyksellisyys ovat suoraan verrannollisia ko. hävittäjää käyttävän yhteisön maksukykyyn. Mikäli hävittäjän käyttäjämaita on vain vähän ja määrät ovat pieniä, voi hävittäjän suorituskyvyn kehittyminen elinkaaren aikana jäädä hitaaksi.

Jatkotarkastelulle on useita tutkimusaiheita. Kiinnostavaa on luonnollisesti tarkastella tässä käsiteltyihin kykyihin liittyvien eri muuttujien merkitystä 5. sukupolven hävittäjien välisessä ilmataistelussa esimerkiksi ilmataistelusimulaatio-ohjelmien avulla. Puolustukseen käytettävissä olevien vähenevien materiaalmäärärahojen aikakaudella voisi myös tarkastella samalla tavalla 4.5 sukupolven hävittäjän suorituskykyä suhteessa vastustajan 5. sukupolven hävittäjään. 4.5 sukupolven hävittäjässä voisi periaatteessa olla tässä tutkielmassa esitetyn kaltaisia järjestelmiä, jolloin merkittävimmäksi eroksi tilannetietoisuuden kannalta jäisivät häiveominaisuudet. Hornetin seuraajaa tarkasteltaessa eräs keskeinen kysymys lienee se, missä määrin kehittyneillä järjestelmillä ja koneiden verkottamisella osaksi kehittyntä monipuolista ilmapuolustusjärjestelmää sekä elektronisen vaikuttamisen keinoin voidaan kompensoida mahdollisia puutteita ja eroja koneen muissa ominaisuuksissa. Tiiviiseen verkottamiseen tulee joka tapauksessa pyrkiä, jotta hyökkääjän häivekoneiden sijainti tiedetään riittävän aikaisin. Vertaessa integroidun ilmapuolustusjärjestelmän antamaa tukea suhteessa koneiden väliseen yhteistoimintaan on selvitettävä vaatimukset maalinosoituskyvyille. Maassa olevien sijaitsevien sensoreiden monipuolinen hyödyntäminen maalinosoitukseen olisi houkuttelevaa, mutta viiveiden asettamat rajoitukset voivat olla liian suuret. Em. kysymyksiin vastaaminen vaatii analyysiä ja simulaatiota todellisilla parametreilla, mikä lienee mahdollista vasta valmistajien kanssa tehtävän tiedonvaihdon myötä. Mitä ilmeisimmin F-18 Hornetin seuraaja tulee maksamaan erittäin paljon ja määrä tulee olemaan nykyistä pienempi. Tällöin on ehkä entistä tärkeämpää tarkastella avarakatseisemmin, onko nykyisen kaltainen hävittäjien suorittamiin puolustuksellisiin vastailmaoperaatioihin perustuva ilmapuolustus optimaalinen ratkaisu vai olisiko kustannustehokkaampaa ylläpitää ilmapuolustusta, jossa ilmatorjunnan ja hävittäjien yhteistoiminta ja maalinosoitus olisi nykyistä tiiviimpää, hävittäjien rinnalla olisi nykyistä kauaskantoisempaa ilmatorjuntaa sekä pitkän kantaman risteilyohjuksia, joilla vaikutettaisiin vastustajan ilma-aseeseen sen ollessa maassa. On ilmeistä, että tässäkin tapauksessa ilmapuolustuksen suorituskyky riippuu tilannetietoisuudesta. Eräänä jatkotarkastelun kohteena voisikin olla koko ilmapuolustusjärjestelmän vaatima tilannekuva tulenkäyttöön liittyen.

Ilmapuolustuksen pääasejärjestelmä eli F-18 Hornet poistuu vasta 2020-luvun loppupuolella, joten vielä ei ole kiire tarkastella korvaavaa suorituskykyä, mikäli hävittäjä korvataan toisella hävittäjällä. Riippuen valittavan hävittäjän järjestelmästä, voi kuitenkin olla tarve nykyistä tiiviimpään integraatioon koko ilmapuolustusjärjestelmän kanssa, mikä voi vaatia vuosien suunnitelmallisen työn ja asettaa tiukkoja vaatimuksia esim. reaaliaikaisuuden suhteen johtamis- ja valvontajärjestelmälle.

Viidennen sukupolven hävittäjän keskeisiä ominaisuuksia on pienen herätteen lisäksi hyvä tilannetietoisuus. Tilannekuvan muodostamisessa yhä tärkeämpään rooliin nousevat tehokas verkottaminen ja passiiviset sensorit. Vaikka tässä tutkielmassa ei analysoitu tilannetietoisuuden vaikutuksia ilmataistelun lopputulokseen, antanee tarkastelu kuitenkin suuntaa siitä, mihin kannattaa radiotaajuisten sensoreiden ja verkottamisen osalta kiinnittää Hornetin seuraaja-tarkastelussa huomiota.

LÄHTEET

-
- [1] Galland A., ”*Ensimmäiset ja viimeiset*”, 4.painos, WSOY 1957, 423 s.
- [2] Rekkedal N.M., ”*Nykyaikainen sotataito – sotilaallinen voima muutoksessa*”, 4. painos, Edita Prima Oy, Helsinki 2004, 579 s., ISBN 951-25-1733-7
- [3] *Royal Air Force Strategy*, Iso-Britannian puolustusministeriö, 2006, <http://www.raf.mod.uk>
- [4] *Future Air and Space Operational Concept*, Iso-Britannian puolustusministeriö, 2009, www.dcdc.dii.r.mil.uk
- [5] McMillan, G.R., *Report of the Armstrong Laboratory Situation Awareness Integration (SAINT) Team. In Situation Awareness: Papers and Annotated Bibliography*, Armstrong Laboratory, USAF Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, USA 1994
- [6] Sadeniemi M., *Nykysuomen sanakirja 1-6*, 15.painos, Helsinki, WSOY, 2002, ISBN 951-0-26973-5
- [7] JDCC, *Joint Air Operations Interim Joint Warfare Publications 3-30*, Iso-Britannian puolustusministeriö, October, 2003
- [8] Gertler J.J., ”*Tactical Aircraft Modernization :Issues for Congress*”, Report for Congress 25.11.2009
- [9] Raymer, D.P., ”*Next-Generation Attack Fighter Design Tradeoffs and Notional System Concept*”, Project Air Force, RAND, 1996, 83 s., ISBN 0-8330-2406-X
- [10] Norjan puolustusministeriö, *Utvidet fremskaffelsesløsning for prosjekt 7600 Fremtidig kampflykapasitet*, 31.10.2008, <http://www.regjeringen.no/>
- [11] <http://www.forces.gc.ca/site/pri/2/pro-pro/ngfc-fs-ft/notes-eng.asp>
- [12] Gonzales D. et al, ”*Network-Centric Operations Case Study: Air-to-Air Combat With and Without Link-16*”, RAND, 2005, ISBN 0-8330-3776-5, 21s.
- [13] Coniglio S., *Air Supremacy Options Combat Aircraft revisited*, Military Technology Magazine, 7/2010
- [14] Weigel J.T., Jahner T., *JSF interoperability initial capabilities and beyond*, Lockheed Martin 2009, www.f-16.net/f-16_forum_download-id-13717.html
- [15] Lehto J., *Taustatutkimus 5. sukupolven hävittäjän tärkeimmistä ominaisuuksista ilmatistelun kannalta*”, EUK:n tutkielma, MPKK, 2008
- [16] Raatikainen, T, ”*Tulevaisuuden taistelukone – venäläinen näkökulma*”, tutkielma, MPKK, 2004
- [17] Wihersaari K., ”*Häivetekniikka tulevaisuuden ilmasodankäynnissä*”, tutkielma, MPKK, 2010
- [18] Tiihonen J., ”*Häivehävittäjä ilmataistelussa*”, tutkielma, MPKK, 2009
- [19] Räisänen A., Lehto A., *Radiotekniikka*, Otatiето Oy, 1992, ISBN 951-672-149-4, 265 s.

- [20] Klemola O., Lehto A., *Tutkateknikka*, Otatiето Oy, 1998, ISBN 951-672-278-4 275s.
- [21] Wiley, R.G., *The Interception of Radar Signals*, Artech House, 1985, ISBN 0-89006-138-6, 284 s.
- [22] Kosola J, Solante T., *Digitaalinen taistelukenttä*, MPKK, Tekniikan laitos, Edita Prima, toinen painos, 533 s.
- [23] Adamy D.L., *EW 102:A second Course in Electronic Warfare*, Horizon House publications, ISBN 1-58053-868-7, 2004, 265 s.
- [24] Moore S., *UK Airborne AESA Radar Research*, IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, Vol 25 issue 2, February 2010
- [25] Callus P.J., *Conformal Load-Bearing Antenna Structure for Australian Defence Force Aircraft*, DSTO-TR-1963, March 2007, Australia
- [26] Helander E., "*Tracking with electronically scanned antenna radars*", diplomityö, TTKK, Tampere, 2004
- [27] <http://www.aviationtoday.com/av/issue/feature/1145.html>
- [28] Kopp C., *Synthetic aperture radar, NCW101 an introduction to network centric warfare*, ISBN 9780980550603, 2008
- [29] Moir I., Seabridge A., *Military Avionics Systems*, Wiley&Sons, 2007 ISBN 978-0-470-01632-9
- [30] http://www.gripen.com/NR/ronlyres/8E6558AC-0EF7-42D1-8C85-F587B1C440D0/0/090409_Gripen_NG_AESA_Radar.pdf
- [31] Stimson G.W., *Introduction to airborne radar*, 2nd edition, SciTech Publishing inc., 1998 ISBN: 1-891121-01-4
- [32] Coniglio S., *PAK FA: First observations*, Military Technology Magazine, 3/2010
- [33] Markov D.R., Hull A.W., Russian Federation's 5th Generation Fighter: PAK-FA (T-50) Program, 2.3.2010, Air Force Association, www.afa.org
- [34] Kopp C., *Assessing the Tihomirov NIIP L-band active electronically steered array*, 14.9.2009, Air Power Australia, www.ausairpower.net
- [35] http://www.aiaa.org/aerospace/images/articleimages/pdf/AA_Feb06_EOE.pdf
- [36] http://www.aviationtoday.com/av/issue/feature/Radar-Transmitting-Data_1056.html
- [37] Uwe Timke, myyntijohtaja, EADS Cassidian Air Systems, 7.3.2011
- [38] Bosse E, Roy J., Grenier D, "*Data fusion concepts applied to a suite of dissimilar sensors*, IEEE CCECE'96, Kanada, 26-29.5.1996
- [39] Smestad T. et al, "*ESM-sensors for tactical information in Air defence systems*", RTO SCI symposium 22-24.5. 2000, Valencia, Espanja
- [40] www.en.wikipedia.org/wiki/Lockheed_F-117_Nighthawk
- [41] www.era.cz/era/vera

-
- [42] Westra, A.G., "Radar versus stealth – passive radar and the future of U.S. military power", Joint Force Quarterly, National Defence University, USA, 2009
- [43] Ong, K.P., *Signal processing for airborne bistatic radar*, väitöskirja, University of Edinburgh, 2003
- [44] *Joint Publication 3-13.1 Electronic Warfare*, 25.1.2007, Joint Chiefs of Staff, USA
- [45] http://www.saabgroup.com/Air/Electronic_Warfare_Solutions/Radar_Warning_Receivers/BOW_Radar_Warning_and_ESM_System/
- [46] *Electronic Warfare and Radar Systems Engineering Handbook*, Naval Air Warfare Center, April 1999, Pt Mugu, CA, USA
- [47] Adamy D., *EW 102: a second course in electronic warfare*, Horizon house publications Inc. 2004, ISBN 1-58053-686-7
- [48] DI Kalle Martikainen, *Patria*, 10/2010
- [49] *Northrop Grumman's Load-Bearing Antennas Offer Airborne Surveillance Systems a Better Look at ground Targets*, Northrop Grumman press release 11.3. 2004, El Segundo, CA, USA
- [50] Callus P.J., *Conformal Load-Bearing Antenna Structure for Australian Defence Force Aircraft*, DSTO-TR-1963, March 2007, Australia
- [51] www.ausairpower.net/APA-Flanker-Radars.html
- [52] <http://www.saabgroup.com/Civil-security/Border-Security-Solutions/Coastal-Surveillance-Systems/Pilot/>
- [53] www.aerial.fi/ep/tiedostot/aerial-radar.pdf
- [54] www.armed-services.senate.gov Presentation to the Senate Armed Services Committee AirLand Subcommittee United States Senate: Air Force Tacair Programs, April 2010
- [55] http://www.aviationtoday.com/av/issue/cover/New-Sensors-are-Force-Multipliers_10777.html
- [56] Chen M., Fowler M.L., "Non-MSE data compression for emitter location of radar pulse trains", Proc. SPIE, VOL. 5208, Mathematics of Data/Image Coding, Compression and Encryption VI, with Applications, August 2003 San Diego, USA
- [57] Wu N.E., Shin J-Y, Huang K., "Sensor manoeuvre design for Microwave Localisation", 2009 American Control Conference, June 10-12 2009, St. Louis, MO, USA
- [58] Koks, D., "Numerical Calculations for Passive Geolocation Scenarios", DSTO- RR-0319, May 2007, Australia
- [59] Falk J. et al, *UAV ESM förstudie – slutrapport*, FOI-R-2054 –SE Teknisk rapport, Augusti 2006, Sverige
- [60] www.L-3com.

-
- [61] JDCC, "*Real-time exchange of tactical data Joint Doctrine Pamphlet*", Iso-Britannian puolustusministeriö, October 2001
- [62] www.eda.europa.eu/documents.aspx *Launch of High Bandwidth communications – datalink project ETAP TDP 1.4C*
- [63] Ghashghai E., *Communications networks to support integrated intelligence, surveillance, reconnaissance and strike operations*, Project Air Force, ISBN 0-8330-3663-5, RAND 2004
- [64] www.af.mil/new/story.asp?id=123143663
- [65] Sweetman B., "*F-22 and F-35 Suffer From Network Gaps*", Aviation Week, December 11, 2007
- [66] Sunderlin S. et al, *A smarter net*, C4ISR Journal, June 2008, USA
- [67] Weigel J.T., Jahner T., *JSF interoperability initial capabilities and beyond*, Lockheed Martin 2009, www.f-16.net/f-16_forum_download-id-13717.html
- [68] Lantz F. et al., *Sensorsamverkan för störundertryckning*, FOI-R-2330 SE, September 2007, Sweden
- [69] www.emsdss.com
- [70] W.L.Williams "*Advanced lightweight electronically steered antennas for responsive space payload*", 1st responsive space conference, 1-3.4.2003, CA, USA
- [71] www.q-par.com
- [72] IEEE standard 802.16 for local and metropolitan area networks, Part 16: Air interface for broadband wireless access systems, IEEE, New York, USA, May 2009,
- [73] http://www.toshiba.com/taec/news/press_releases/2008/mwrf_08_532.jsp
- [74] Halme J., *Televiestintäjärjestelmät*, Otatiето Oy, 1992, ISBN 951-672-163-X
- [75] Teniente-Vallinas J. et al, "*Modern corrugated horn antenna design for extremely low sidelobe level*", 26th ESA Antenna technology workshop on satellite antenna modelling and design tools, 12-14.11. 2003, ESTEC, Noordwijk, the Netherlands