

Veli Pihlaja

# Älyantennien käyttömahdollisuuksia sotilasradioverkoissa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Tietotekniikka

Insinöörityö

16.4.2015

Tekijä Otsikko	Veli Pihlaja Älyantennien käyttömahdollisuuksia sotilasradioverkoissa
Sivumäärä Aika	35 sivua 16.4.2015
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Tietotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	
Ohjaaja	yliopettaja Tero Nurminen
<p>Insinööriyössä arvioitiin erityyppisten älyantennien käyttömahdollisuuksia sotilasradioverkoissa. Älyantenneista tarkasteltiin kytkettävän keilan antennia, adaptiivisia antennia ja MIMO-antenneja. Työhön ei sisällytetty käytännön mittauksia tai testauksia vaan tarkastelu tehtiin teoreettisesti. Työn lähdemateriaalina käytettiin vain julkisia lähteitä.</p> <p>Työssä käsiteltiin keskeiset antennien ominaisuuksia kuvaavat parametrit sekä tarkasteltavien älyantennityyppien toimintaperiaate. Lisäksi käsiteltiin radioaaltojen etenemiseen vaikuttavat tekijät VHF/UHF-taajuusalueella, sotilasradioverkkojen erityispiirteet sekä elektronisen sodankäynnin asettamat vaatimukset käytettävälle antennille. Älyantenneja vertailtiin tavanomaisiin antenneihin antennin ominaisuuksia kuvaavien parametrien avulla käyttäen tarkastelun pohjana kolmea erityyppistä antennien käyttöskenaariota.</p> <p>Työn perusteella älyantennien hyödyt tavanomaisiin antenneihin verrattuna tulevat erityisesti esille elektronisen sodankäynnin asettamien vaatimusten kannalta. Keskeinen älyantennin etu on kyky säteilykuvion nollakohdan muodostamiseen. Kaupunkiympäristössä toimittaessa voidaan myös hyödyntää MIMO-tekniikkaa yhteyden kapasiteetin ja luotettavuuden kasvattamiseen.</p> <p>Haasteena älyantennien käytössä on antennielementtien koko ja siten antennin asentamisesta erityyppisiin lavetteihin aiheutuvat haasteet. Siirtyminen korkeampien taajuuksien käyttöön pienentäisi antennielementtien kokoa ja toisi siten lisää mahdollisuuksia älyantennitekniikoiden hyödyntämiseen.</p>	
Avainsanat	älyantennit, sotilasradioverkot, elektroninen sodankäynti

Author Title	Veli Pihlaja Possibilities to use smart antennas in military radio networks
Number of Pages Date	35 pages 16 April 2015
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Information Technology
Specialisation option	
Instructor	Tero Nurminen, Principal Lecturer
<p>The significance of radio communications has increased in modern warfare. The antenna is a critical component of a radio system. The purpose of this thesis is to evaluate possibilities to use smart antennas in military radio networks. Switched beam antennas, adaptive antennas and MIMO antennas are included in this analysis.</p> <p>This thesis presents the parameters describing the antenna properties and the working principle of smart antennas. Electromagnetic radiation propagation factors affecting the VHF/UHF band, military radio network specific characteristics and requirements of electronic warfare are also discussed. Smart antennas are compared to conventional antennas in three scenarios. This thesis is a theoretical study and any practical measurements have not been made. The work is based on publicly available sources.</p> <p>The benefits of smart antennas are particularly relevant in electronic warfare. A key advantage is the ability to form a radiation pattern null. The challenge is the size of the antenna arrays in the VHF/UHF band. The transition to higher frequencies in radio communications would bring more opportunities for the exploitation of smart antenna techniques.</p>	
Keywords	smart antennas, military radio networks, electronic warfare

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johdanto	1
1.1	Antennien merkitys sotilasradioverkoissa	1
1.2	Työn päämäärä ja rajaukset	2
1.3	Työn rakenne	3
2	Älyantennit ja niiden ominaisuudet	4
2.1	Antennin toimintaperiaate ja ominaisuudet	4
2.2	Älyantennit	8
2.2.1	Kytettävän keilan antennit	9
2.2.2	Adaptiiviset antennit	11
2.2.3	MIMO-antennit	14
3	Sotilasradioverkkojen vaatimuksia käytettävälle antennille	17
3.1	Radioaaltojen eteneminen VHF- ja UHF-alueilla	17
3.2	Sotilasradioverkot ja antennit VHF- ja UHF-taajuusalueilla	19
3.3	Elektroninen sodankäynti	21
4	Älyantennien hyödyntämismahdollisuuksia sotilasradioverkoissa	23
4.1	Radioverkot maan pinnalla rakennetussa ympäristössä	23
4.2	Radioverkot maan pinnalta ilmaan	27
4.3	Radioverkot avomerellä	29
5	Yhteenveto	32
	Lähteet	34

## Lyhenteet

3G	<i>Third Generation.</i> Kolmannen sukupolven matkapuhelinverkko.
4G LTE	<i>Fourth Generation Long Term Evolution.</i> Neljännen sukupolven matkapuhelinverkkotekniikka.
BER	<i>Bit Error Rate.</i> Bittivirhesuhde.
dB	Desibeli.
dBi	Desibeliä isotrooppiseen säteilijään verrattuna.
ERP	<i>Effective Radiated Power.</i> Säteilyteho.
GHz	Gigahertsi.
GPS	<i>Global Positioning System.</i> Maailmanlaajuinen paikannusjärjestelmä.
MANET	<i>Mobile Ad Hoc Network.</i> Langaton itsestään konfiguroituva verkko.
MHz	Megahertsi.
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output.</i> Tietoliikennetekniikka, jossa sekä lähetykseen että vastaanottoon käytetään yhtäaikaaisesti useita antenneja.
SINR	<i>Signal to Interference plus Noise Ratio.</i> Signaalin suhde häiriöön ja kohinaan.
SISO	<i>Single Input Single Output.</i> Tietoliikennetekniikka, jossa sekä lähetykseen että vastaanottoon käytetään yhtä antennia.
SOI	<i>Signal of Interest.</i> Haluttu lähete.
TETRA	<i>Terrestrial Trunked Radio.</i> Viranomaisille suunnattu digitaalinen radioverkko.

UHF      *Ultra High Frequency.* Taajuusalue 300 MHz–3 GHz.

VHF      *Very High Frequency.* Taajuusalue 30-300 MHz.

Wi-Fi    *Wireless Fidelity.* Langaton lähiverkko.

# 1 Johdanto

## 1.1 Antennien merkitys sotilasradioverkoissa

Nykyaikaisessa sodankäynnissä luotettavasti toimivat tietoliikenneyhteydet ovat välttämätön edellytys joukkojen johtamisen, tilannekuvan muodostamisen ja menestyksekkään taistelun kannalta. Sotilasjoukkojen, -ajoneuvojen ja -alusten liikkuvuuden takia tietoliikenneyhteydet perustuvat usein kiinteiden yhteyksien sijaan radioiden käyttöön eli sähkömagneettisen spektrin hyödyntämiseen. Sähkömagneettista spektriä kutsutaankin sodankäynnin viidenneksi ulottuvuudeksi. Se, joka hallitsee sähkömagneettista spektriä näkee, kuulee ja kykenee johtamaan saavuttaen siten taistelun voittamisen edellytykset. [1.]

Tietoliikenneyhteyksien kannalta sähkömagneettisen spektrin hyödyntäminen tapahtuu erilaisten radiolähtettimien ja -vastaanottimien muodostamien verkkojen avulla. Näiden verkkojen ja järjestelmien toimintaa pyritään edistämään tai haittaamaan ja niistä pyritään saamaan tietoja elektronisen sodankäynnin keinoin. Sotilasradioverkkojen kannalta keskeisimpinä elektronisen sodankäynnin uhkina voidaan pitää vastustajan toteuttamaa elektronista tiedustelua ja elektronista häirintää. Kyky suojautua näiltä elektronisen sodankäynnin osa-alueilta sekä teknisin että toiminnallisoin keinoin on ensiarvoisen tärkeää tietoliikenneyhteyden toimivuuden ja luotettavuuden kannalta.

Radioverkon toiminta riippuu käytettävien lähtettimien, vastaanottimien ja antennien ominaisuuksista sekä sähkömagneettisen säteilyn (radioaaltojen) etenemisestä näiden välillä. Antenni on siis yksi radiojärjestelmän kriittisistä komponenteista. Sotilasradioverkkojen taistelunkestävyyden kannalta käytettävillä antenneilla on ratkaiseva merkitys järjestelmän uhka-alttiuteen ja haavoittuvuuteen. Antennien ominaisuudet vaikuttavat suoraan järjestelmän havaittavuuteen ja häirinnänsietokykyyn.

Älyantenneiksi nimitetään antenneja, joiden ominaisuuksia voidaan muuttaa ulkoisella ohjauksella tai ne muuttuvat toimintaympäristön vaatimusten mukaisesti. Älyantenneihin kuuluvat esimerkiksi kytkettävän keilan antennit (switched beam antennas), adaptiiviset antennit ja MIMO-antennit. Älyantenneista adaptiiviset antennit mukautuvat toimintaympäristönsä. Esimerkiksi antennin säteilykuviota voidaan muuttaa

dynaamisesti aikaansaaden vahvistusta hyötylähetteen suuntaan ja säteilykuvion minimikohta häirintälähetteen suuntaan. Tämä mahdollistaa yhteyksien toimivuuden myös tilanteessa, jossa tavanomaisilla antennilla se ei olisi mahdollista. Älyantennitekniikat mahdollistavat myös tiedonsiirtoyhteyden kapasiteetin kasvattamisen sekä heikentävät sen tiedusteltavuutta ja parantavat luotettavuutta. Tilanteeseen ja toimintaympäristöön automaattisesti mukautuvat antennit vähentävät myös ihmisen merkitystä järjestelmän toiminnan kannalta.

Erilaisia älyantenneja on käytetty jo 1950-luvulta alkaen sotilaskäytössä, tutkatekniikassa, satelliittitietoliikenteessä ja radioastronomiassa. Ensimmäiset adaptiiviset antennit olivat suurikokoisia, monimutkaisia ja kalliita. Mikroelektronikan kehittyminen ja tietokoneiden laskentatehon lisääntyminen on tehnyt mahdolliseksi luoda pienikokoisia ja edullisia adaptiivisia antenneja kaupalliseen käyttöön. Erityisesti älyantennien käyttömahdollisuudet matkapuhelinverkoissa (3G ja 4G LTE) sekä Wi-Fi-järjestelmissä ovat lisänneet antennien tutkimusta ja kehitystä maailmanlaajuisesti. Samalla julkisen tiedon määrä on lisääntynyt. Kaupungistumisen myötä rakennettu ympäristö on tuonut omat haasteensa kuten radiosignaalin monitie-etenemisen, jota myös kyetään hyödyntämään älyantennitekniikassa. [2; 3.]

## 1.2 Työn päämäärä ja rajaukset

Työn tarkoituksena on arvioida älyantennien käyttömahdollisuuksia erilaisissa sotilasradioverkoissa. Antennien ominaisuuksia arvioidaan sekä niiden säteilyominaisuuksien sekä mekaanisiin ominaisuuksiin perustuvien sotilaallisten käytettävyysominaisuuksien kannalta. Erityisesti tarkastellaan antennien käyttömahdollisuuksia elektroninen sodankäynnin (elektronisen tiedustelun ja häirinnän väistön) kannalta. Tarkastelu on rajattu VHF- ja UHF -taajuusalueiden (30-300 MHz ja 300 MHz–3 GHz) antenneihin, koska pääsääntöisesti lyhyen kantaman (näköyhteysreitti) sotilasradiojärjestelmät toimivat VHF- ja UHF-taajuusalueilla.

Työ on tyypiltään katsaus erilaisiin älyantennitekniikoihin, joiden soveltuvuutta sotilasradioverkkoihin arvioidaan antennin ominaisuuksia kuvaavien parametrien avulla. Työ ei sisällä käytännön mittauksia tai testauksia vaan on tarkastelu on teoreettinen. Työ perustuu julkisiin lähteisiin.



### 1.3 Työn rakenne

Työn toisessa luvussa esitellään antennin yleinen toimintaperiaate ja sen toimintaa kuvaavat parametrit. Lisäksi käsitellään erityyppisiä älyantenneja (kytkettävän keilan antennit, adaptiiviset antennit sekä MIMO-antennit), niiden toimintaperiaatteita, ominaisuuksia ja rakennetta. Ominaisuuksissa painotetaan antennien säteily- ja mekaanisia ominaisuuksia.

Kolmannessa luvussa käsitellään VHF- ja UHF-taajuusalueiden sotilasradioverkkoja, niiden rakennetta ja käyttötarkoituksia. Lisäksi tarkastellaan verkkoihin vaikuttavaa elektronista sodankäyntiä ja sen muodostamaa uhkakuva. Luvussa tuodaan esille, mitä ominaisuuksia verkon rakenne ja toiminta, elektroninen sodankäynti ja radioaaltojen eteneminen taajuusalueella edellyttävät antennilta sotilaskäytön kannalta.

Neljännessä luvussa arvioidaan erityyppisten älyantennien soveltuvuutta sotilasradioverkkojen tarpeisiin. Älyantenneja vertaillaan tavanomaisiin antenneihin kolmen erilaisen kuvitteellisen skenaarion avulla. Vertailussa huomioidaan antennilla aikaansaatava kantaman ja kapasiteetin lisäys, elektronisen sodankäynnin vaikutus sekä antennin mekaaniset ja käytettävyysominaisuudet.

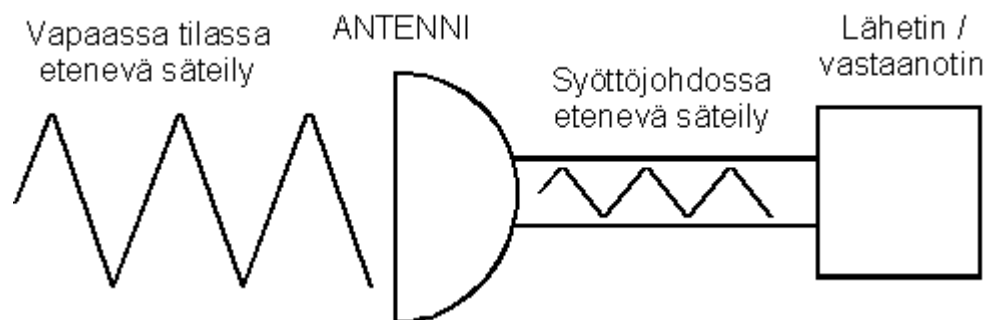
Työssä saaduista havainnoista tehdään yhteenveto työn viidennessä luvussa.

## 2 Älyantennit ja niiden ominaisuudet

Tässä luvussa käsitellään antennin toimintaa kuvaavat parametrit sekä älyantennien toimintaperiaate ja rakenne. Tarkastelu keskittyy antennien säteily- ja mekaanisiin ominaisuuksiin koska ne ovat keskeisimmät tekijät sotilasradioverkkojen ja elektronisen sodankäynnin vaatimusten kannalta. Tarkastelua ei sidota mihinkään tiettyyn lähetinvastaanottimeen, joten antennien sähköiset ominaisuudet jätetään vähemmälle huomiolle.

### 2.1 Antennin toimintaperiaate ja ominaisuudet

Antenni on laite, jonka avulla sähkömagneettista energiaa (radioaaltoja) lähetetään tai otetaan vastaan ympäröivästä avaruudesta. Antennilla lähettimessä muodostettu teho pyritään siirtämään mahdollisimman tehokkaasti vapaaseen tilaan tai päinvastoin, vapaasta tilasta vastaanottimeen. Antennien rakenne riippuu suuresti taajuudesta ja käyttötarkoituksesta. Antennin toimintaperiaate on esitetty kuvassa 1. [4.]



Kuva 1. Antennin toimintaperiaate.

Antennien resiprookkisuden (vastavuoroisuus) takia antennin ominaisuudet eivät poikkea toisistaan lähetyksessä tai vastaanotossa. Esimerkiksi antenni lähettää ja vastaanottaa parhaiten samasta suunnasta. Antennin ominaisuudet voidaan jakaa seuraavasti [1.]:

- Ympäröivään tilaan vaikuttavat ominaisuudet eli säteilyominaisuudet (esim. suuntaavuus, vahvistus, keilanleveys, suuntakuvio ja polarisaatio).
- Lähettimeen tai vastaanottimeen vaikuttavat ominaisuudet eli sähköiset ominaisuudet (esim. impedanssi, hyötysuhde, kaistanleveys).

- Käyttöympäristöön vaikuttavat ominaisuudet eli mekaaniset ominaisuudet (esim. koko, paino, tuulikuorma).

### Suuntaavuus ja vahvistus

Suuntaavuus mittaa antennin kykyä keskittää säteilyä haluttuun suuntaan. Suuntaavuus on antennista lähtevän maksimitehotiheyden suhde keskimääräiseen tehotiheyteen. Antennin suuntaavuus lasketaan kaavalla 1 [5.]:

$$D = \frac{S}{S_{av}} \quad (1)$$

$D$  on suuntaavuus [lineaarisenä lukuna]

$S$  on tehotiheys pääkeilassa [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]

$S_{av}$  on tehotiheys keskimäärin [ $\text{W}/\text{m}^2$ ].

Osa tehosta kuluu antennissa metallipintojen ja dielektristen aineiden aiheuttamiin häviöihin kuten lämmöksi. Suuntaavuus ei huomioi näitä antennissa tapahtuvia häviöitä ja siksi antennin säteilyn keskittämiskykyä kuvaavana suurena käytetään yleisemmin antennin vahvistusta, jossa häviöt otetaan huomioon kertomalla suuntaavuus antennin hyötysuhteella. Hyötysuhde on antennin säteilytehon suhde antenniin syötettyyn tehoon. Vahvistus määritellään kaavan 2 avulla [4.]:

$$G = \eta_r D \quad (2)$$

$G$  on vahvistus [lineaarisenä lukuna]

$\eta_r$  on antennin hyötysuhde ( $0 < \eta_r < 1$ )

$D$  on suuntaavuus [lineaarisenä lukuna].

Vahvistus on siten suoraan verrannollinen antennin suuntaavuuteen hyötysuhteen ollessa vakio. Vahvistus ilmoitetaan yleensä desibeleinä isotrooppiseen säteilijään nähden. Ideaalinen isotrooppinen säteilijä säteilee tasaisesti ja häviöttömästi kaikkiin suuntiin, ja sen vahvistus on  $1 = 0 \text{ dBi}$ . [6.]

Antennin vastaanottokykyä kuvaa sieppauspinta-ala tai tehollinen pinta-ala. Antenni vastaanottaa säteilyä sieppauspinta-alan kokoiselta alueelta. Mitä suurempi

aallonpituus, sitä suuremmalta alueelta antenni vastaanottaa säteilyä. Sieppauspinta-alalla ja antennin vahvistuksella on kaavan 3 mukainen yhteys [6.]:

$$A_e = \frac{G_r \lambda^2}{4\pi} \quad (3)$$

$A_e$  on antennin sieppauspinta-ala [ $m^2$ ]

$G$  on antennin vahvistus [lineaarisenä lukuna]

$\lambda$  on aallonpituus [m].

#### Suuntakuvio, säteilykuvio ja keilanleveys

Antennin säteilykuvio kuvaa kulman funktiona jotain antennin säteilemän sähkömagneettisen kentän ominaisuutta, kuten tehotiheyttä, kentänvoimakkuutta, vaihetta tai polarisaatiota. Suuntakuviolla tarkoitetaan erityisesti antennin säteilemän tehotiheyden tai kentänvoimakkuuden kulmariippuvuutta. Yleensä tehotiheys maksimin suuntaan merkitään 0 dB:ksi. Yleensä suuntakuvio annetaan sekä horisontaali- että vertikaalitasolle, mutta koska antenni säteilee kolmiulotteiseen tilaan, on myös antennin suuntakuvio itse asiassa kolmiulotteinen kappale. Kuvassa 2 on esitetty esimerkki suuntaavan antennin säteilykuvioista. [4.]

Sivukeila- ja takakeilatasoilla tarkoitetaan antenniin muodostuvien sivukeilojen maksimin arvoa (desibeleissä) pääkeilaan verrattuna. Suuntaavissa antenneissa sivukeilat pyritään yleensä pitämään mahdollisimman pieninä. Antennin etu-takasuhde tarkoittaa antennin pääkeilan ja takakeilan suhdetta. [4.]

Maan pinta toimii heijastimena ja vaikuttaa siten voimakkaasti antennin säteilyyn. Antennin suuntakuvio on siis erilainen maan pinnalla tai sen läheisyydessä kuin vapaassa tilassa. Mitä korkeammalla maan pinnasta antenni on, sitä enemmän sen suuntakuvio alkaa muistuttaa vapaan tilan suuntakuviota.

Yksi säteilykuvioista määritettävistä parametreista on keilanleveys. Keilanleveydellä tarkoitetaan säteilykuvion nollakohtien välistä kulmaa. Yleisesti keilanleveyden määrittelyssä käytetään puolentehon eli 3 dB:n pisteitä. Antennin säteilykuvioista saa parhaan käsityksen, mikäli sen keilanleveydet annetaan sekä horisontaali- että

vertikaalitasossa (vaaka- ja pystykeilanleveys). Keilanleveyden perusteella voidaan laskea likiarvo antennin suuntaavuudelle kaavan 4 mukaisesti [5.]:

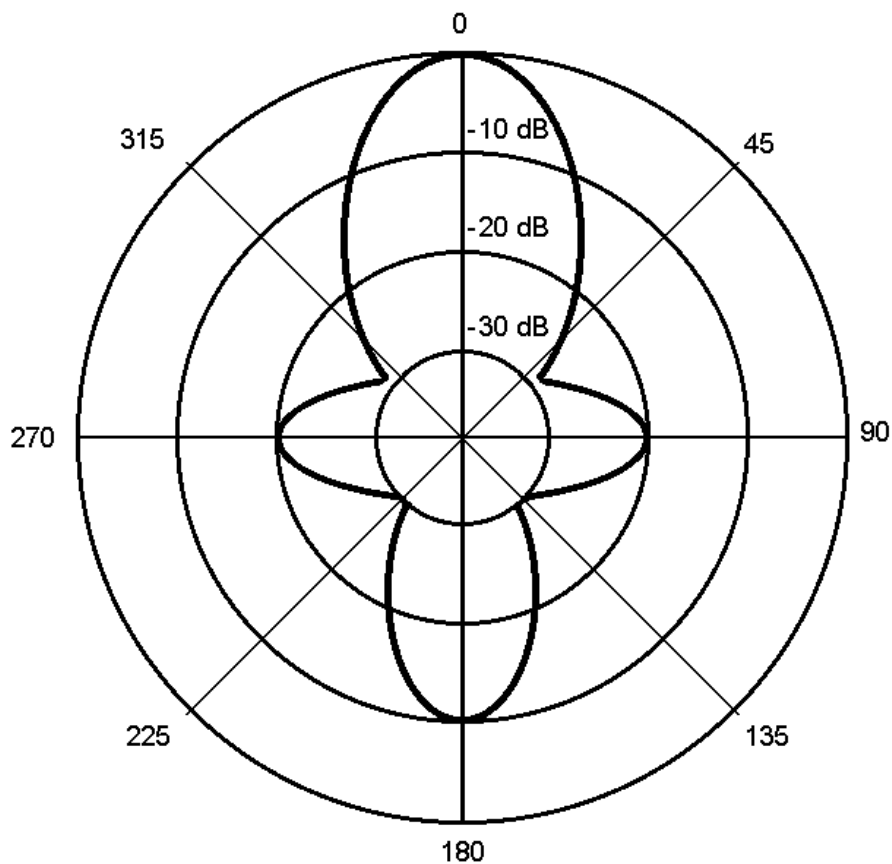
$$D = 41000/\Delta\varphi_1\Delta\varphi_2 \quad (4)$$

$D$  on suuntaavuus [lineaarisena lukuna]

$\Delta\varphi_1$  on keilanleveys horisontaalitasossa [asteina]

$\Delta\varphi_2$  on keilanleveys vertikaalitasossa [asteina].

Kuvassa 2 on esitetty kuvitteellinen suuntaavan antennin säteilykuvio. Kuviossa tehitiheys antennin pääkeilan suuntaan on merkitty 0 dB:ksi ja sivukeilojen vaimennus desibeleinä pääkeilaan nähden voidaan lukea asteikolta. Esimerkin säteilykuvioista nähdään, että antennin sivukeilatason taso on -20 dB ja etu/takasuhde -10 dB. Antennin säteilykuvion minimi eli kohta jossa vaimennus on suurimmillaan on noin +-135 astetta pääkeilasta, jolloin vaimennus pääkeilaan nähden on noin 30 dB.



Kuva 2. Kuvitteellinen suuntaavan antennin säteilykuvio.

## Polarisaatio

Antennin polarisaatio ilmoittaa antennin sähkökentän suunnan maanpintaan nähden. Polarisaatio voi olla lineaarinen tai kiertävä (elliptinen). Lineaarisia polarisaatioita ovat vertikaalinen (pysty) ja horisontaalinen (vaaka) polarisaatio. Kiertopolarisaatioita ovat oikea- ja vasenkätinen kiertopolarisaatio. Jos tulevan aallon polarisaatio on sama kuin antennin polarisaatio, aalto sovituu antenniin. Muussa tapauksessa syntyy polarisaatiovaimennusta, jota kuvataan polarisaatiohyötysuhteella. Lähetin- ja vastaanotinantennien polarisaatioiden tulisi siten olla aina samat. Puhtaasti horisontaalista tai vertikaalista polarisaatiota on kuitenkin käytännössä mahdotonta saavuttaa maastosta ja rakennuksista tapahtuvien heijastusten vuoksi, joten sähkömagneettinen säteily sisältää aina käytännössä molempia polarisaatioita. [4.]

Antenni on tavallisesti tarkoitettu toimimaan jollain tietyllä polarisaatiolla. Polarisaatiosuuntaan nähden ortogonaalista (kohtisuoraa) polarisaatiota sanotaan ristipolarisaatioksi. Ristipolarisaation aiheuttama vaimennus on noin 30 dB ja 45 asteen kulmassa olevilla polarisaatioilla teoriassa noin 3 dB. [1.]

## Antennin käytettävyysominaisuudet

Antennin käytettävyysominaisuudet ovat lähinnä antennin mekaanisia ominaisuuksia kuten koko, paino, muoto ja tuulikuorma. Näillä ominaisuuksilla on suuri merkitys antennin käytettävyyden kannalta. Erityisesti sotilaskäytössä antenniin kohdistuu usein vaatimuksia sen kuljetettavuudesta, kestävydestä ja helppokäyttöisyydestä. Lisäksi yhtenä usein ratkaisevan tärkeänä ominaisuutena on antennin hinta.

## 2.2 Älyantennit

Älyantennien toiminta perustuu useiden antennielementtien (antenniryhmien) käyttöön. Kun sama signaali (informaatio) vastaanotetaan samanaikaisesti usealla antennilla, on hyvin todennäköistä, että tietyllä ajanhetkellä ainakin yksi antenni vastaanottaa signaalia ilman liiallista häviötä. Älyantennissa on siis käytännössä kaksi tai useampia antennielementtejä. Antenniryhmä voi olla muodoltaan lineaarinen, tason, sylinterin tai pallon muotoinen. [3.]

Älyantennit tuovat useita etuja langattomien tietoliikenneyhteyksien toteutukseen. Älyantennien avulla voidaan vähentää monitie-etenemisen aiheuttamaa signaalin häipymistä, mikä on erityisesti ongelma kun vastaanotin liikkuu. Vastaanottoon voidaan tällaisessa tilanteessa valita yksi (paras) monitie-etenemisen kautta tulleista signaaleista. [2.]

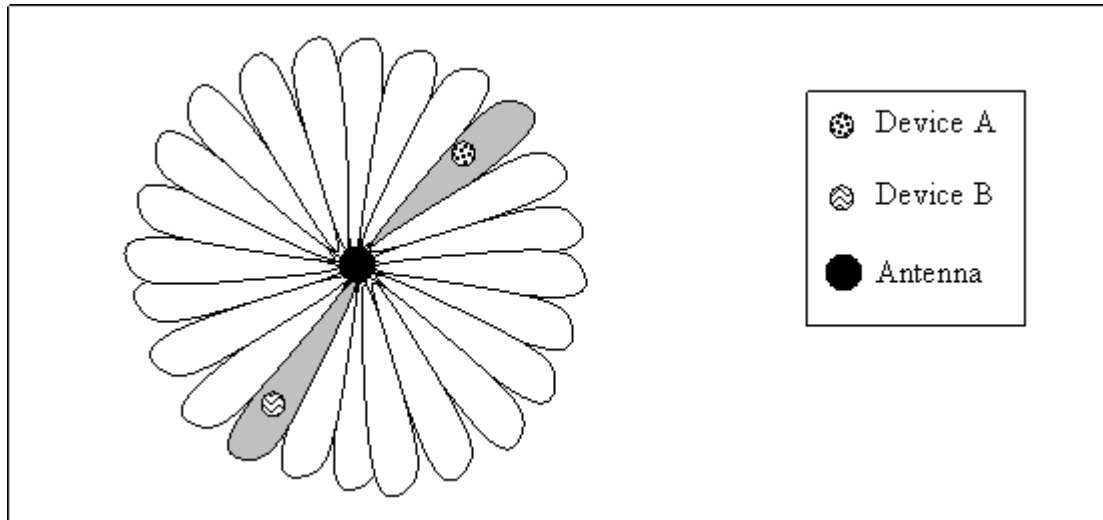
Ympärisäteilevässä tai väärin suunnatussa antennissa suurin osa säteilytehosta menee hukkaan. Pahimmillaan tämä hukkateho häiritsee muita käyttäjiä tai tukiasemia. Älyantennilla aikaansaatava suurempi antennivahvistus ja kapeampi keilanleveys kasvattaa radioyhteyden kantamaa tai tukiaseman kattavuutta. Tämä mahdollistaa pienempien lähetystehojen käytön eli samalla lähettimien virrankulutus pienenee. [2.]

Hyöty-yhteyden vahvistuksen kasvattamisen lisäksi voidaan älyantennilla luoda suuntakuvion nollakohtia häiriölähetettä kohti. Hyötylähetteen signaalin suhteen kasvaessa kohinaan ja häiriölähetteeseen verrattuna (signal to interference plus noise ratio, SINR) hyöty-yhteyden kapasiteetti kasvaa. [2.]

Tässä työssä älyantenneista käsitellään kytkettävän keilan antenneja, adaptiivisia antenneja sekä MIMO-antenneja.

### 2.2.1 Kytettävän keilan antennit

Kytettävän keilan antenni (switched beam antenna) on antenniryhmä, joka muodostaa useita kapeita kiinteitä keiloja. Kytettävän keilan antennit muodostavat yhdestä tukiasemasta (solusta) useita kapeita sektoreita. Jokaisella sektorilla on oma kapea kiinteä säteilykeilansa, jonka suurin vahvistus on sektorin keskellä. Järjestelmän kytkentäalgoritmi valitsee käyttöön keilan, josta saadaan voimakkain signaali. Järjestelmä tarkkailee jatkuvasti signaalin voimakkuutta ja valitsee tarvittaessa käyttöön toisen keilan. Kytettävän keilan antennin toimintaperiaate on esitetty kuvassa 3. [2;7.]



Kuva 3. Kytettävän keilan antennin toimintaperiaate [8.]

Kytettävän keilan antennit ovat älyantenneista yksinkertaisimpia ja suorituskyvyltään heikoimpia. Ne eivät ole varsinaisesti adaptiivisia (toimintaympäristöön mukautuvia) antenneja. Esimerkiksi tilanteessa, jossa yhdessä sektorissa tarvitaan paljon kapasiteettia, ei muiden sektorien kapasiteettia voi hyödyntää vaan ne menevät hukkaan. Keilojen on myös käytännössä mentävä osittain päällekkäin (limittäin) ja eivätkä ne ole tarkasti suunnattavissa.

Kytettävän keilan antennin suorituskykyyn vaikuttavat seuraavat parametrit [7.]:

- antennielementtien määrä  $M$
- antennielementtien välimatka  $d$
- pyyhkäisykulma  $\theta_0$ .

Lisäämällä antennielementtien  $M$  määrää suuntakuvion pääkeilan leveys pienenee eli se muuttuu kapeammaksi. Samalla antennin vahvistus kasvaa. Sivukeilojen määrä lisääntyy mutta ne muuttuvat pienemmiksi ja siten muodostuu syvemmät nollakohdat häirintälähetteen väistää varten. Haittapuolena on antenniryhmän koon kasvu ja mahdolliset fyysiset rajoitukset asennuksessa. Samalla myös antenniryhmän hinta nousee. [7.]

Antennielementtien välimatkaa suurentamalla saadaan keilanleveyttä kapeammaksi mutta samalla keilat muuttuvat säleikkömäisiksi (useita pieniä kapeita keiloja), mikä

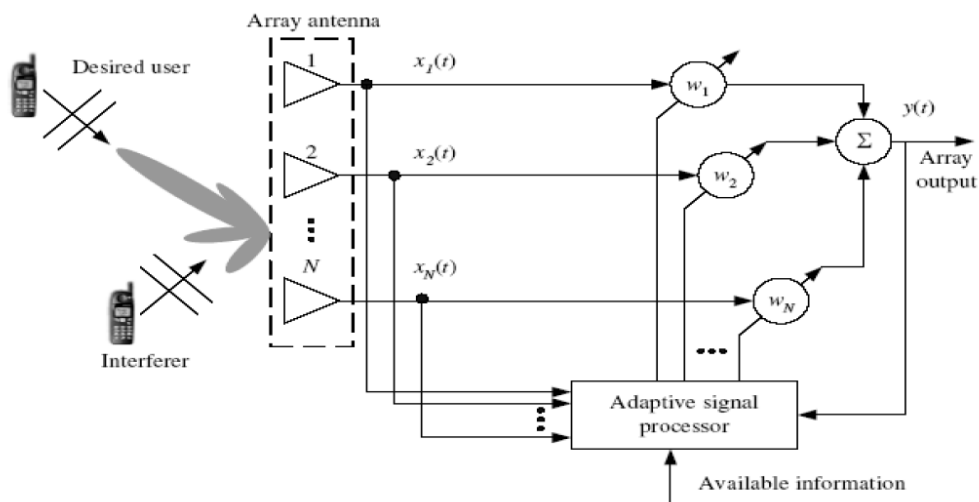


vaikuttaa häirintälähteiden väistöä. Antennin pyyhkäisykulman kasvattaminen kaventaa myös keilanleveyttä, mikä parantaa antennin suorituskykyä. [7.]

Esimerkiksi kahdestatoista puolen aallonpituuden etäisyydelle toisistaan asetetusta antennielementistä muodostuvassa antennissa puolentehon (3dB) pisteiden välinen kulma on noin kahdeksan astetta. [7.]

### 2.2.2 Adaptiiviset antennit

Adaptiivisilla antenneilla tarkoitetaan antenniryhmiä, joissa signaalien amplitudia ja vaihetta antennielementeissä säätämällä (painottamalla) elektronisesti saadaan aikaan haluttu säteilykuvio. Säteilykuvio muodostuu siis antenniryhmän geometriasta ja signaalien painotuksista. Adaptiiviseen antenniin kuuluu myös digitaalinen signaalinkäsittelyjärjestelmä jonka avulla haluttu signaali muodostetaan antenniryhmällä lähetettäväksi tai siirretään vastaanottimeen sekä hallintaohjelmisto. Adaptiivisen antennijärjestelmän periaatteellinen tarkoitus on minimoida järjestelmän muodostaman hyöty-yhteyden bittivirhesuhde (BER) digitaalisen signaaliprosessoinnin avulla. Adaptiivisen antenniryhmän rakenne on esitetty kuvassa 4. [3.]



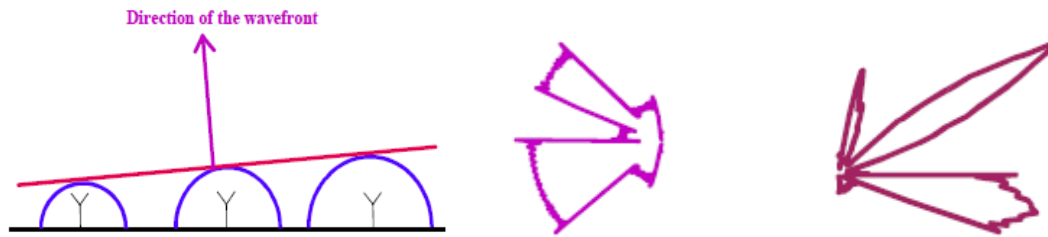
Kuva 4. Adaptiivisen antenniryhmän rakenne [9.]

Merkittävin ero adaptiivisella ja kytkettävän keilan antennilla on se, että adaptiivisen antennin keilat eivät ole kiinteitä vaan ne pystyvät seuraamaan haluttuja käyttäjiä. Myös säteilykuvion nollakohtia voidaan muodostaa ja liikuttaa ei-toivottujen häirintäsignaalien suutaan. Adaptiivisen antennin keilanmuodostusta voidaan siis

ohjata elektronisesti ja automaattisesti ympäröivää signaaliympäristöä vastaavaksi. Esimerkiksi ympärisäteilevä antenni voidaan muuttaa suuntaavaksi ja aikaansaada suuntakuviioon maksimi hyötylähetteen ja minimi tiedustelijan tai häirintälähetteen suuntaan. Vastaavasti tukiasema voidaan toteuttaa siten, että eri suunnissa olevat asiakkaat tai tilaajat voivat olla kiinni tukiasemassa samanaikaisesti samalla kanavalla tai taajuudella häiritsemättä toisiaan. Elektronisella ohjauksella suuntakuviion muutokset voidaan toteuttaa erittäin nopeasti verrattuna esimerkiksi tavanomaisiin mekaanisesti käännettäviin suunta-antenneihin.

Antennielementtien lukumäärä antenniryhmässä määrittää, montako maksimia tai nollakohtaa säteilykuviioon on mahdollista luoda. Jos antennielementtien lukumäärä on  $N$ , on mahdollista luoda korkeintaan  $N-1$  maksimia tai nollakohtaa. Antenniryhmissä vastaanotetun signaalin tulosuunta saadaan selville aikaeromittauksella antennielementtien välillä. Jos signaali saadaan mitattua useammasta vastaanotimesta, voidaan paikka määrittää myös kolmikantamittauksella. Adaptiivisissa antenniryhmissä tulisi olla antennoja kohtisuorissa polarisaatioissa toisiinsa nähden jotta ristipolarisaatiovaimennus saadaan eliminoitua. Tämä voidaan toteuttaa pienikokoisillakin antenneilla. [3; 7.]

Adaptiivisessa antennissa antennin keila muodostetaan vastaanotossa elektronisesti halutun lähetteen (signal of interest, SOI) tulosuuntaan tai lähetyksessä haluttuun lähetyssuuntaan. Vastaavasti ei-halutun signaalin saapuminen tunnetusta suunnasta voidaan estää asettamalla elektronisesti suuntakuviion nollakohta signaalin tulosuuntaan. Keilanmuodostukseen on olemassa useita erilaisia tekniikoita. Keilanmuodostusta kontrolloidaan muuttamalla jokaisen yksittäisen antennielementin amplitudia ja vaihetta ja yhdistämällä signaalit. Koska jokaisen elementin amplitudia ja vaihetta ohjataan yksilöllisesti, voidaan sekä lähetyksessä että vastaanotossa muodostaa samanlainen antennin suuntakuviio. Tämän edellytyksenä on, että lähetyks ja vastaanotto tapahtuvat samalla taajuudella. Laajakaistaisissa tai hyppivätaajuisissa järjestelmissä taajuuden vaihtuminen muuttaa antennin suuntakuviota. Kuvassa 5 on esitetty säteilysuunnan muodostuminen adaptiivisessa antennissa ja kaksi teoreettisesti mahdollista säteilykuviota. [3.]



Kuva 5. Säteilysuunnan muodostuminen adaptiivisessa antennissa ja kaksi teoreettisesti mahdollista säteilykuviota. [3.]

Yksittäisten antennielementtien vastaanottamat signaalit digitalisoidaan, painotetaan ja yhdistetään. Antennijärjestelmän hallintayksikön signaaliprosessori määrittää signaalien amplitudin ja vaiheen. Eri kanavien painotusarvot saadaan hallintayksiköltä. Hallintayksikkö voi olla esiohjelmoitu tai se käyttää sopivia hakualgoritmeja maksimoidakseen halutun signaalin suhteen häiriöön ja kohinaan (SINR). Käytännössä se tarkoittaa bittivirhesuhteen (BER) minimointia. [3.]

Adaptiivisen antennin ohjaus tapahtuu sähköisesti. Matemaattisesti kyse on antennielementtien painokertoimien laskemisesta, johon on olemassa useita erityyppisiä algoritmeja. Klassiset algoritmit perustuvat antennista saatavan signaalin vertaamiseen referenssisignaaliin. Niin sanotut sokean keilanmuodostuksen algoritmit taas luovat itse referenssisignaalin. Joka tapauksessa ohjausalgoritmin tulee olla riittävän nopea reagoidakseen toimintaympäristössä tapahtuviin muutoksiin reaaliaikaisesti. [3;7.]

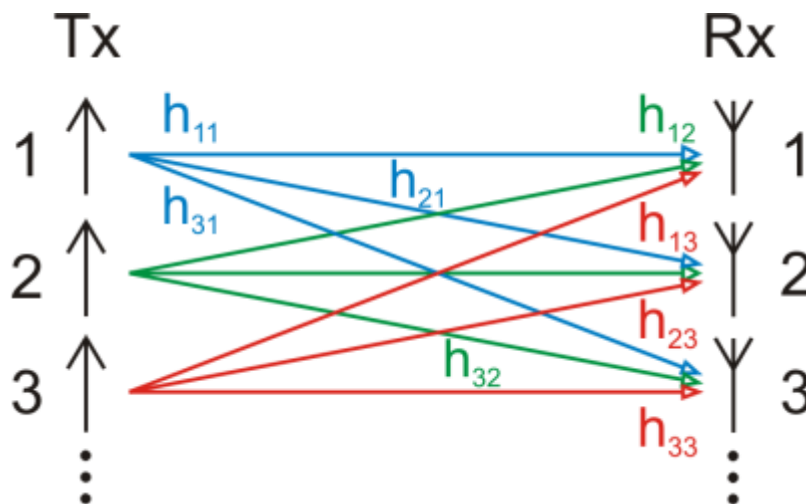
Lineaarisen tai ympyränmuotoisen antenniryhmän tilantarpeen takia on adaptiivisten antennien toteutus helpointa maanpäällisiin tukiasemiin tai suuriin ajoneuvoihin tai aluksiin. Ilma-aluksissa on helpointa käyttää tasonmallisia antenniryhmiä. Useiden ulkoisten antennien asentaminen ja käyttö ihmisvoimin mukana kannettavissa radiolaitteissa on haastavaa. Kuvassa 6 on testikäyttöön asennettu adaptiivinen antenniryhmä.



Kuva 6. Adaptiivinen antenni asennettuna testikäyttöön. [1.]

### 2.2.3 MIMO-antennit

MIMO (Multiple-Input and Multiple-Output) -tekniikassa antenniryhmiä käytetään sekä lähettimissä että vastaanottimissa samanaikaisesti. Kukin lähettävä-vastaanottava antennielementtipari muodostaa oman tiedonsiirtoyhteytensä. Näin lähettimen ja vastaanottimen välille muodostuu useita rinnakkaisia yhteyksiä samalla taajuudella. Lähettäjä pilkkoo datavirran eri antennielementeille ja vastaanotin kokoaa eri antennielementtien vastaanottamat datavirrat yhteen. MIMO-antenneilla voidaan siten muodostaa useita rinnakkaisia kanavia, jotka nostavat merkittävästi tiedonsiirron nopeutta ja luotettavuutta tavanomaisiin SISO-antenneihin nähden. Täten MIMO-antenneja käyttävän järjestelmän tiedonsiirtokapasiteetti kasvaa ilman kaistanleveyden lisäystä, mikä säästää taajuusresurssia. Kuvassa 7 on esitetty datakanavien muodostuminen MIMO-antennissa. [2.]



Kuva 7. MIMO -kanavan malli. [10.]

MIMO-yhteydessä hyödynnetään monitie-etenemistä, eli eri signaalit etenevät eri reittejä heijastuen esimerkiksi rakennuksista. Parhaiten MIMO-antennit toimivat rakennetussa ympäristössä, kuten kaupungissa, joka tarjoaa runsaasti mahdollisuuksia monitie-etenemiseen. Adaptiiviseen antenniin verrattuna MIMO -tekniikka toimii tehokkaammin kun signaalin suhde häiriöön ja kohinaan (SINR) on korkea, eli yhteysetäisyys lähettimen ja vastaanottimen välillä on riittävän pieni ja häiriön määrä on vähäinen. Tyypillisesti MIMO-antenniryhmässä antennit asetellaan eri polarisaatioihin (45 asteen kulmat toisiinsa nähden). [7.]

Mitä enemmän antennielementtipareja on käytössä, sitä suurempi tiedonsiirtokapasiteetti saavutetaan. MIMO-antenniryhmän tiedonsiirtokapasiteetti  $C$  lasketaan kaavalla 5 [7.]:

$$C = M_t \log_2 \left( 1 + \frac{\text{SINR}}{M_t} \right) \quad (5)$$

$M_t$  on lähetyksantennien lukumäärä

SINR on signaalin suhde kohinaan ja häiriöön.

MIMO-tekniikka on standardoitu Wi-Fi-verkkoihin sekä 3G- ja 4G-matkapuhelinverkkoihin ja se on otettu näissä kaupalliseen käyttöön. MIMO-järjestelmien tutkimus ja kehitys kaupalliseen käyttöön on voimakasta. Myös sotilaskäyttöön on kehitetty MIMO-tekniikkaa hyödyntäviä radioita (kuva 8).

Sotilaskäytössä MIMO -tekniikan avulla voidaan painottaa yhteydellä joko tiedonsiirtonopeutta tai luotettavuutta tilanteen ja tarpeen mukaan.



Kuva 8. Sotilaskäyttöön tarkoitettu MIMO-radio. [11.]

### 3 Sotilasradioverkkojen vaatimuksia käytettävälle antennille

Tässä luvussa käsitellään VHF-UHF-taajuusalueen, sotilasradioverkkojen rakenteen ja niissä käytettävien järjestelmien sekä elektronisen sodankäynnin antennille asettamia vaatimuksia.

#### 3.1 Radioaaltojen eteneminen VHF- ja UHF-alueilla

VHF-alueella (taajuus 30–300 MHz, aallonpituus 10–1 m) sähkömagneettinen säteily etenee pääasiassa näköyhteysreitillä (line of sight, LOS). Teoreettisen maksimin yhteysetäisyydelle määrittelee radiohorisontti, jonka sisällä vastaanottoaseman on sijaittava. Kasvillisuus ja maanpinnan peitteisyys lisäävät vaimennusta merkittävästi VHF-alueen yläpäässä, minkä vuoksi maanpäälliseen pitkän matkan (kymmeniä kilometrejä) viestiliikenteeseen käytetään pääasiassa VHF-alueen alapäätä. Pienen etenemisvaimennuksen vuoksi VHF-kenttäradiot toimivat tyypillisesti 30 ja 88 MHz:n välisellä kaistalla. [1.]

UHF-alueella (taajuus 300 MHz–3 GHz, aallonpituus 1–0,1 m) radioaalto etenee lähes pelkästään näköyhteysreitillä pitkin ja esteet näköyhteysreitillä vaimentavat signaalia voimakkaasti. Aluetta käytetään kiinteiden ja siirrettävien radiolinkkien tarpeisiin. NATO:n taktiset radiolinkit toimivat tällä alueella: I-kaista 225–400 MHz, II-kaista 610–960 MHz ja III-kaista 1350–1850 MHz. UHF-aluetta käytetään myös satelliittiliikenteeseen. [1.]

VHF- ja UHF-alueilla sähkömagneettisen säteilyn etenemiseen vaikuttavat [12.]:

- säteilyn leviäminen pitkällä etäisyyksillä
- heijastukset tasaisilta pinnoilta
- sironta epätasaisilta pinnoilta
- taittuminen ilmakehässä
- taipuminen kiinteistä esteistä
- absorptio radiotaajuisista säteilyä vaimentaviin kohteisiin.

Sähkömagneettisen säteilyn etenemistä voidaan mallintaa erilaisilla yleisillä ja kokeellisilla malleilla. Kokeelliset mallit perustuvat eri puolilla maailmaa tehtyihin mittauksiin. Tapauskohtaiseen yksittäistarkasteluun ei sovellu mikään malli, vaan siihen tarvitaan vähintään tietokonesimulaatio digitaalisen karttapohjan päällä. Mallien perusteella voidaan laskea kuitenkin arvioita vaimenemisen suuruudesta. Mallit antavat vaimennukselle mediaanin eri todellisista vaimennusarvoista puolet ylittävät ja puolet alittavat sen.

Vapaassa tilassa sähkömagneettisen säteilyn vaimeneminen desibeleinä voidaan laskea vapaan tilan mallilla kaavan 6 mukaan [1.]:

$$L = 32,4 + 20 * \log(f_{MHz}) + 20 * \log(R_{km}) \quad (6)$$

L on vaimennus [dB]

f on taajuus [MHz]

R on lähettimen ja vastaanottimen välinen etäisyys [km].

Jos sähkömagneettinen säteily ei etene vapaassa tilassa (yhteydet maan pinnalla), voidaan vaimennusmallina käyttää taajama-alueilla tehtyihin mittauksiin perustuvia Eglin kaavoja (kaavat 7 ja 8). Kaavoja voidaan soveltaa 1 - 80 km yhteysväleillä ja 30 - 1000 MHz taajuusalueella. [1.]

$$L = 85,9 + 20 \log(f) + 40 \log(R) - 20 \log(h_t) - 20 \log(h_r), \text{ jos } h_r > 10 \quad (7)$$

$$L = 76,3 + 20 \log(f) + 40 \log(R) - 20 \log(h_t) - 10 \log(h_r) \text{ muulloin.} \quad (8)$$

L on vaimennus [dB]

f on taajuus [MHz]

R on lähettimen ja vastaanottimen välinen etäisyys [km]

$h_t$  on lähetysantennin korkeus [m]

$h_r$  on vastaanottoantennin korkeus [m].

Avomerellä, jossa ei ole esteitä sähkömagneettisen säteilyn etenemisreitillä voidaan vaimennusmallina käyttää Plane Earth -mallia, joka ottaa huomioon sekä suoraan edenneen että meren pinnalta heijastuneen signaalin. Plane Earth -mallin mukaan vaimennus lasketaan kaavalla 9 [1.]:



$$L = 120 + 40 \log(R) - 20 \log(h_t) - 20 \log(h_r) \quad (9)$$

L on vaimennus [dB]

R on lähettimen ja vastaanottimen välinen etäisyys [km]

$h_t$  on lähetysantennin korkeus [m]

$h_r$  on vastaanottoantennin korkeus [m].

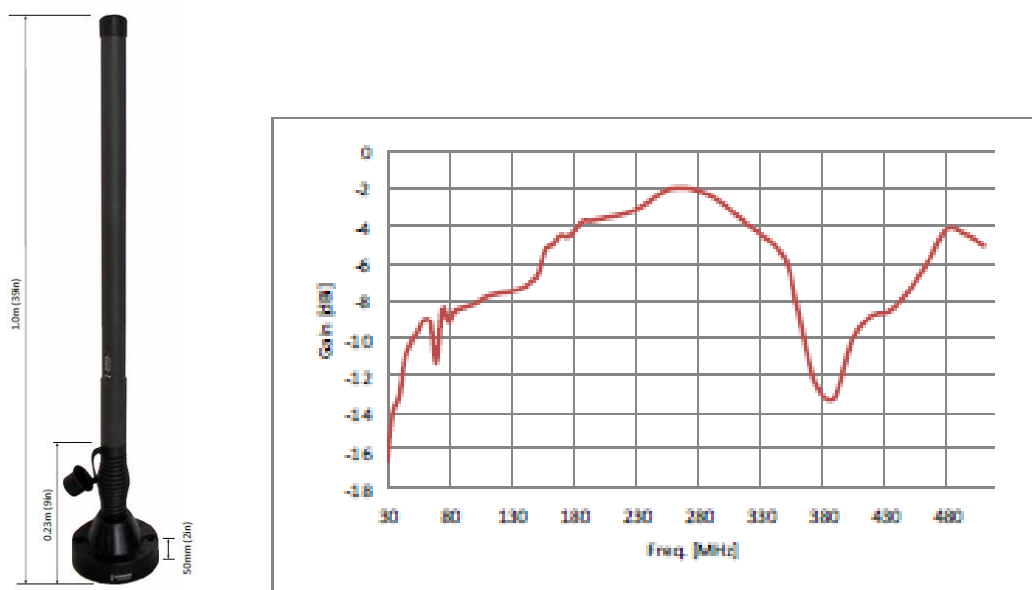
### 3.2 Sotilasradioverkot ja antennit VHF- ja UHF-taajuusalueilla

Sotilaskäytössä olevien radioverkkojen suunnittelu poikkeaa kaupalliseen käyttöön suunnitelluista verkoista kuten matkapuhelinverkoista. Sotilasradioverkoissa tavoitteena on loppukäyttäjien (sotilasjoukkojen) tarpeiden täyttäminen parhaalla mahdollisella tavalla siten, että joukot pystyvät toteuttamaan tehtävänsä ja saavuttamaan tavoitteensa. Verkon rakenteessa ja sähkömagneettisen spektrin hyödyntämisessä on huomioitava omien joukkojen tarpeiden lisäksi myös kansalliset ja isäntämaan määräykset, muut toimijat, liittolaiset sekä verkon toimintaa ja rakennetta tiedusteleva ja siihen vaikuttamaan pyrkivä vihollinen. Tämä edellyttää verkon rakenteelta taistelunkestävyyttä, muunneltavuutta ja vaihtoehtoja yhteyksien toteuttamiseksi sekä kattavaa taajuushallintaa. [12.]

VHF- ja UHF-taajuusalueella sotilaskäytössä olevia radiojärjestelmiä ovat mm. kenttäradiot sekä erilaiset taktiset datalinkit. Järjestelmiä käyttävät pääsääntöisesti liikkuvat yksiköt (ajoneuvot, alukset tai yksittäiset sotilaat kannettavilla radiolaitteilla). Yhteydet voivat olla esimerkiksi tilaajayhteyksiä viestijärjestelmän runkoverkon tukiasemiin tai yksiköiden välisiä suoria yhteyksiä, ilmasta-maahan yhteyksiä tai erilaisia ilma- tai pinta-alusten välisiä yhteyksiä. Verkkoja käytetään sekä puheen että datan välittämiseen. Maanpinnalla yhteysetäisyydet ovat antennikorkeudesta (radiohorisontti) riippuen tyypillisesti alle 30 kilometriä. Maasta ilmaan tai ilma-alusten välillä yhteysetäisyydet ovat huomattavasti pidempiä, antennikorkeudesta riippuen jopa useita satoja kilometrejä.

Sotilaskäytössä olevat radiojärjestelmät ovat usein hyppivätaajuisia, joten antennien tulee olla laajakaistaisia. Antenneina käytetäänkin usein tavanomaisia monopoli- tai dipoliantenneja, suuntaavina antenneina logaritmis-periodisia tai heijastinantenneja. Lavettien tilakysymysten takia pyrkimyksenä on usein integroida useita eri järjestelmiä

yhteen antenniin, esimerkiksi sotilasradiojärjestelmän lisäksi TETRA-, GPS- ja Wi-Fi antennejä. Antennit ovat siten usein kompromisseja eri järjestelmien vaatimusten välillä ja säteilyominaisuuksista on tingitty, esim. vahvistukset ovat pieniä. Kuvassa 9 on esitetty tavanomaisen laajakaistaisen ympärisäteilevän antennin vahvistus taajuuden funktiona, josta on havaittavissa että antenni ei millään taajuudella varsinaisesti vahvista signaalia.



Kuva 9. Sotilaskäyttöön tarkoitettu VHF/UHF -taajuusalueen piiska-antenni ja sen vahvistus taajuuden funktiona. [13.]

Pääsääntöisesti antennin tulee olla aina toimintavalmiina. Liikkuva toiminta edellyttää, että antenna ei tarvitse erikseen pystyttää toimintakuntoon vaan viestiyhteyden ja siten myös antennin on oltava jatkuvasti käyttökunnossa. Antennin on kestävä joukon toiminnasta ja olosuhteista aiheutuvia vaikutuksia, kuten tärähdyksiä ja kolhuja ilman, että sen ominaisuudet merkittäväällä tavalla muuttuvat. Mitä enemmän antennissa on komponentteja, sitä enemmän antennissa on vikaantumismahdollisuuksia.

Antenni tulee siis olla valmistettu mahdollisimman kestävästä, mutta samalla mahdollisimman kevyestä materiaalista. Materiaaleina alumiini ja hiilikuitu ovat sopivia ratkaisuja tähän ongelmaan. Myös antennin väriin tulee olla toimintaympäristöön sopiva. Taistelukentän olosuhteiden lisäksi myös sääolosuhteet asettavat vaatimuksia sekä antennin että antennimaston kestävyydelle. Erityisesti korostuvat tuulen, lämpötilanvaihteluiden, absorboituvan lämpösäteilyn, kosteuden, lumen ja jään

aiheuttamien vaikutusten sietokyky. Käytännössä antennilta on vaadittava, että se täyttää esimerkiksi Yhdysvaltain puolustusministeriön MIL-STD-810-testit. [14.]

### 3.3 Elektroninen sodankäynti

Elektroninen sodankäynnin tarkoituksena on estää vastustajalta sähkömagneettisen spektrin hyödyntäminen ja edistää omien joukkojen sähkömagneettisen spektrin hyödyntämistä sodankäynnin tavoitteiden mukaisesti. Elektroninen sodankäynti jakaantuu elektroniseen hyökkäykseen (elektroniseen vaikuttamiseen), elektroniseen suojautumiseen ja elektronisen sodankäynnin tukeen. Nämä jakaantuvat edelleen pienempiin osa-alueisiin, joista tässä työssä käsitellään elektronisen sodankäynnin tukeen kuuluvaa elektronista tiedustelua ja elektroniseen hyökkäykseen kuuluvaa elektronista häirintää. [1;15.]

#### Elektroninen tiedustelu

Elektroninen tiedustelu on jatkuvaa ja se alkaa jo ennen taistelujen alkua. Vihollinen pyrkii viestiyhteyksiin kohdistuvan elektronisen tiedustelun avulla selvittämään teknisiä tietoja kuten kaluston laadun ja käytettävät taajuudet sekä taktisia tietoja kuten ryhmyksen, radioaseman ja vasta-aseman sijainnin sekä viestitysperiaatteet. Verkon rakenteen ja käyttöasteen perusteella voidaan päätellä viestijärjestelmää käyttävien joukkojen määrät ja tyypit. Vihollinen saattaa pyrkiä myös sanomien sisällön selvittämiseen. Operatiivisen elektronisen tiedustelun ja valvonnan tavoitteena on reaaliaikaisen elektronisen tilannekuvan luominen ja ylläpito. Elektronisen tiedustelun järjestelmien lavetteina voidaan käyttää aluksia, ajoneuvoja, helikoptereita, lentokoneita ja lennokkeja. [1.]

Elektronisen tiedustelun ulottuvuus riippuu sähkömagneettisen säteilyn suurimmasta sallitusta etenemisvaimennuksesta. Tämä puolestaan riippuu lähettimen säteilytehosta (ERP, Effective Radiated Power) tiedusteluvastaanottimen suuntaan (lähetystehon ja antennivahvistuksen tulo) sekä tiedustelujärjestelmän herkkyydestä ja antennivahvistuksesta lähettimen suuntaan. Mitä laajempaa aluetta tiedustelujärjestelmällä halutaan valvoa, sitä pienempi on sen antennivahvistus ja sitä lähemmäs järjestelmän on päästävä tiedusteltavaa kohdetta. Tiedustelujärjestelmällä signaalista mitattavia parametreja ovat taajuus, suunta, tuloaika, amplitudi,

kaistanleveys, modulaatio, polarisaatio, lähetteen pituus, lähetteen nousu- ja laskuaika sekä keskitaajuuden vaihtelu. Tietojen perusteella pystytään jopa erottamaan yksittäisiä lähetinvastaanottimia toisistaan. Tämä mahdollistaa samaa tiettyä lähetinvastaanotinta käyttävän joukon liikkeiden jatkuvan seuraamisen. [1.]

## Elektroninen häirintä

Elektronisella häirinnällä vihollinen pyrkii vaikeuttamaan tai estämään kykyä hyödyntää sähkömagneettista spektriä. Elektroninen häirintä kohdistuu aina järjestelmien vastaanottimiin ja se on kiinteä osa kokonaisasevaikutusta. Häirinnällä vihollinen pyrkii lamauttamaan sähkömagneettiseen säteilyyn perustuvan viestiyhteyden, eli tässä tapauksessa kenttäradioverkon, ajallisesti ja paikallisesti. Häirintä liittyy aina johonkin operaatioon, kuten hyökkäykseen tai maihinnouluun. Häirintä voidaan jakaa taustahäirintään, saattohäirintään ja lähihäirintään. [1.]

Vihollinen toteuttaa häirinnän käyttämällä häirintälähtimiä erilaisilla laveteilla, kuten pinta- ja ilma-aluksilla. Lähettimen muodostama häirintäsignaali lähetetään haluttuun suuntaan antennilla. Lisäksi vihollinen voi käyttää myös lähihäirintälähtimiä, jotka toimitetaan perille häiritettävän kohteen lähelle esimerkiksi ilmapudotuksina, tykistöammuksina tai erikoisjoukkojen toimesta. Lähihäirintälähtimiä toimitetaan alueelle yleensä useita tarvittavan häirintävaikutuksen aikaansaamiseksi.

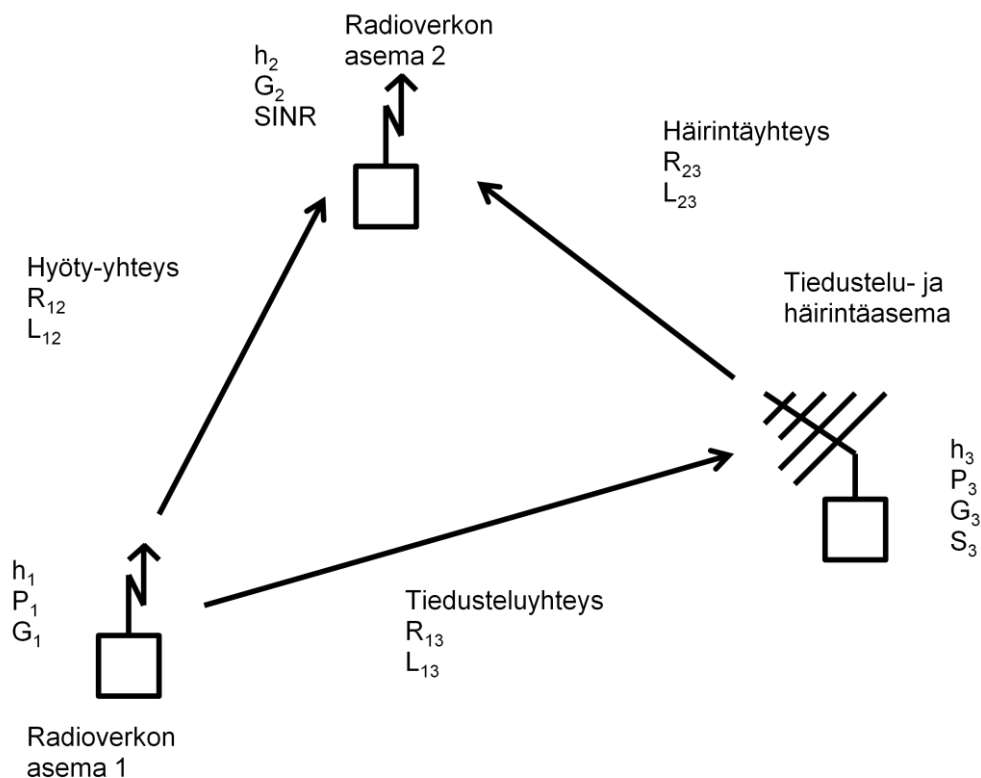
Elektronista häirintää edeltää aina elektroninen tiedustelu. Elektroninen häirintä toteutetaan käytännössä seuraavan ketjun mukaisesti:

- elektronisen ympäristön arviointi
- päätetään häirinnän kohde ja tarvittavan häirintäsignaalin parametrit
- valitaan häirintäkeino ja toteutetaan se.

Häirintä voi olla laajakaistaista tai kapeakaistaista. Laajakaistaisella häirinnällä kyetään vaikuttamaan useisiin siirtokanaviin samanaikaisesti mutta samalla häirintälähettimen teho häirittevästä kanavasta kohden pienenee. Kapeakaistaisen häirinnän käyttö edellyttää taas tarkkaa tietoa häiritettävän signaalin taajuudesta, mikä on haastavaa esimerkiksi jos kyseessä on hajasperktrilähete. Häirintäsignaalina voidaan käyttää kohinaa tai satunnaista dataa, mutta paras teho saavutetaan käyttämällä samanlaista signaalia kuin häirinnän kohteena oleva järjestelmä käyttää. [1.]

## 4 Älyantennien hyödyntämismahdollisuuksia sotilasradioverkoissa

Tässä luvussa arvioidaan työssä käsiteltyjen älyantennityyppien käyttömahdollisuuksia sotilasradioverkoissa. Vertailu tavanomaisten ja älyantennien välillä tehdään kolmen erilaisen kuvitteellisen skenaarion avulla. Skenaariot on muodostettu siten, että syntyy esimerkinomaisia tilanteita, joissa älyantennilla voitaisiin saavuttaa etua tavanomaisen antennin käyttöön nähden. Skenaariossa mallinnusta on yksinkertaistettu siten, että esimerkiksi kaapeleissa tapahtuvat häviöt jätetään huomioimatta. Kuvassa 10 on esitetty elektronisen sodankäynnin vaikutusten mallintamisessa käytetty geometria.



Kuva 10. Elektronisen sodankäynnin geometria skenaarioissa.

### 4.1 Radioverkot maan pinnalla rakennetussa ympäristössä

Ensimmäisessä skenaariossa sotilasjoukko toimii kaupunkiympäristössä. Joukolla on käytössään taajuusalueen 30-88 MHz VHF-kenttäradioverkko, johon kuuluu sekä jalkaisin liikkuvia sotilaita että ajoneuvoja. Radioissa käytetään ympärisäteileviä piiska-antennityyppejä monopoliantenneja. Skenaarioon liittyvät parametrit on esitetty

taulukossa 1. Verkkoa tiedustellaan ja häiritään viiden kilometrin päässä maan pinnalla olevalla järjestelmällä. Sähkömagneettisen säteilyn oletetaan vaimenevan Eglin mallin mukaisesti (kaava 8).

Taulukko 1. Parametrit "maan pinta" skenaarion

<b>Viestijärjestelmä (hyöty-yhteys)</b>	
Antennikorkeus $h_1 = h_2$	2 m
Lähetysteho $P_1$	5 W (37 dBm)
Taajuus $f$	60 MHz
Antennivahvistus $G_1 = G_2$	0 dBi
Yhteysetäisyys $R_{12}$	1000 m
SINR (minimi)	10 dB
Yhteysvälivaimennus $L_{12}$	103 dB
<b>Tiedustelu- ja häirintäjärjestelmä</b>	
Herkkyys $S_3$	- 80 dBm
Antennikorkeus $h_3$	10 m
Antennivahvistus $G_3$	10 dBi
Häirintäteho $P_3$	100 W (50 dBm)
Etäisyys kohteesta $R_{13} = R_{23}$	5000 m
Yhteysvälivaimennus $L_{13}$	124 dB
Yhteysvälivaimennus $L_{23}$	117 dB

Radioaaltojen etenemisen kannalta rakennettu ympäristö muodostaa alueen, jossa tapahtuu heijastuksia sekä muodostuu katvealueita. Usein suoraa näköyhteyttä antennien välillä ei ole vaan vahvinkin signaali saapuu heijastuksen kautta vastaanottimen antenniin. Ympäristö on siis erityisen suotuisa MIMO-antennien käytölle. MIMO-antennit mahdollistaisivat datanopeuden kasvattamisen sekä toisivat luotettavuutta radioyhteyden toimintaan. Tämä korostuu erityisesti tilanteessa jossa ajoneuvot ja sotilaat liikkuvat radioyhteyden ollessa käytössä. Tällöin heijastuksia ja monitie-etenemistä tapahtuu runsaasti ja siten SINR vastaanottimessa muuttuu

jatkuvasti. Yksi keino luotettavuuden parantamiseen olisi myös säilyttää vastaava tiedonsiirtonopeus kuin tavanomaisilla antennilla, mutta käyttää MIMO-kanavilla robustimpaa modulaatiota kuin yksittäisellä SISO-yhteydellä on mahdollista käyttää.

Kytettävän keilan antennien käytön kannalta skenaarion mukainen radioyhteyden kummankin osapuolen jatkuva liike runsaasti monitie-etenemistä sisältävässä ympäristössä aiheuttaa erityishaasteita. Kun sekä oma että vastapäin paikka vaihtuu jatkuvasti, on käytettävän keilan kytkentä perustuttava täysin radioyhteyden signaalin vahvuuden tarkkailuun ja muutoksia tapahtuu nopealla syklillä. Heijastusten takia signaalin tulosuunta on usein eri kuin lähettimen sijainnin tosiasiallinen suunta.

Verkosta tiedustelijalle saapuva signaalitaso on laskettavissa kaavalla 10:

$$P_{tied} = P_1 + G_1 - L_{13} + G_3 \quad (10)$$

Sijoittamalla kaavaan 10 taulukon 1 mukaiset arvot saadaan tiedustelijalle saapuvaksi signaalitasoksi -77 dBm, mikä on suurempi kuin tiedustelujärjestelmän herkkyys -80 dBm, joten lähete on tiedustelujärjestelmällä ilmaistavissa.

Jos viestijärjestelmässä käytetään ympärisäteilevien antennien sijaan adaptiivista antenna, joka muodostaisi automaattisesti säteilykuvion nollakohdan (antennivahvistus  $G_1 = -20$  dBi) tiedustelun uhkasuuntaan, pienenisi tiedustelujärjestelmän vastaanottimeen saapunut säteilyteho -97 dBm:iin ja siten tiedustelujärjestelmän herkkyys ei enää riittäisi radioverkon tiedusteluun. Toisaalta kaupunkiympäristön monitie-eteneminen saattaisi aiheuttaa sen, että signaali etenisi säteilykuvion pääkeilasta heijastusten kautta kuitenkin tiedustelijalle.

Monitie-eteneminen vaikuttaa myös elektroniseen häirintään. Häirintäsignaali ei siis saavu vastaanottimen antenniin välttämättä jostain tietystä suunnasta vaan heijastusten takia häirintä saattaa tulla useista suunnista yhtä aikaa ja suunnat vaihtuvat vastaanottimen liikkeessa.

Radioverkon (asema 2) vastaanottimeen saapuva hyötysignaalin taso saadaan kaavalla 11:

$$P_{hyöty} = P_1 + G_1 + G_2 - L_{12} \quad (11)$$

Sijoittamalla kaavaan 11 taulukon 1 mukaiset arvot saadaan vastaanottimelle saapuvaksi hyötysignaalin tasoksi -66 dBm.

Vastaanottimeen saapuva häirintäsignaalin taso saadaan kaavalla 12:

$$P_{\text{häirintä}} = P_3 + G_3 - L_{23} + G_2 \quad (12)$$

Sijoittamalla kaavaan 12 taulukon 1 mukaiset arvot saadaan vastaanottimelle saapuvaksi häirintäsignaalin tasoksi -57 dBm. Häirintäsignaali peittää siis alleen hyötysignaalin ( $P_{\text{häirintä}} > P_{\text{hyöty}}$ ). Jotta häirintä ei vaikuttaisi viestijärjestelmän toimivuuteen, tulisi hyötysignaalin voimakkuuden vastaanottimessa olla vähintään 10 dB suurempi kuin häirintäsignaalin koska vaadittava SINR on 10 dB eli  $P_{\text{häirintä}} < P_{\text{hyöty}} + \text{SINR}$ . Tässä tapauksessa maksimi häirintäsignaalin taso olisi siis -76 dBm.

Jos adaptiivista antennia vastaanottimessa käyttämällä saadaan suuntakuviota muokattua suuntaavaksi siten, että hyötysignaalin suuntaan saadaan 10 dB antennivahvistus ja häirintäsignaalin suuntaan saadaan -20 dBi nollakohta, muodostuu uusiksi arvoiksi  $P_{\text{hyöty}} = -56$  dBm ja  $P_{\text{häirintä}} = -77$  dBm. Tällöin häirintä ei vaikuttaisi hyöty-yhteyden toimivuuteen.

Skenaarion taajuusalueella 30-88 MHz antennielementit ovat verrattain suurikokoisia. Sotilaan varustukseen on vaikea integroida useita näkyviä antennia. Antennit lisäävät varustuksen painoa ja vaikeuttavat liikkumista. Korkeammalla taajuudella toimivien järjestelmien käyttö mahdollistaisi pienikokoisemmat antennielementit, mutta samalla tosin menetettäisiin VHF-alueen alapään pieni etenemisvaimennus josta on hyötyä erityisesti peitteisissä maasto-olosuhteissa toimittaessa. Korkeammalla taajuusalueella toimivat antennit voisivat olla mikroliuska-tyyppisiä ja ne voitaisiin integroida osaksi sotilaan varustusta, esimerkiksi kypärään.

Suurikokoisten antenniryhmien asentaminen ajoneuvoihin on myös ongelmallista. Antenniryhmä vaatisi suhteellisen paljon tilaa ja tekisi ajoneuvosta visuaalisesti erottuvan. Trendinä oleva antennien pieniprofiilisuus ja useiden järjestelmien integrointi samaa antennia käyttäväksi (antennin laajakaistaisuus) olisi myös haastavaa toteuttaa älyantenneja käyttäessä. Kuten yksittäisten sotilaiden kohdalla, taajuuden kasvattaminen ja siten aallonpituuden ja antennielementtien pieneneminen tekisi mahdolliseksi antennien paremman integroimisen muuhun varustukseen. Ajoneuvojen



osalta antennejä saataisiin siten pienemmiksi ja ne saataisiin paremmin sijoitettua ajoneuvojen rakenteisiin. Esimerkiksi taajuusalueen 225-425 MHz MIMO-antennien sijoituksesta ajoneuvoihin on saatu lupaavia testituloksia. [16.]

#### 4.2 Radioverkot maan pinnalta ilmaan

Toisessa skenaariossa 3000 metrin korkeudessa lentävä sotilasilma-alus (esim. lentokone tai lennokki) on datayhteydessä maan pinnalla olevaan tukiasemaan. Yhteys tapahtuu UHF- datalinkillä, joka toimii taajuusalueella 960 - 1215 MHz. Sekä tukiasemassa että ilma-aluksessa käytetään ympärisäteileviä antennejä. Verkkoa tiedustellaan ja häiritään 40 kilometrin päässä 5000 metrin korkeudessa lentävästä tiedustelu/häirintäkoneesta. Skenaarion parametrit on esitetty taulukossa 2. Sähkömagneettisen säteilyn oletetaan etenevän sekä hyöty-yhteydellä että tiedustelu/häirintäyhteydellä vapaassa tilassa.

Taulukko 2. Parametrit "ilmasta maahan" -skenaarioon.

<b>Viestijärjestelmä (hyöty-yhteys)</b>	
Antennikorkeus lentokone $h_1$	3000 m
Antennikorkeus tukiasema $h_2$	30 m
Lähetysteho $P_1$	25 W (44 dBm)
Taajuus $f$	960 MHz
Antennivahvistus $G_1 = G_2$	0 dBi
Yhteysetäisyys $R_{12}$	5000 m
SINR (minimi)	10 dB
Yhteysvälivaimennus $L_{12}$	106 dB
<b>Tiedustelu- ja häirintäjärjestelmä</b>	
Herkkyys $S_3$	- 80 dBm
Antennikorkeus $h_3$	5000 m
Antennivahvistus $G_3$	0 dBi
Häirintäteho $P_3$	500 W (57 dBm)
Etäisyys kohteesta $R_{23}$	40000 m

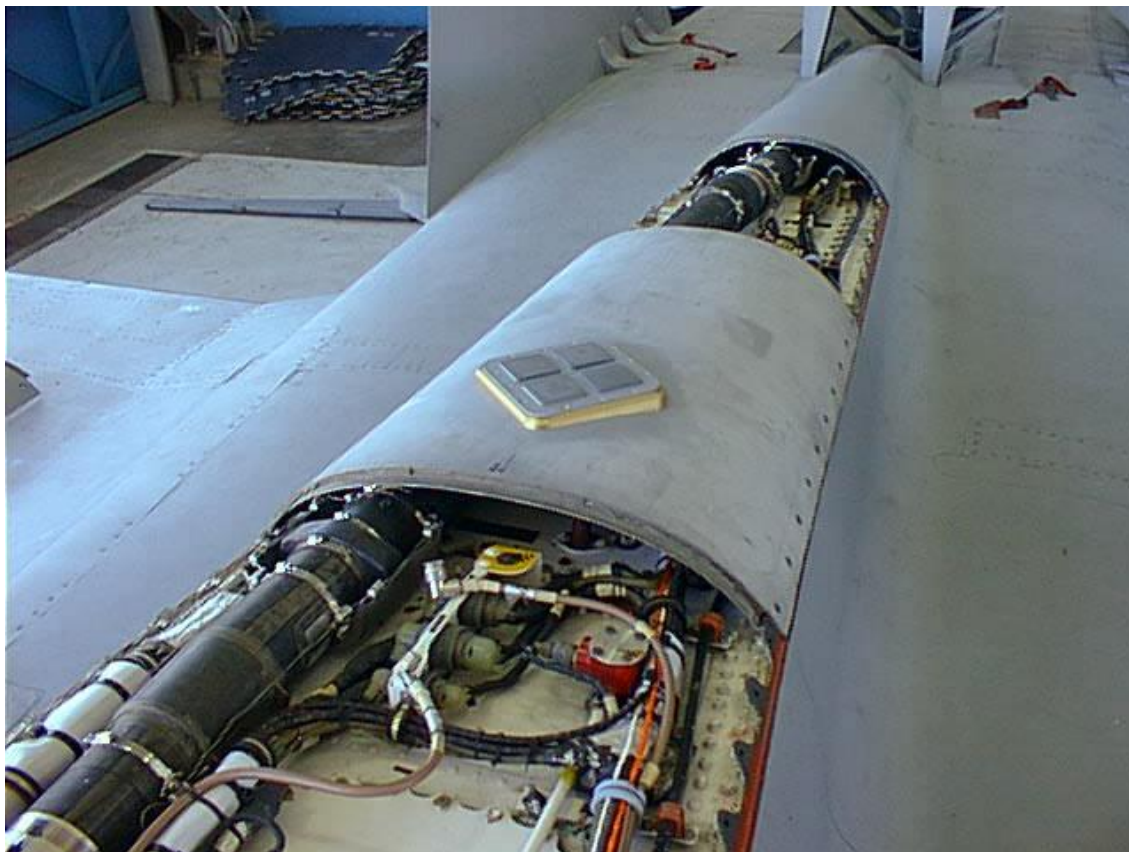
Yhteysvälivaimennus $L_{13} = L_{23}$	124 dB
---------------------------------------	--------

Radioaaltojen edessä vapaassa tilassa ei tässä skenaariossa heijastuksilla ole merkitystä. Tämä vähentää MIMO-antennitekniikasta saatavia hyötyjä, koska monitie-etenemistä ei tapahdu. Yhteyden laatua ja tiedonsiirron nopeutta voitaisiin parantaa antennin vahvistusta kasvattamalla käyttämällä kytkettävän keilan antennia tai adaptiivista antennia. Älyantennia tukiasemassa käytettäessä tulisi huomioida ilma-aluksen sijainti tukiasemaan nähden sekä vertikaali- että horisontaalisuunnassa suunnittelemalla antenni siten, että sillä on mahdollista muodostaa säteilykeiloja myös ylöspäin.

Verkosta tiedustelukoneelle saapuva signaalitaso on kaavan 10 mukaisesti laskettaessa -80 dBm eli verkko juuri havaitaan tiedustelukoneesta. Jos hyöty-yhteydellä käytettäisiin tukiasemassa tai ilma-aluksessa esimerkiksi kytkettävän keilan antennia tai adaptiivista antennia, saataisiin pienelläkin säteilykuvion muokkauksella (säteilyn vähentäminen tiedustelun uhkasuuntaan) verkon tiedustelu estettyä.

Vastaanottimelle saapuva hyötysignaalin teho on kaavan 11 mukaan laskettaessa -62 dBm. Vastaavasti häirintäsignaalin teho on kaavan 12 mukaan -67 dBm. Vastaanottimen 10 dB SINR huomioiden hyötysignaalin taso ei ole riittävä hyöty-yhteyden toimimiseksi. Kytkettävän keilan antennia tai adaptiivista antennia käyttämällä riittäisi joko 5 dB:n vahvistus hyöty-yhteydelle tai vastaava vaimennus häirintäyhteydelle, jotta häirintä ei vaikuttaisi radioyhteyden toimintaan.

Suurikokoisten antenniryhmien asentaminen lennokkeihin tai pieniin lentokoneisiin (esim. hävittäjälentokoneet) on vaikeaa antenniryhmän tilantarpeen takia. Antenniryhmä lisää lennokin tai lentokoneen painoa ja vaikuttaisi sen aerodynamiikkaan. Pienikokoisen ja matalaprofiilisen antenniryhmän, kuten adaptiivisen GPS-antennin, asentaminen hävittäjälentokoneeseen tai helikopteriin on sen sijaan mahdollista (kuva 11).



Kuva 11. 4-elementtinen adaptiivinen GPS -antenni asennettuna F/A-18 hävittäjään. [17.]

Maanpäällisissä kiinteissä tukiasemissa sen sijaan antenniryhmien käyttö olisi hyvinkin mahdollista. Erityisesti kiinteisiin mastorakenteisiin perustuvat pinta- tai ilma-aluksille langattoman liityntärajan tarjoavat tukiasemat olisivat mahdollisia paikkoja adaptiivisten antennien käytölle.

#### 4.3 Radioverkot avomerellä

Kolmannessa skenaariossa kaksi 15 kilometrin etäisyydellä toisistaan olevaa sotalusta on yhteydessä toisiinsa VHF/UHF-datalinkillä avomerellä. Alukset käyttävät 25 metrin korkeuteen aluksen mastoon sijoitettuja ympärisäteileviä dipoliantenneja. Järjestelmä toimii taajuusalueella 225-400 MHz. Verkkoa tiedustellaan ja häiritään 30 kilometrin päässä olevasta tiedustelu/häirintäaluksesta. Sähkömagneettisen säteilyn hyöty-yhteydellä oletetaan vaimenevan Plane Earth -mallin (kaava 9) mukaisesti. Skenaarion parametrit on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Merellä -skenaarion parametrit

<b>Viestijärjestelmä (hyöty-yhteys)</b>	
Antennikorkeus $h_1 = h_2$	25 m
Lähetysteho $P_1$	50 W (47 dBm)
Taajuus $f$	250 MHz
Antennivahvistus $G_1 = G_2$	2,1 dBi
Yhteysetäisyys $R_{12}$	15000 m
SINR (minimi)	10 dB
Yhteysvälivaimennus $L_{12}$	111 dB
<b>Tiedustelu- ja häirintäjärjestelmä</b>	
Herkkyys $S_3$	- 80 dBm
Antennikorkeus $h_3$	30 m
Antennivahvistus $G_3$	10 dBi
Häirintäteho $P_3$	500 W (57 dBm)
Etäisyys kohteesta $R_{23}$	30000 m
Yhteysvälivaimennus $L_{13} = L_{23}$	122 dB

Meriolosuhteissa sähkömagneettinen säteily etenee radiohorisontin puitteissa sekä näköyhteysreitillä (LOS) antennista antenniin että meren pinnasta heijastuen. Heijastuminen meren pinnasta tuo periaatteellisen mahdollisuuden MIMO-antennien hyödyntämiseen. Monitie-eteneminen ei kuitenkaan ole niin rikasta kuin esim. kaupunkiolosuhteissa, joten ainakin avomerellä MIMO-tekniikan hyöty tiedonsiirtonopeuden ja luotettavuuden kasvattajana jäänee vähäiseksi. Myös pitkä etäisyys alusten välillä ei tue MIMO-tekniikan toimivuutta.

Verkosta tiedustelualukselle saapuva signaalitaso on taulukon 3 parametreilla kaavan 10 mukaisesti laskettaessa -63 dBm eli verkko havaitaan tiedustelualuksesta. Jos alukset käyttäisivät hyöty-yhteydellä kytkettävän keilan antenna tai adaptiivista antenna, saataisiin muodostamalla säteilykuvion nollakohta (-20 dBi) tiedustelun

uhkasuuntaan saataisiin signaalitaso tiedustelijalla vähentymään arvoon -83 dBm ja siten verkon tiedustelu estettyä.

Vastaanottimelle saapuva hyötysignaalin teho on kaavan 11 mukaan laskettaessa -60 dBm. Vastaavasti häirintäsignaalin teho on kaavan 12 mukaan -53 dBm, joten häirintä estää hyöty-yhteyden toimimisen. Vastaanottimen 10 dB SINR huomioiden häirintäsignaalin taso saa olla korkeintaan -70 dBm yhteyden toimimiseksi. Häirintäsignaalin tason lasku vastaanottimessa olisi mahdollista toteuttaa adaptiivista antennia käyttämällä muodostamalla säteilykuvion nollakohta (-20 dBi) häirintäsignaalin tulosuuntaan, jolloin häirintäsignaalin voimakkuus olisi -73 dBm eikä siten estäisi hyöty-yhteyttä toimimasta.

Laivaluokan aluksiin antenniryhmien asentaminen on tilakysymysten osalta mahdollista. Alusten mastorakenteita voidaan hyödyntää antenniryhmän sijoittamisessa. Adaptiiviseen antenniin kuuluvat signaalinkäsittelyjärjestelmät olisivat asennettavissa aluksen laitetiloihin. Antenniryhmän suurempi tuulikuorma tavanomaisiin yksittäisiin antenneihin nähden on huomioitava maston rakenteessa. Myös aluksen liikehdintä ja kallistelu merenkäynnissä tulee huomioida sekä antennin asennuksessa että keilanmuodostuksessa.

## 5 Yhteenveto

Tämän työn tarkoituksena oli arvioida erilaisten älyantennien soveltuvuutta VHF- ja UHF-alueen taktisiin sotilasradioverkkoihin. Älyantenneina työssä käsiteltiin kytkettävän keilan antenneja, adaptiivisia antenneja ja MIMO -antenneja.

Kytkevän keilan antennia ei välttämättä voida pitää varsinaisena älyantennina. Suurimmat hyödyt ovat vahvistuksen kasvu haluttuun suuntaan ja siten verkon kapasiteetin lisäys ympärisäteileviin antenneihin nähden sekä hyödyt elektronisen sodankäynnin vaikutusten kannalta (säteily vain haluttuun suuntaan). Antenniryhmän koko rajoittaa sen sijoittamismahdollisuuksia. Sotilaskäytössä kytkettävän keilan antenni olisi parhaiten hyödynnettävissä pinta-aluksissa tai kiinteissä tukiasemarakenteissa.

Adaptiivisen antennin hyödyt ovat suurimmillaan verkon kapasiteetin lisäyksessä sekä elektronisen tiedustelun ja elektronisen häirinnän väistössä. Antennin vahvistuksen lisääminen mahdollistaa pienemmät lähetystehot ja siten vähemmän keskinäishäiriöitä ja enemmän tilaajia samalle taajuudelle. Elektronisen sodankäynnin kannalta keskeinen ominaisuus on kyky säteilykuvion nollakohdan muodostamiseen tiedustelun tai häirinnän suuntaan. Adaptiivinen antenniryhmä olisi parhaiten asennettavissa alusympäristöön, kiinteisiin tukiasemiin ja rajoitetusti ajoneuvoihin. Suurin haaste on antenniryhmän tarvitsema tila ja erottuvuus, joka on ristiriidassa nykyisen trendin (antennien matalaprofiilisuus ja eri järjestelmien integrointi yhteen antenniin) kanssa. Antenniryhmän säteilykuvion riippuvuus antenniryhmän tarkasta geometriasta edellyttää sitä että antennielementit ja niiden kiinnikkeet sekä mastot kestävät alustalavetin liikkumisesta aiheutuvaa rasitusta kuten tärinää ja iskuja.

MIMO-antennitekniikka luo mahdollisuuden yhteyden kapasiteetin ja luotettavuuden kasvattamiseen runsaasti radioaaltojen monitie-etenemistä sisältävässä ympäristössä. Samalla säästetään myös taajuusresurssia. Sotilasradioverkkojen kannalta MIMO -tekniikka on parhaiten hyödynnettävissä kaupunkiympäristössä toimivilla joukoilla. Haasteena on antennielementtien koko erityisesti kenttäradioiden käyttämällä ala-VHF -taajuusalueella, mikä rajaa antennien asennettavuutta. Parhaiten MIMO-antenni soveltuisi kaupunkisodankäynnissä käytettäviin ajoneuvoihin. Sotilaiden käyttämiin kannettaviin kenttäradiolaitteisiin useiden näkyvien antennien integrointi on haastavaa ja toteutus edellyttäisi käytännössä siirtymistä UHF-taajuuksien käyttöön.

Tulevaisuudessa radiolähetinvastaanottimet toteutetaan ohjelmistoradioperiaatteella, jolloin esimerkiksi eri aaltomuodot toteutetaan ohjelmallisesti. Radioverkot muodostuvat automaattisesti (ns. MANET-verkot), ja yksittäiset verkon asemat releoivat automaattisesti verkon liikennettä. Tämä mahdollistaa yhteysvälien pienenemisen ja siten pienempien lähetystehojen käytön. Samalla myös verkkojen tiedusteltavuus ja häirittevyys vaikeutuu. Pienemmät yhteysetäisyydet mahdollistavat korkeampien taajuuksien käytön, mikä nostaa tiedonsiirtokapasiteettia ja samalla aallonpituuden pieneneminen mahdollistaa pienemmät antennielementit. Tämä luo mahdollisuuksia älyantennitekniikoiden laajemmalle soveltamiselle sotilasradioverkoissa.

## Lähteet

- 1 Kosola, J., Solante, T. 2013. Digitaalinen taistelukenttä. Verkkodokumentti. Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotatekniikan laitos. <<https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/94298/DigTstK%203.%20painos%20Overkkoversio.pdf?sequence=2>>. Luettu 23.2.2015.
- 2 Kyohei , Fujimoto. 2008. Mobile Antenna Systems Handbook. Third Edition. Norwood, MA: Artech House.
- 3 Voipio, Veli. Adaptive antennas. Verkkodokumentti. <[http://legacy.spa.aalto.fi/sig-legacy/RAVE/A/Voipio\\_Veli\\_publication\\_2.pdf](http://legacy.spa.aalto.fi/sig-legacy/RAVE/A/Voipio_Veli_publication_2.pdf)>. Luettu 23.2.2015.
- 4 Räisänen, A., Lehto, A. 2003. Radiotekniikan perusteet. Helsinki: Oy Yliopistokustannus / Otatieto.
- 5 Saunders, Simon R. 1999. Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems. New York: John Wiley & Sons.
- 6 Losee, Ferril A. 2005. RF Systems, Components and Circuits Handbook. Norwood, MA: Artech House.
- 7 El Zooghy, Ahmed. 2005. Smart Antenna Engineering. Norwood, MA: Artech House.
- 8 Hall, David. 2007. Smart Antennas Introduction. Verkkodokumentti. <<http://robotification.com/2007/06/15/smart-antennas/>>. Luettu 6.3.2015.
- 9 Kitindi, Edvin J. 2015. Capabilities of smart antenna in tracking the desired signal in wireless communication system through non-blind adaptive algorithms. Verkkodokumentti. <<http://www.ijarcce.com/upload/2015/february-15/IJARCCE1B.pdf>>. Luettu 6.3.2015.
- 10 Wikipedia: MIMO -kanavamalli. Verkkodokumentti. <[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kanalmatrix\\_MIMO.png](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kanalmatrix_MIMO.png)>. Luettu 6.3.2015.
- 11 SC3800 data sheet. Verkkodokumentti. Silvus Technologies. <<http://silvustechnologies.com/products/streamcaster-3800>>. Luettu 7.3.2015.
- 12 Graham Adrian W., Kirkman Nicholas C., Paul Peter M. 2007. Mobile Radio Network Desing in the VHF and UHF Bands. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd.
- 13 Low Profile Broadband VHF/UHF Antenna VHF30512LP-1 datasheet. Verkkodokumentti. Comrod.



- <http://www.comrod.com/getfile.php/Datasheets/T%20Antennas%20-%20Military/VHF30512LP-1.pdf>. Luettu 7.3.2015.
- 14 Test Method Standard MIL-STD-810G. Verkkodokumentti. Department of Defence. [http://everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD-0800-0899/MIL-STD-810G\\_12306/](http://everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD-0800-0899/MIL-STD-810G_12306/). Luettu 20.3.2015.
- 15 Joint Publication 3-13.1 Electronic Warfare. Verkkodokumentti. <https://www.fas.org/irp/doddir/dod/jp3-13-1.pdf>. Luettu 2.3.2015.
- 16 Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) Channel Measurements for Urban Military Applications. Verkkodokumentti. <http://www.jhuapl.edu/techdigest/TD/td3002/Hampton.pdf>. Luettu 3.4.2015.
- 17 Four-Element Adaptive Array Evaluation for United States Navy Airborne Applications. Verkkodokumentti. <http://gps-ttff.tripod.com/FourElement.pdf>. Luettu 23.3.2015.

