
HF-TAAJUUSALUEEN ANTENNITEKNIikka



Ammattikorkeakoulun opinnäytetyö

Tietotekniikka

Riihimäki, syksy 2018

Mikko Lanne



RIIHIMÄKI
Tietotekniikka

Tekijä	Mikko Lanne	Vuosi 2018
Työn nimi	HF-taajuusalueen antennitekniikka	

TIIVISTELMÄ

Merivoimissa on osana HF-tietoliikenteen kehittämistä tarkasteltu radiojärjestelmien lisäksi myös vaihtoehtoja erilaisten antenniratkaisujen toteuttamiseksi. Antennien ominaisuuksia ja käytettävyyttä tutkimalla pyritään parantamaan HF-tietoliikennejärjestelmien suorituskykyä, jossa antennilla on ratkaiseva merkitys.

Opinnäytetyön tavoitteena oli saavuttaa lisää perusteita HF-taajuusalueen antennien käyttöön ja valintaan sekä toteuttaa työn toimeksiantajan edellyttämä suorituskykytesti kahden antennin osalta. Lähdeaineistona työssä on käytetty julkista materiaalia.

Opinnäytetyössä tutkittiin kolmen eri antennin teoreettista suorituskykyä ja ominaisuuksia. Työssä käsiteltiin myös radio- ja antennitekniikan perusteita, HF-taajuusaluetta sekä NVIS-liikennöintitapaa. Teoreettisen vertailun kohteena antennityypeistä olivat dipoli-, monopoli- ja magneettinen kehäantenni. Vertailu suoritettiin huomioiden toimintaympäristö Suomessa ja pohjoisella Itämerellä.

Uutena tietona työ tuotti dokumentoidut mittaustulokset piiska-antennin (monopoliantenni) ja NVIS-antennin (magneettinen kehäantenni) suorituskyvystä usealla eri yhteysetäisyydellä sekä perusteita HF-taajuusalueen tehokkaalle ja tarkoituksenmukaiselle käytölle antennien tarjoamia mahdollisuuksia hyödyntäen. Tulosten perusteella on mahdollista ryhtyä toimenpiteisiin HF-tietoliikenteen kokonaisuuden parantamiseksi antennitekniikan osalta.

Avainsanat HF-tietoliikenne, radio- ja antennitekniikan perusteet, NVIS

Sivut 43 s. + liitteet 2 s.

Riihimäki
Information Technology

Author	Mikko Lanne	Year 2018
Subject of Bachelor's thesis	HF band antenna technique	

ABSTRACT

The Finnish Navy has evaluated the implementation of various antennas as a part of the development of HF communication systems. The goal is to improve the performance of the systems by studying the characteristics and usability of the antennas. In this context, the antenna has a decisive role.

The purpose of this thesis was to discover more fundamentals to use HF band antennas and implementations. As well, the goal was to carry out a mandatory performance test for two different types of antennas. The study is based on public sources.

In this thesis, the theoretical performance and properties of the three different HF antennas were studied. In addition, the basics of radio and antenna techniques, HF band characteristics as well as NVIS communication were discussed. A theoretical comparison between dipole, monopole and magnetic loop antenna was made. In the comparison, the operating environment in Finland and the Northern Baltic Sea was taken into consideration.

New information and documented measurement results of vertical and NVIS antenna performance at multiple connection distances were obtained. In addition, more fundamentals for efficient and appropriate use of HF band by utilizing the potential of the antennas were found. Based on the results, it is possible to initiate measures for the improvement of the HF communication systems in the field of antenna technology.

Keywords HF communication, fundamentals of radio and antenna technique, NVIS

Pages 43 p. + appendices 2 p.

SISÄLLYS

LYHENTEET

1	JOHDANTO.....	1
1.1	Opinnäytetyön tavoitteet ja rajausta.....	2
1.2	Työn rakenne.....	2
2	RADIOTEKNIIKAN PERUSTEITA.....	3
2.1	Sähkömagneettinen säteily.....	3
2.2	Radioaallot ja niiden eteneminen.....	6
2.3	Eteneminen HF-taajuusalueella.....	7
3	ANTENNITEKNIikka.....	9
3.1	Antennitekniikan perusteita.....	10
3.2	Antennien ominaisuuksia.....	11
3.3	Dipoli- ja monopoli-antennit.....	13
3.4	Kehäantenni.....	17
4	HF-TAAJUUSALUE.....	19
4.1	Aurinko.....	21
4.2	Ionosfääri.....	22
4.3	NVIS Near vertical incidence skywave.....	25
5	ANTENNIEN SUORITUSKYKY POHJOISELLA ITÄMERELLÄ.....	27
5.1	Toimintaympäristö.....	29
5.2	Käyttötapausten määrittämä antennitoteutus.....	32
5.3	Kehittyneet radiojärjestelmät.....	33
6	KÄYTÄNNÖN TESTIT.....	34
6.1	Testijärjestelyt ja mittausmenetelmä.....	34
6.2	Odotusarvot, tulokset ja havainnot.....	35
6.3	Yhteenveto testistä.....	39
7	POHDINTA.....	40
	LÄHTEET.....	42

Liite 1	SÄHKÖMAGNEETTINEN SPEKTRI
Liite 2	KENTTÄTESTAUKSEN LAITTEISTOJÄRJESTELYT

LYHENTEET

CW	Continuous wave, modulointimenetelmä.
dB	Desibeli.
dB μ V	Desibeliä suhteessa mikrovolttiin.
GHz	Gigahertsi.
HF	High Frequency. Radiotaajuuksien alue sähkömagneettisessa spektrissä taajuusvälillä 3–30 MHz.
LUF	Lowest usable frequency. Matalin käytettävissä oleva taajuus.
NVIS	Near vertical incident skywave. Lähes pystysuoraan säteilevä HF-taajuusalueen lähete.
MHz	Megahertsi.
MUF	Maximum usable frequency. Korkein käytettävissä oleva taajuus.
SHF	Super High Frequency. Radiotaajuuksien alue sähkömagneettisessa spektrissä taajuusvälillä 3–30 GHz.
SMG	Sähkömagneettinen.
SNR	Signal to noise ratio. Signaali-kohinasuhde, jolla kuvataan hyötysignaalin ja kohinasignaalin tehotasojen suhdetta.
SWR	Standing wave ratio. Seisovan aallon suhde.
UHF	Ultra High Frequency. Radiotaajuuksien alue sähkömagneettisessa spektrissä taajuusvälillä 300 MHz – 3 GHz.
VHF	Very High Frequency. Radiotaajuuksien alue sähkömagneettisessa spektrissä taajuusvälillä 30–300 MHz.

1 JOHDANTO

Luotettavasti käytettävissä olevat tietoliikennealustat luovat perustan järjestelmien, laitteiden sekä henkilöiden väliselle tiedonvaihdolle. Sotilaallisessa yhteydessä tämä tarkoittaa esimerkiksi johtamista, tilannekuvan muodostamista ja tulenkäyttöä. Yhteyden muodostamiseksi samanaikaisesti moneen paikkaan tai etenkin liikkuvaan kohteeseen ja liikkuvien kohteiden välillä, on ainoana vaihtoehtona radioteitse tapahtuva yhteys. Radioyhteyksiä käytettäessä antennilla on erittäin keskeinen merkitys järjestelmän toiminnassa. Voidaankin todeta, että antenni on lähetys- ja vastaanottojärjestelmän tärkein osa (Lindell & Nikoskinen, 1995, s. 7).

Vaadittavat yhteysetäisyydet joukkojen liike huomioiden olisi mahdollista toteuttaa myös satelliittiyhteyksin. Satelliitin käyttö soveltuu kuitenkin huonosti kaikille yhteyksiä tarvitseville tasoille ja omien satelliittien puute aiheuttaa merkittävän luotettavuusongelman näiden yhteyksien käytölle. (Tiivistelmäraportti, 2011.)

HF-taajuusaluetta käytetään tavoiteltaessa pitkän kantaman yhteyksiä muun muassa maa-, meri- ja lentoliikenteen tarpeisiin, radioastronomiaan, yleisradiolähetyksiin sekä radioamatööritoimintaan. Pitkän kantaman vuoksi tällä taajuusalueella on runsaasti myös sotilas- ja diplomaattiviestiliikennettä. Taajuusalue on paljon käytetty ja jopa ruuhkainen osittain siitä syystä, että kaukanakin toisistaan sijaitsevat lähetykset voivat aiheuttaa häiriöitä toisilleen. Edellä mainittu ja muut mahdolliset häiriöt johtuvat HF-taajuusalueelle ominaisesta ionosfäärin kautta tapahtuvasta signaalin etenemistavasta. (Kosola & Solante, 2013, s. 62.)

HF-yhteyksiä voidaan hyödyntää myös lyhyille (muutamien kilometrien) etäisyyksille. Lyhyillä yhteyksillä signaali etenee lähettimestä vastaanottimeen pinta-aaltona, joka vaimenee nopeasti HF-taajuuksilla. Ionosfääristä tapahtuva heijastuminen (avaruusaalto) mahdollistaa pitkät yhteysetäisyydet ja sen voidaan katsoa olevan HF-taajuusalueen ensisijainen etenemismuoto. Pinta-aallon äärikantaman ja avaruusaallon minimietäisyyden väliin saattaa muodostua alue, johon ei saada radioyhteyttä. (Kosola & Solante, 2013, s. 62.) Yhteydettömän katvealueen hallintaan voidaan käyttää NVIS-etenemistapaa, jossa lähes kohtisuoraan ylöspäin suunnatuilla signaaleilla on mahdollista saavuttaa muutaman sadan kilometrin katveeton kantama (Tiivistelmäraportti, 2015).

Useimmat antennit säteilevät niihin syötetyn tehon kyvykkäästi, mutta yksikään antenni ei toimi optimaalisesti kaikissa tapauksissa ja olosuhteissa (ARRL, 2011, s. 4-1). Antennin ominaisuudet korostuvat edelleen mikäli tavoitteena on esimerkiksi havaita tarkkaan tietystä suunnasta vastaanotettava heikko signaali kohtalaisten tai voimakkaiden häiriösäteilijöiden/signaalien joukosta. Radiojärjestelmän muilla osilla voidaan parantaa vastaanottoa muun muassa signaalikäsittelyn avulla, mutta huonoa antennia on vaikea tai mahdotonta korvata näillä toimin. (Lindell & Nikoskinen, 1995, s. 7.)

1.1 Opinnäytetyön tavoitteet ja rajaus

Merivoimissa on osana laajempaa HF-tietoliikenteen kehittämisprojektia tutkittu myös HF-taajuusalueen antennitekniikkaa. Tavoitteena on antennikaluston mahdollisimman tehokkaan käytön myötä saavutettava suorituskykyparannus koko tietoliikennejärjestelmän osalta.

Opinnäytetyön tarkoituksena on perehtyä HF-taajuusalueen ja antennitekniikan perusteisiin sekä vertailla käytössä olevan antennikaluston ja mahdollisesti käyttöön tulevan antennityypin ominaisuuksia. Tutkimuksessa otetaan huomioon pohjoisen Itämeren olosuhteet ja vertailu suoritetaan siten se valittuihin tyypillisiin käyttötapauksiin. Käytännön tutkimuksena on suoritettu kenttätestein piiska-antennin (monopoliantenni) ja NVIS-antennin (magneettinen kehäantenni) vertaileva suorituskykymittaus. Opinnäytetyöllä tuotetaan dokumentoitua perustietoa Merivoimien HF-tietoliikenteen käyttämiselle ja kehittämiselle antennitekniikan osalta.

Rinnakkaisena tutkimuksena on hyvä huomioida vuonna 2016 laadittu YAMK opinnäytetyö, jossa käsiteltiin antennien käyttöä Hamina-luokan ohjusveneen näkökulmasta. Työssä tutkittiin radioaaltoihin ja antennien käyttäytymiseen liittyvää problematiikkaa HF-alueen lisäksi myös muilla taajuusalueilla.

Tässä opinnäytetyössä ei käsitellä sähkömagneettisia ilmiöitä ja näiden fyysikkäa työn kannalta välttämättömiä perusteita laajemmin. Samoin ei käsitellä laitteiden, kuten radioiden, virittimien ja vahvistimien käyttöä tai ominaisuuksia. Antennien rakentamista, sovitusta ja syöttölinjoja käsitellään vain työn kannalta tarkoituksenmukaisella laajuudella.

Opinnäytetyö on tyypiltään perustutkimus sekä osiltaan kehittämistyö, jolla pyritään tulosten avulla parantamaan olemassa olevien järjestelmien suorituskykyä. Tutkimusmenetelmänä on käytetty vertailevaa tutkimusta teoreettisen suorituskyvyn osiossa ja käytännön testausta työn kenttätestauksen osalta.

Lähdemateriaalina on käytetty radiotekniikan peruskirjallisuutta, radioamatööritoiminnan tuottamaa laajaa tietopohjaa sekä olemassa olevaa antennitekniikan testaus- ja tutkimustietoa. Aineisto on koostunut suurimmilta osin painetusta kirjallisuudesta ja lisäksi tutkimateriaalina on käytetty Internet-lähteitä. Internetin julkaisuja on joissakin tapauksissa käytetty myös viitteinä, mikäli se on ollut tarkoituksenmukaista. Opinnäytetyö perustuu julkisiin lähteisiin.

1.2 Työn rakenne

Opinnäytetyön toisessa luvussa käsitellään sähkömagneettista signaalia ja radioaaltoon liittyviä perusteita. Kolmannen luvun aiheena ovat antennitekniikan perusteet ja antennien ominaisuudet. Luvussa keskitytään opinnäytetyön vertailun kohteena olevien antennityyppien ominaisuuksiin.

HF-taajuusalueen perusteita, ilmiöitä ja signaalin etenemistä käsitellään neljännessä luvussa. Taajuusalueen käyttöön liittyvien auringon, ilmakehän ja ionosfäärin vaikutusten lisäksi luvussa perehdytään erikseen NVIS-etenemistapaan ja sen ominaisuuksiin.

Viidennessä luvussa vertaillaan kolmen erityyppisen antennin ominaisuuksia pohjoisen Itämeren alueen toimintaympäristössä. Toimintaympäristöjen eroavaisuudet ja niiden vaikutukset käytettävään taajuusalueeseen käsitellään myös viidennessä luvussa.

Kahden antennityypin suorituskykytestien tulokset esitetään työn kuudennessä luvussa. Testituloksien esityksessä ja niiden käsittelyssä keskitytään keskeisimpiin havaintoihin sekä saavutettujen tuloksien vaikutuksiin käytännössä.

Seitsemännessä luvussa suoritetaan pohdinta opinnäytetyössä saavutetuista havainnoista.

2 RADIOTEKNIIKAN PERUSTEITA

Sähkömagneettinen spektri on kaikkien käytössä oleva informaation siirtämiseen hyödynnettävä media, jossa käyttäjät saattavat myös häiritä toisiaan tahattomasti tai tahallisesti. Erityisesti radiotaajuuksien alueella häiriytyminen on mahdollista, koska signaalit etenevät joka suuntaan ja lähettäjältä vastaanottajalle tarkoitettu signaali saavuttaa myös useita muita vastaanottimia. (Kosola & Solante, 2013, s. 91.) Sähkömagneettinen spektri on kuvattu liitteessä yksi.

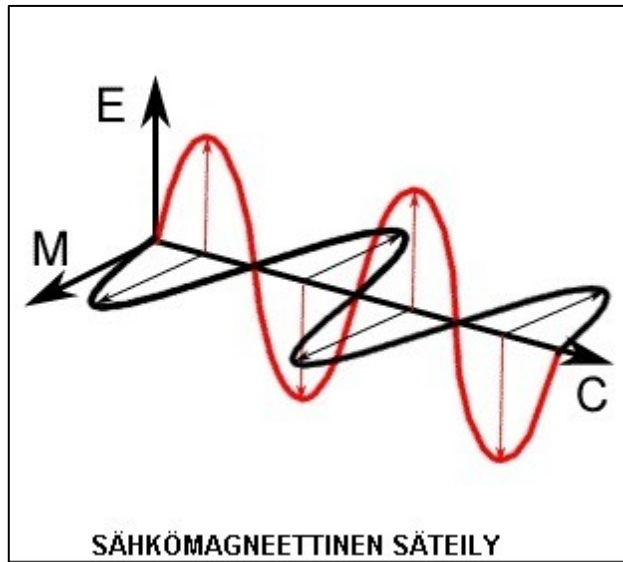
Radiotaajuusalue sijoittuu SMG-spektrissä alaosaan taajuutensa perusteella. Radiotaajuusalueen alapäässä signaalit ja siten myös häiriöt voivat edetä jopa useita kertoja maapallon ympäri. HF-taajuusalueella lähetteitä on mahdollista vastaanottaa maapallon toiselta puolelta ja VHF-alueellakin ne etenevät pitkiä matkoja. UHF ja SHF -alueilla signaalit eivät enää etene huomattavia matkoja, mutta nämä taajuusalueet ovat erittäin paljon käytettyjä yhteiskunnan teknistymisen vaikutuksesta. Taajuuksilla toimii useita yhteiskunnalle tärkeitä järjestelmiä, kuten mobiilitietoliikenne-, paikantamis- ja navigointijärjestelmät sekä radiolinkit. (Kosola & Solante, 2013, s. 91.)

Antennilla lähetetään sekä vastaanotetaan radioaaltoja ja sen tarkoitus on muuntaa siirtojohdossa kulkeva sähkömagneettinen energia antennia ympäröivään avaruuteen. Vastaanotossa antennin tarkoitus on siepata tuleva energia halutulla tavalla ja siirtää se johtoon. (Lindell & Nikoskinen, 1995, s. 7.)

2.1 Sähkömagneettinen säteily

Sähkömagneettinen aalto (kuten radio-, mikro- ja röntgenaalto) muodostuu, kun muuttuva magneettikenttä ja muuttuva sähkökenttä indusoivat toisiaan. ”Maxwellin lakien mukaan kaikki varaukselliset hiukkaset syn-

nyttävät sähkökentän ja tasaisessa liikkeessä oleva varauksellinen hiukkanen synnyttää pyörteellisen magneettikentän. Jos varauksellinen hiukkanen onkin muuttuvassa liikkeessä, se synnyttää sekä muuttuvan magneettikentän että muuttuvan sähkökentän.” (Peltonen, Perkiö & Vierinen, 2012, s. 331.)



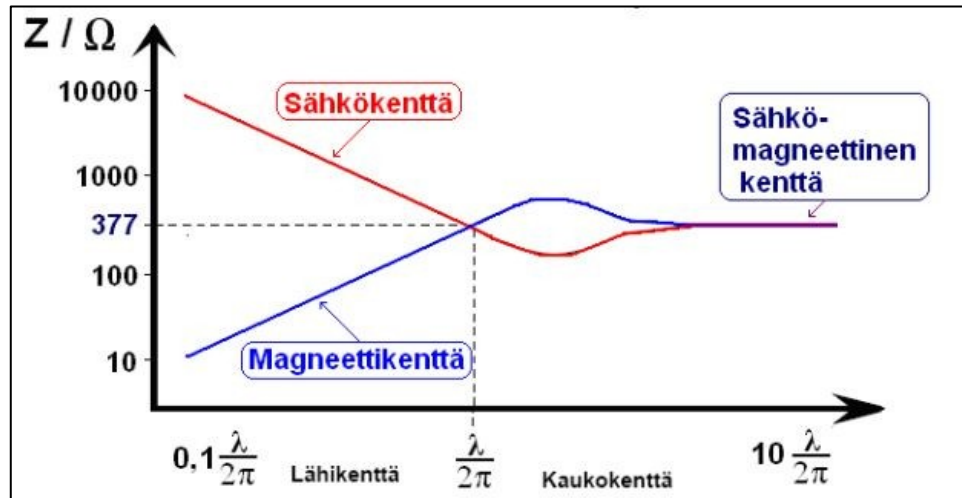
Kuva 1. Sähkömagneettisen aallon sähkökenttä (E) ja magneettikenttä (M) (Fundamentals of Remote Sensing, n.d.).

Sähkömagneettinen säteily, kuten radioaallot ovat poikittaista aaltoliikettä. Aallot etenevät teoriassa suoraviivaisesti valon nopeudella, eli noin 300 000 km/s. Sähköisen varauksen ollessa kiihtyvässä tilassa syntyy sähkömagneettista säteilyä. Syntymekanismejä ovat muun muassa: sähkökentän jarruttaman varauksen synnyttämä jarrutussäteily, magneettikentän kiertämän varauksen aiheuttama synkrotronisäteily, aineen lämpöliikkeen takia syntyvä terminen säteily ja atomin tai molekyylin viritystilan (energiatilan) muuttama spektriviivasäteily. Oskillaattorin muodostama radiotaajuinen säteily, joka lähetetään antennilla, perustuu suurtaajuiseen vaihtovirtaan. (Räisänen & Lehto, 2011, s. 9.)

Sähkömagneettiset aallot etenevät myös tyhjiössä, eivätkä ne tarvitse väliainetta tai siirtotietä ylläpitääkseen sähkö- ja magneettikenttiä. Lähettimestä tuotettavan radioaallon kentänvoimakkuus pienenee tyhjiössä $1/r$ ja tehotiheys $1/r^2$, kun etäisyyden (r) kasvaessa energia levittyy laajemmalle pallopinnalle. Etäisyyden kasvaessa kymmenkertaiseksi tehotiheys pienenee sadasosaan, joka on 20 desibeliä. Energian levittymisestä johtuva radioaallon voimakkuuden heikkeneminen tunnetaan vapaan tilan vaimennuksena. (Lehto, 2006, s. 79.)

Radioaalto vaimenee ilmakehässä vapaan tilan vaimennuksen lisäksi monesta muustakin syystä, kuten kaasujen, sateen ja sumun vaikutuksesta. Ilmakehän alimmassa kerroksessa troposfäärissä, joka ulottuu noin kymmenen kilometrin korkeudelle, lisävaimennus on huomattavaa erityisesti suuremmilla radiotaajuuksilla. Edellä mainitun lisäksi hapen ja vesihöyryn molekyylit aiheuttavat vaimennusta taajuudesta riippuen kirkkaallakin il-

malla. Radioyhteyksien laatu saattaa heikentyä myös ilmakehän synnyttämän lämpökohinan vaikutuksesta. (Lehto, 2006, ss. 79–80.)



Kuva 2. Aaltoimpedanssi (Honkanen, n.d.).

Antennin kannalta sähkömagneettisessa säteilyssä esiintyy kaksi kenttää, jotka ovat lähikenttä ja kaukokenttä. Lähikentän tyypin määrittävät säteilylähteen ominaisuudet, eli se on joko sähkö- tai magneettikenttä. Tietyn etäisyyden jälkeen kentän komponentit ovat tasoittuneet ja tätä komponenttien suhdetta kutsutaan aaltoimpedanssiksi. Magneettikentän ollessa hallitseva, aaltoimpedanssi on pieni ($< 377 \Omega$) ja suuri-impedanssisessa piirissä virta on pieni, jolloin sähkökenttä on hallitseva ja aaltoimpedanssi on suuri ($> 377 \Omega$). (ARRL, 2011, s. 1-3.)

Lähi- ja kaukokentän tarkka raja ei ole täsmällisesti määritetty mitta ja asiantuntijat ovat käyneet keskustelua siitä, että missä kohtaa toinen kenttä alkaa ja toinen loppuu. Yleisesti on kuitenkin hyväksytty säteilevän lähi- ja kaukokentän rajan määriteltävän kaavalla:

$$D = 2L^2/\lambda \quad (1)$$

L on antennin fyysinen mitta (m)

λ on taajuuden aallonpituus (m)

Kaavan suhteen on huomioitava, että tämä määritelmä ei välttämättä päde erikoisempien antennitoteutusten osalta (ARRL, 2011, s. 1-8).

Taulukko 1. Sähkö- ja magneettikentän ominaisuuksia

Sähkökenttä	Magneettikenttä
esimerkiksi avoin johdin	esimerkiksi johdinsilmukka
suuri impedanssi	pieni impedanssi
energia varastoitunut sähkökenttään	energiavarastoitunut magneettikenttään
ei virtaa	alhainen jännite
magneettikenttä vähäinen	sähkökenttä vähäinen

2.2 Radioaallot ja niiden eteneminen

Radioaalto syntyy oskillaattorilla kehitetystä suurtaajuisesta virrasta, joka syötetään antenniin. Antennijohtimissa edestakaisin liikkuvat elektronit ovat tällöin kiihtyvässä liiketilassa, jonka seurauksena muodostuu antennista pois päin eteneviä radioaaltoja. (Lehto, 2006, s. 77.)

Eteneminen tapahtuu tyhjiössä ja kokonaisuudessaan samanlaisessa eli homogeenisessä väliaineessa suoraan lähettimen ja vastaanottimen välillä. Radioaalto kulkeutuu hieman hitaammin ja aallonpituus on lyhyempi ilmakehässä kuin tyhjiössä. Tämän lisäksi ilman taitekerroin vaihtelee korkeudesta riippuen, joka vaikuttaa myös osaltaan aallon etenemiseen. (Lehto, 2006, s. 81.)

Alhaalla merenpinnan tasossa ilman taitekerroin on noin 1,0003. Ilma harvenee ja taitekerroin pienenee lähestyessä tyhjiön taitekerrointa (tasan 1) korkeuden kasvaessa. Radioaalto taittuu hieman Snellin lain mukaisesti ilmakehän eri päällekkäisten kerroksien rajapinnoilla. Tavallisissa sääoloissa aallon kulkusuunta kaareutuu hitaasti alaspäin, jonka vuoksi aalto etenee myös horisontin taakse. (Lehto, 2006, s. 81.)

Taulukko 2. Radiotaajuusalueet, jossa on esitettynä taajuudet sekä aallonpituudet.

Radiotaajuusalue	Taajuus	Aallonpituus
VLF (very low frequency)	3–30 kHz	100–10 km
LF (low frequency)	30–300 kHz	10–1 km
MF (medium frequency)	300–3000 kHz	1–0,1 km
HF (high frequency)	3–30 MHz	100–10 m
VHF (very high frequency)	30–300 MHz	10–1 m
UHF (ultra high frequency)	300–3000 MHz	1–0,1 m
SHF (super high frequency)	3–30 GHz	100–10 mm
EHF (extremely high frequency)	30–300 GHz	10–1 mm

Matkalla lähettimestä vastaanottimeen useat tekijät vaikuttavat radioaallon etenemiseen ja sen voimakkuus vaihtelee sekä ajallisesti että paikallisesti. Lisäksi tietoliikenteeseen erityisesti vaikuttava tekijä on mahdollinen vääristyminen radioaallon välittämässä tietosisällössä. Radioaallon edetessä ilmakehässä ja lähellä maanpintaa se vaimenee, heijastuu, siroaa, taittuu ja diffraktoituu (eräänlainen taipuminen). Vaikka aallot etenevät myös tyhjiössä, niin edellä mainitut asiat monimutkaistavat käytäntöä verrattuna teoriaan, jossa sähkömagneettinen aalto etenee ilman mitään väliainetta. (Lehto, 2006, s. 79.)

Radioaallot etenevät usein lähellä maanpintaa, jolloin aaltojen kulkuun vaikuttavat ilmakehän lisäksi kasvillisuus, rakennukset, maaston muodot

sekä maaperän tai vesistön sähköiset ominaisuudet. Maanpinnan kaarevuuden johdosta suora näköyhteys lähettimen ja vastaanottimen antennien välillä voidaan sanoa olevan muutamia kymmeniä kilometrejä, jolloin vähintään toisen antennista on oltava sijoitettuna korkeaan mastoon. Mikäli yhteysväli ei ole täysin vapaa esteistä, radioyhteys ei välttämättä katkea, koska aallot läpäisevät jossakin määrin esteitä tai saavuttavat vastaanottimen diffraktion avulla. (Lehto, 2006, s. 82.)

VHF-taajuusalueella ja tätä korkeammilla taajuuksilla esteetön näköyhteys antennien välillä tulee yhä merkityksellisemmäksi taajuuden kasvaessa. Maanpinnan muodoista ja rakennuksista aiheutuvat heijastukset voivat aiheuttaa radioaallon etenemiseen sekä haitallisia että hyödyllisiä vaikutuksia. Monitie-etenemisestä johtuen radioaalto voi häipyä havaittavista, mutta heijastumisen vaikutuksesta signaali voi kuulua myös paikoissa, joihin aalto ei suoraan pääse kulkeutumaan. Matalilla taajuuksilla (< 5 MHz) radioaalto sitoutuu johtavaan pintaan ja etenee pinta-aaltona joissakin tapauksissa myös horisontin taakse. Mitä johtavampi pinta ja mitä matalampi taajuus on, sitä paremmin pinta-aaltoeteneminen tapahtuu. Tästä johtuen aallon vaimennus on pienempi meren päällä, kuin kuivalla maalla. (Lehto, 2006, s. 82.)

Pitkät radioaallot tunkeutuvat syvemmälle kuin lyhyet aallot ja ne vaativat näin ollen tiiviimpää massaa hyvän heijastuksen saavuttamiseksi. Riippuen aallonpituudesta (ja siten taajuudesta) radioaallot voivat heijastua rakennuksista, puista, kulkuneuvoista, maasta, vedestä, ionisoituneista kerroksista ylemmässä ilmakehässä ja ilmamassojen välissä, joilla on eri lämpötila tai kosteus. (ARRL, 2011, s. 4-1.)

2.3 Eteneminen HF-taajuusalueella

HF-taajuusalueella radioaallon eteneminen tapahtuu pinta-aaltona ja avaruusaaltona. Pinta-aaltoeteneminen voidaan jakaa edelleen kahteen osaan, eli suoraksi näköyhteydeksi ja maan tai meren pintaan sähköisesti sitoutuneeksi aalloksi. Avaruusaalto etenee lähettimestä kohti ilmakehän ylempiä kerroksia ja heijastuu ionosfäärissä takaisin kohti maanpintaa. Edellä mainittujen kahden etenemismuodon väliin jää alue lähettimen ympärille, jossa pinta-aalto on vaimentunut olemattomiin ja ionosfäärin kautta heijastunut lähete ei ole kuultavissa. Kuvassa 3 on esitetty periaate aaltojen etenemismuodoista ja katvealueesta.

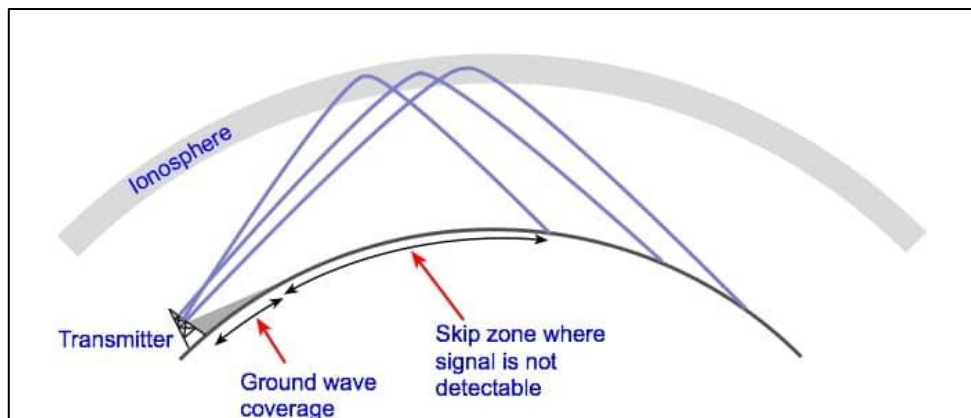
Radioaallon kulkumatalla olevat maaston muodot vaikuttavat erittäin paljon signaaliin. Mäet ja muut pinnan korkeat kohdat vaimentavat lähetettä tehden sen vastaanoton useissa tapauksissa jopa mahdottomaksi. Matalilla taajuuksilla pinnan rakenne ja ominaisuudet aiheuttavat muutoksia sähköön johtavuuteen. HF-taajuusalueen aallonpituuksilla lähetet kulkeutuvat pidemmälle hyvin johtavan pinnan avulla, kuten merellä tai kosteilla alueilla. Yhteysetäisyydet merellä ovat huomattavasti pidempiä kuin esimerkiksi kuivan hiekkamaan yllä, jossa signaalin vaimeneminen tapahtuu nopeasti. (Radio signal path, n.d.)

Taajuuden noustessa matka, jonka pinta-aalto kykenee kulkemaan ilman liiallista energian häviötä, tulee lyhyemmäksi ja lyhyemmäksi. Vaimennus kasvaa taajuuden mukana, kun aallonpituus lyhenee. Optimaalisessa tilanteessa HF-taajuusalueen matalimmilla taajuuksilla voidaan saavuttaa lähes sadan kilometrin yhteysetäisyyksiä. Yleisesti voidaan todeta, että taajuuden ylittäessä 10 MHz kantama laskee alle 60 kilometriin. (ARRL, 2011, s. 4-2.)

Troposfäärin ja maanpinnan lisäksi ionosfääri vaikuttaa radioaaltojen kulkuun toimimalla heijastimena. Ionosfääri alkaa noin 70 kilometrin korkeudelta ja yltää tuhansien kilometrien etäisyydelle, missä se sulautuu maapallon magneettikehään. HF-taajuusalueen kannalta merkittävä alue on noin 100–400 kilometrin korkeudella, jossa taajuudesta ja säteilykulmasta riippuen signaalit taittuvat vähitellen takaisin kohti maata. (Ilmatieteenlaitos, n.d.)

Ionosfäärissä on auringon ultravioletti- ja röntgensäteilyn ionisoimaa kaasua eli plasmaa. Kaasumolekyyliden uloimmat elektronit ovat irronneet auringon säteilyn ja magnetosfääristä saapuvien nopeiden hiukkasten törmäysten vaikutuksesta. Ionosfääri on hyvä sähkön johde ja se vuorovaikuttaa tehokkaasti sähkö- ja magneettikenttien kanssa vapaiden elektronien sekä positiivisesti varautuneiden ionien ansiosta erityisesti alle 30 MHz radio-taajuuksilla. (Ilmatieteenlaitos, n.d.)

HF-taajuuksilla on mahdollista saada radioyhteys ionosfäärin kautta jopa maapallon toiselle puolelle. Yhdellä heijastumisella tavoitettava yhteys on noin 4000 kilometriä, mikäli radioaalto lähtee maasta lähes nollan asteen säteilykulmalla kohti horisonttia. Tätä pidemmällä yhteyksillä aalto heijastuu useita kertoja ionosfäärin ja maanpinnan välillä. Lyhyemmät yhteysetäisyydet saavutetaan jyrkemmillä säteilykulmilla, jolloin signaali heijastuu ionosfääristä takaisin lähempänä lähetintä. (ARRL, 2011, s. 4-21.)



Kuva 3. Pinta-aalto, avaruusaalto ja katvealue (HF Propagation, n.d.).

Ionisaation voimakkuus riippuu auringon säteilyn lisäksi myös ilmakehän tiheydestä, joka vaihtelee suhteessa korkeuteen maanpinnasta ylöspäin. Ionosfääristä on kartoitettu kolme suurta kerrosta, jotka on nimetty alhaalta lukien D-, E- ja F-kerroksiksi. Päivällä F-kerros jakautuu auringon vaikutuksesta edelleen F₁- ja F₂-kerroksiin. Auringon laskun jälkeen nämä su-

lautuvat yhteen ja alimmainen D-kerros häviää ionisoivan säteilyn pienentyessä minimiin. (Lehto, 2006, s. 82.)

Ionosfäärin tila vaihtelee auringon vaikutuksen lisäksi myös vuodenajasta ja maantieteellisestä sijainnista johtuen. Ionisaatio on voimakkainta päiväntasaajan alueella, jossa elektronien tihentyminen on suuri. Tällä alueella on mahdollista käyttää huomattavasti korkeampia taajuuksia kuin esimerkiksi Suomen leveyspiireillä. Auringossa tapahtuneet voimakkaat purkaukset saattavat aiheuttaa ionosfäärin kautta tapahtuviin radioyhteyksiin niin voimakkaita häiriöitä, että liikennöinti estyy lähes kokonaan. Häiriöt syntyvät auringon purkausten aiheuttamista geomagneettisista myrskyistä. (Lehto, 2006, s. 83.)

Radioaallon heijastuminen ionosfäärin eri kerroksista on mahdollista, kun käytettävä taajuus on pienempi kuin rajataajuus, joka määräytyy ionosfäärin tilan ja aallon tulokulman perusteella. Yöllä suoraan ylöspäin lähetettävän radioaallon rajataajuus voi olla esimerkiksi 3 MHz ja päivällä matalalla kulmalla lähetettävä taajuus vastaavasti 30 MHz. Ionosfäärin kyky heijastaa lähetettäviä taajuuksia kasvaessa yli HF-taajuusalueen. (Lehto, 2006, s. 83.)

Päivällä heijastuminen tapahtuu taajuudesta sekä tulokulmasta riippuen E-, F₁- ja F₂-kerroksissa. F₂-kerroksen korkeudella tapahtuva heijastuminen on pääasiainen mekanismi yöaikaan. Paras yhteydellä käytettävä taajuus riippuu edellisissä kappaleissa mainittujen asioiden lisäksi myös tavoiteltavan yhteysetäisyyden pituudesta ja siten haluttavasta heijastuskorkeudesta. Tyypillisesti korkeammat taajuudet toimivat hyvin päivällä ja matalat taajuudet yöllä. (Kosola & Solante, 2013, s. 62.)

Ilmakehän, ionosfäärin ja auringon aiheuttamien ilmiöiden syntymekanismiin sekä niiden vaikutuksista HF-taajuusalueen käyttöön palataan myöhemmin oppimateriaalin luvussa 4.

3 ANTENNITEKNIikka

Kaikissa radiotekniikan sovelluksissa tarvitaan antennia ja sen tärkein tehtävä on siirtää lähettimestä tuleva teho mahdollisimman suorituskykyisesti antennia ympäröivään tilaan. Samoin tehtävänä on myös siirtää signaali päinvastoin vapaasta tilasta mahdollisimman tehokkaasti vastaanottimeen.

Antenniksi saattaa joissakin tapauksissa riittää lähes mikä tahansa sähköä johtava lanka. Esimerkiksi vastaanotettaessa voimakasta yleisradiolähetystä antennina voi toimia kaikki metallinen, johon lähete synnyttää suurtaajuusvirran ja jonka signaali johtuu radiovastaanottimen piireihin. Näissä tapauksissa antennina voi toimia naula, vaatehenkari, lämpöpatteri tai ihminen. (Lehto, 2006, s. 137.)

Huomattavaa on, että usein erilaiset sähkölaitteet toimivat lähetyksinä säteilemällä ympäristöönsä muita laitteita häiritseviä sähkömagneettisia kenttiä. Koska antennit pääsääntöisesti toimivat samalla tavalla läheyydessä ja vastaanotossa, nämä edellä mainitut laitteet voivat siten toimia

myös vastaanottimena häiriökentille siepaten itseensä ulkopuolisia ja ei tarkoituksellisia sähkömagneettisia kenttiä. (Lehto, 2006, s. 137.)

Signaalin ollessa heikko ja häiriöllisten signaalien seassa vastaanottimen näkökulmasta katsottuna, tulevat merkitykselliseksi antennin ominaisuudet ja tällöin erityisesti on tarpeen hyvä antenni. Kasvava radiotaajuuksien käyttö ja ilmassa/avaruudessa liikkuvien signaalien määrä asettavat antennille vaativia ominaisuuksia. Antennin käyttötarkoitus ja käytettävä taajuus vaikuttavat erittäin paljon antennien rakenteeseen. (Räisänen & Lehto, 2011, s. 151.)

HF-taajuusalueen yhteyksissä käytetään yleisesti samaa antennia lähettämiseen ja vastaanottamiseen. Koska kaikkia vaadittavia toiminnallisuuksia ei aina saavuteta yhdellä toteutuksella, joudutaan antennin valinnassa tekemään kompromisseja ja tästä syystä tietyt antennin ominaisuudet eivät toimi aina parhaalla mahdollisella tavalla kaikissa käyttötapauksissa.

3.1 Antennitekniikan perusteita

Suorituskyvyn osalta antenni määritellään usein sen suuntakuviolla, polarisaatiolla ja vahvistuksella eli säteilyominaisuuksilla. Piiriominaisuudet, kuten impedanssi, hyötysuhde ja kaistanleveys ovat myös tärkeitä antennin toiminnan kannalta. Usein mekaaniset ominaisuudet saattavat rajoittaa edellä mainituilla perusteilla valittavaa parasta antennia. Tärkeimpiä mekaanisia ominaisuuksia ovat esimerkiksi koko, paino ja ilmanvastus. Näiden kaikkien erilaisten ominaisuuksien tärkeysjärjestys on harkittava sovelluksen ja käyttötarkoituksen perusteella. (Räisänen & Lehto, 2011, s. 152.)

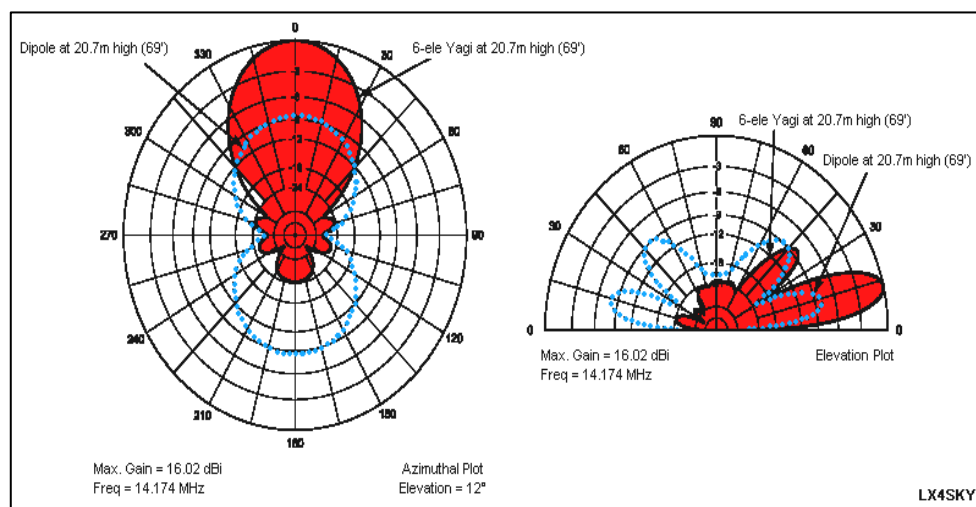
Antennien rakenteesta riippumatta niille voidaan määritellä myös peruskäsitteitä, jotka ovat samanlaisia kaikille antennille. Resiprookkisuus tarkoittaa, että antennit toimivat samalla tavalla lähetettäessä ja vastaanotettaessa tehoa. Jos antenni esimerkiksi lähettää hyvin tiettyyn suuntaan horisontaali- ja vertikaalitasossa, se myös vastaanottaa hyvin samoista suunnista. Yhteysvälivaimennus toimii niin ikään samalla tavalla molempiin suuntiin kahden erilaisen antennin välillä. (Räisänen & Lehto, 2011, s. 151.)

Mikäli antennissa on epäresiprookkisia komponentteja, vahvistimia tai jos antennien välisellä yhteydellä on plasmaa, jossa tapahtuu Faradaykiertymistä (avaruusaalto/ionosfääriyhteys) niin resiprookkisuus ei tässä tapauksessa päde. Resiprookkisuus pitkien matkojen yhteyksillä ionosfäärin kautta ei välttämättä ole tarkasti resiprookkinen. Koska radioaallot eivät aina kulje samaa reittiä, voi näin ollen esiintyä huomattavaa vaihtelua ajan suhteen lähetys- ja vastaanottovuorottelujen välissä. (ARRL, 2011, s. 1-16.)

3.2 Antennien ominaisuuksia

Erilaisia antennityyppejä on siis käyttötarkoituksen mukaan useita. Kaikille yhteisiä ja tärkeitä ominaisuuksia ovat suuntakuviot, säteiltävän aallon polarisaatio, vahvistus, impedanssi ja kaistanleveys. Kuten aiemmin on mainittu niin nämä samat ominaisuudet koskevat myös radioaallon vastaanottoa antennin osalta.

Suuntakuviolla kuvataan kuinka tehokkaasti antenni säteilee eri suuntiin ja vastaanottaa näistä suunnista. Useat antennit säteilevät voimakkaasti johonkin tiettyyn suuntaan ja tällöin suuntakuviossa on havaittavissa selvä pääkeila. Tämän lisäksi esiintyy heikompia sivukeiloja sekä mahdollisesti takakeila. Suuntakuviossa on myös nollakohtia, joiden suuntaan ei säteilyä lähde lainkaan. (Peltonen, Perkkiö & Vierinen, 2012, s. 336.)



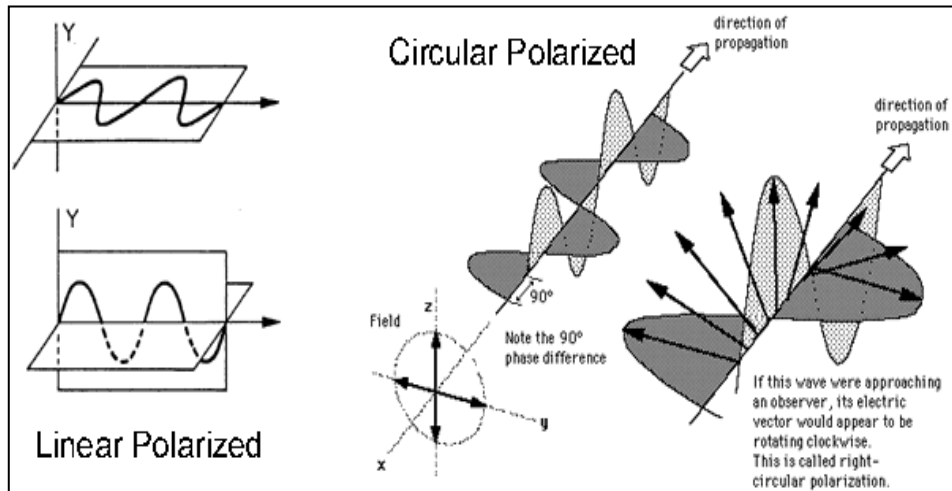
Kuva 4. Esimerkki antennin suuntakuviosta (Astrosurf, n.d.).

Kuvan neljä vasemmalla puolella esitetään antennin horisontaalinen säteilykuviot, toisin sanoen miltä kuvio näyttää ylhäältä päin katsottuna. Oikealla puolella on kuvattu säteilykuviot vertikaalitasossa, eli antennin sivulta katsottuna.

Yleisesti suuntakuvioista selviää pääkeilan suunta, puolen tehon keilanleveys sekä sivukeilojen ja nollakohtien sijainti tehotasoiin. Suuntakuvioita pidetään usein tärkeimpänä suunnitteluperusteena ja sen avulla voidaan tehdä ratkaisu toteutuksesta. Ympärisäteilevä antenni voi olla toivottava säteilijä joissakin tapauksissa, joskus voidaan haluta mahdollisimman suuntaavaa antennia tai tarve saattaa olla sellainen johon muotoillun keilan antenni on paras ratkaisu. (Räisänen & Lehto, 2011, s. 153.)

Polarisaatio tarkoittaa antennista lähtevän säteilyn sähkökentän suuntaa. Usein kentän värähtelyn suunta on lineaarista ja se on myös helpoin toteuttaa, mutta sähkömagneettinen aalto voi olla myös ympyräpolarisoitunut. Kentän värähtelysuunnan ollessa pystytasossa, kyseessä on pystypolarisaatio ja suunnan ollessa vaakatasossa on kyseessä vaakapolarisaatio. Yleisesti voidaan sanoa, että mikäli antenni on pystyssä maan pintaan

nähdessä, niin sen polarisaatio on pystypolarisaatio. Vaakatasoon asennetut antennit ovat vaakapolarisoituja. (Peltonen ym., 2012, s. 336.)



Kuva 5. Antennin polarisaatio (Antenna Polarisation, n.d.).

Pysty- tai vaakapolarisoituneen aallon vastaanotto on paras mahdollinen, kun antennin polarisaatio on samansuuntainen lähetetyn aallon suhteen. Heikoimmassa tilanteessa aalto ei kytkeydy antenniin lainkaan, jos polarisaatiot ovat kohtisuorassa toisiinsa nähden. Ympyräpolarisaatiossa aallon sähkökentän suunta muuttuu jatkuvasti kahden kiertosuunnan välillä. Vastaanotettaessa tällainen aalto antenniin ja kiertosuuntien ollessa samat, niin sähköinen kytkeytyminen tapahtuu vastaanottoantennissa erittäin hyvin. (Lehto, 2006, s. 140.)

Polarisaatio muuttuu yleensä ionosfäärissä, jolloin saapuvalla aallolla on taipumus olla ympyräpolarisaatio riippumatta lähetysantennin polarisaatiosta. Eri polarisaatioiden kesken ei näyttäisi olevan eroavaisuuksia liikennöitäessä ionosfäärin kautta. Pääsääntöisesti antenni, joka lähettää hyvin tietyllä suunnalla, antaa myös suotuisan vastaanoton samalta suunnalta huolimatta ionosfäärin vaihteluista. (ARRL, 2011, s. 1-16.)

HF-taajuusalueen liikennöinnissä on otettava huomioon, että vaikka ionosfäärin kautta kulkevien aaltojen polarisaatiolla ei ole merkitystä, niin polarisaation merkitys ja tärkeys on edelleen voimassa pinta-aaltoyhteyksillä.

Antennin vahvistus ilmaisee kuinka paljon se säteilee pääkeilan suuntaan verrattuna ideaaliseen antenniin, joka säteilee tasaisesti kaikkiin suuntiin. Tavallinen antenni ei tuota vahvistusta, eli syötettäessä esimerkiksi yhden watin teho säteilijään niin radioaallon teho on korkeintaan yksi watti. Käytännössä teho on pienempi muun muassa häviöiden ja heijastuksien vaikuttamana. Antenni tuottaa suuren vahvistuksen keskittäessään säteilyä voimakkaasti pääkeilan suuntaan. Vastaanotossa suurella vahvistuksella tarkoitetaan antennin kykyä kerätä säteilyä tehokkaasti laajalta alueelta. (Lehto, 2006, s. 138.)

Impedanssilla on merkittävä vaikutus säteilytehon siirtymisessä antenniin ja siitä edelleen radioaallosi ympäröivään tilaan. Peltosen ynnä muiden

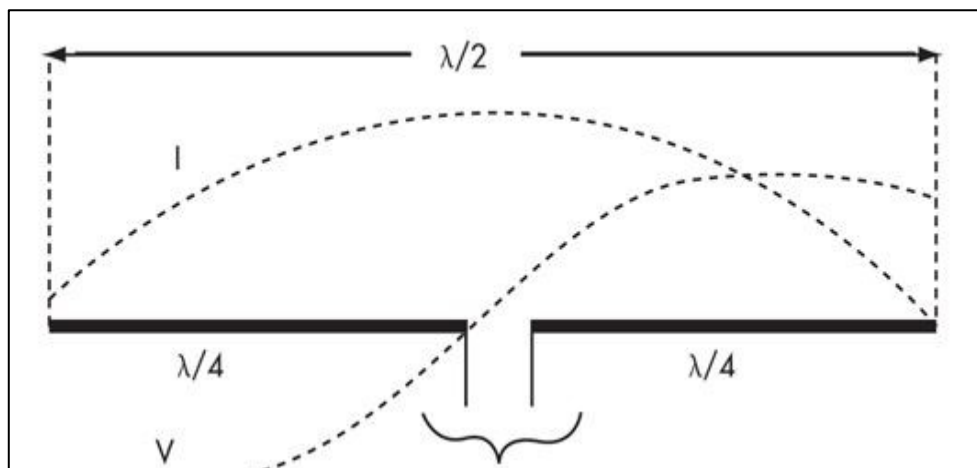
(2012, s. 337) mukaan ”energian siirto lähetinpiiristä lähetysantenniin ja vastaanottoantennista vastaanottimeen on tehokkainta, jos antenneilla on samat impedanssit muun piirin kanssa.” Mikäli näin ei ole, on antennin ja piirin välillä tehtävä impedanssisovitus.

HF-taajuusalueen antennien keskinäisimpedanssiin vaikuttavat myös niiden reaktiivisen lähikentän alueella olevat muut johtavat materiaalit. Muita materiaaleja ovat esimerkiksi maa, rakenteet ja muut antennit. Impedanssi määräytyy Ohmin lain perusteella ja tulee merkitykselliseksi varsinkin niissä tapauksissa, jolloin antennin yhteydessä käytetään viritintä ja antennin läheisyydessä on liikkuvia elementtejä, kuten aluksilla tai ajoneuvoissa olevat nosturit tai muut vastaavat. (ARRL, 2011, s. 1-6.)

Kaistanleveys osoittaa taajuusalueen, jolla antenna voidaan käyttää määritetyn suorituskykytason saavuttamiseksi. Kaistanleveys voidaan ilmoittaa taajuuden yksiköinä (MHz tai kHz) tai sen prosentteina antennin suunnitellusta toimintataajuudesta. Käytettävän taajuuden laskiessa kapenee prosentteina ilmoitettu kaistanleveys vastaavasti. Esimerkiksi 21 MHz:n taajuudella 5 prosentin kaistanleveys on 1,05 MHz, mutta 3,75 MHz:n taajuudella kaistanleveys on vain 187,5 kHz. Erilliset antennivirittimet lisäävät antennien käytettävyyttä laajalla taajuusalueella, vaikka suunniteltu kaistanleveys ei sitä mahdollistaisikaan. (ARRL, 2011, s. 1-16.)

3.3 Dipoli- ja monopoli-antennit

Dipoli on antennin perusmalli ja sen kaikkein yleisin muoto on puolen aallon pituinen johdin suhteessa käytettävään taajuuteen. Tämä pituusmääritelmä on monien muiden kompleksisten antennitoteutusten perusta. Dipoli-antennin nimitys tulee kahdesta osasta, jotka toimivat yhdessä säteilijänä muodostaen kaksi puoliskoja, joihin syötetään keskeltä vastakkaiset jännitteet. Resonanssitaajuus saavutetaan, kun dipolin sähköinen pituus on jokin satunnainen monikerta puolen aallon pituudesta. (ARRL, 2011, s. 2-1.)

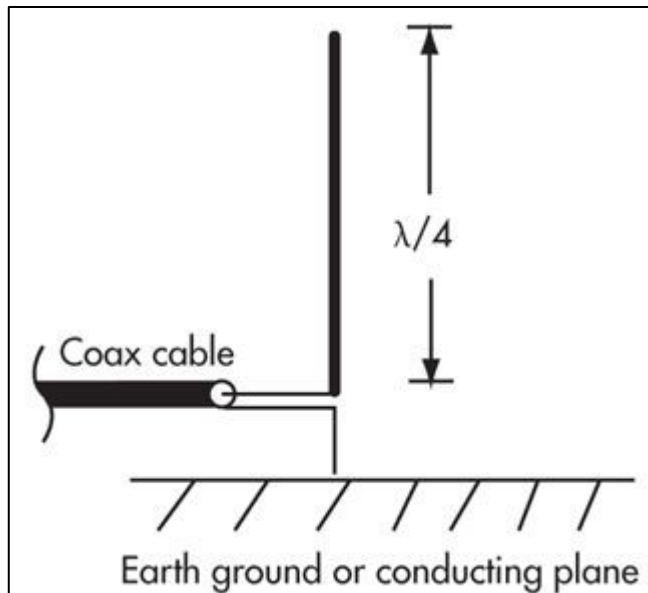


Kuva 6. Dipoli-antenni, virta- ja jännitejakauma (Electronic Design, n.d.).

Virran ja jännitteen ollessa kuvan mukaisesti täsmälleen 90 asteen vaihe-erossa toisiinsa nähden, saavutetaan dipoli-antennilla aiemmin mainittu re-

sonanssitaajuus. Antennin säteilykuvion suurin kentänvoimakkuus on langaa vasten kohtisuorassa tasossa ja nollakohdat ovat langan suuntaisesti. (Räisänen & Lehto, 2011, s. 160.)

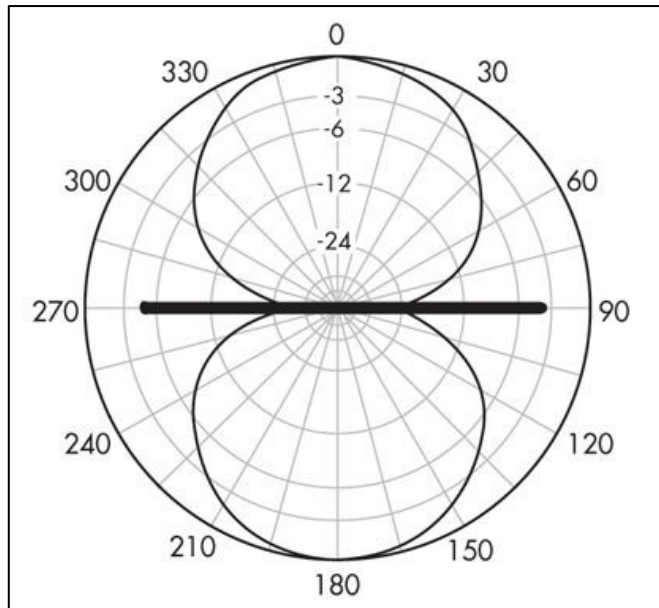
Monopoliantennin toinen osa verrattuna dipoliin on toteutettu maatasona ja siten antenni muodostuu fyysisesti vain yhdestä johtimesta, maatason muodostaessa toisen johtimen imaginäärisenä komponenttina. Monopoliantennin tavallisin toteutus on neljännesaallon pituinen. Antennin säteilykuvio on samankaltainen kuin dipoliantennilla ja maatason toimiessa hyvin sen suorituskyky vastaa dipoliantennia. (ARRL, 2011, s. 2-13.)



Kuva 7. Monopoliantenni (Electronic Design, n.d.).

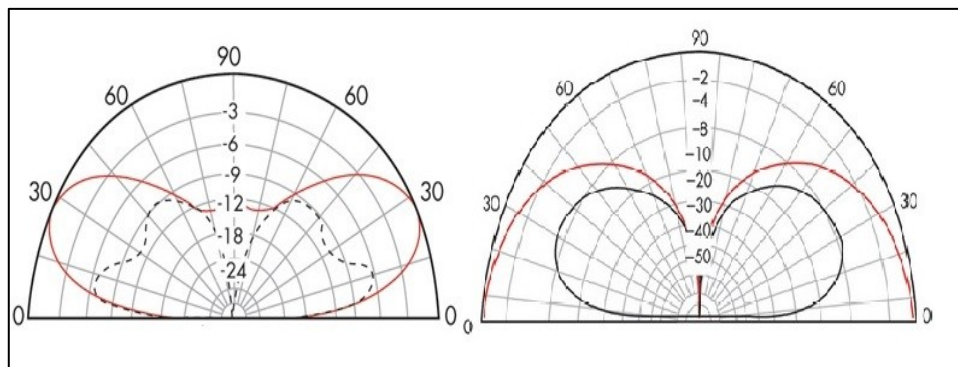
Monopoliantenni asennetaan käytännössä aina pystyasentoon suhteessa maan pintaan. Lisäksi hyvän maatason saavuttamiseksi antennin yhteyteen asennetaan yleensä maadoituskaapeleita säteittäin antennin juuresta pois päin (ARRL, 2011, s. 2-13). Asennustapansa ja toimintaperiaatteensa vuoksi antenna kutsutaan monessa yhteydessä myös vertikaaliseksi monopoliksi, vertikaaliksi, piiska-antenniksi tai piiskaksi.

Kuvassa kahdeksan on esitetty dipoliantennin horisontaalinen säteilykuvio. Monopoliantennin säteilykuvio tässä tasossa on pyöreä ympyrä, jolloin säteilijää kuvaava paksu viiva on pystyssä ja se esitetään kuviossa pisteenä ympyrän keskellä.



Kuva 8. Antennien horisontaalinen säteilykuvio (Electronic Design, n.d.).

Vertikaaliset säteilykuviot eroavat antennien osalta siten, että suurin vahvistus dipolilla on korkeammille kulmille kuin monopoli antennilla. Dipoli antennin säteilykuvio muuttuu voimakkaasti suhteessa asennuskorkeuteen maasta ja monopoli antennin säteilykuvio heikkenee huomattavasti, mikäli maataso ei ole riittävä.



Kuva 9. Dipoli- ja monopoli antennin vertikaaliset säteilykuviot (Electronic Design, n.d.).

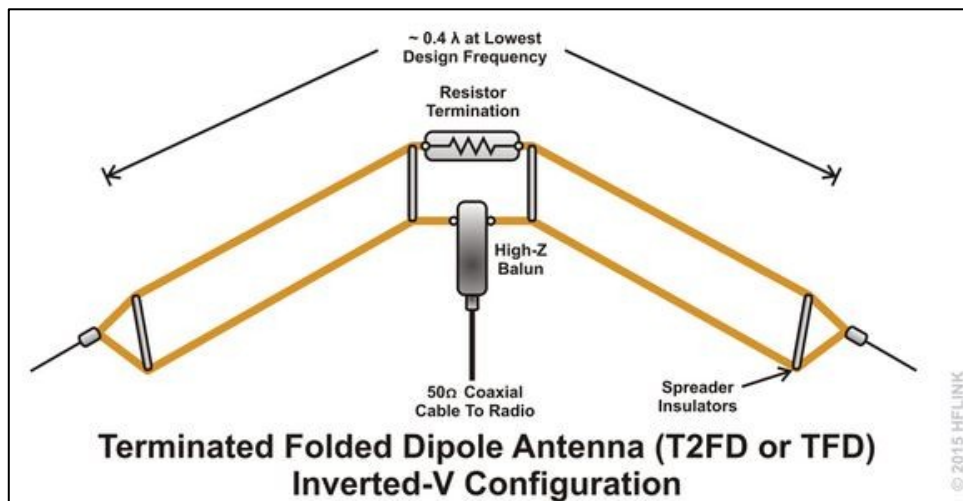
Kuvassa yhdeksän on esimerkki dipoli antennin säteilykuvioista, kun antenni on asennettu $\frac{1}{2} \lambda$ korkeudelle maan pinnasta. Monopoli antennin osalta säteilykuvio on esitetty optimaalisesti johtavan maatasen olosuhteissa. Esimerkistä on nähtävissä säteilykuvion (sisemmät kuviot) muutos, kun dipoli antenni on 1λ korkeudella ja monopoli antenni keskimääräisesti johtavan maan yläpuolella, kuten kuiva hiekkamaa.

Taittodipoli on dipoli antennin muunnos, jolla saavutetaan mahdollisuus käyttää pidempiä siirtolinjoja radion ja antennin välillä. Antenni kasvattaa syöttöpisteen impedanssia vastaamaan paremmin sovitusta siirtolinjan korkealle impedanssille. Pitkällä siirtolinjalla on suotuisampi käyttää korkeaimpedanssista avojohtoa pienempien tehohäviöiden takia, jolloin tait-

todipolilla saadaan toteutetuksi parempi impedanssisovitus kuin dipolian-
tennilla. (ARRL, 2011, s. 2-11.)

Päätevastuksellinen taittodipoli (Terminated Folded Dipole, TFD) on edel-
lisen antennityypin laajakaistainen muunnos. Antennin toiseen johtimeen
on kytketty 600Ω päätevastus, jonka tarkoituksena on toimia keinokuor-
mana. Tämän avulla saadaan laskettua korkeimpia syöttöpisteen impe-
dansseja, jotka aiheutuvat laajan taajuusalueen käytöstä. TFD-antenni voi-
daan rakentaa niin, että se kattaa koko taajuusalueen 2–30 MHz välillä
SWR:n ollessa 3:1 tai vähemmän. (ARRL, 2011, s. 10-11.)

Vastus hävittää osan lähetystehosta ja se voi olla jopa 50 prosenttia joilla-
kin taajuuksilla, mutta toteutus mahdollistaa antennin käytön ilman erillis-
tä impedanssisovitusyksikköä tai vahvistinta. TFD-antennin lisääntynyt
käyttöarvo ilman erillisiä lisälaitteita korvaa usein menetetyn signaalite-
hon. Tämänlaiset antennit ovat yleisiä kriisialueiden operaatioissa ja niissä
tilanteissa, joissa voidaan asentaa vain yksi HF-antenni käytettäväksi laa-
jalla taajuusalueella, eikä erityisen suurta suorituskykyä jollakin tietyllä
taajuudella tarvita. (ARRL, 2011, s. 10-11.)



Kuva 10. Päätevastuksellinen taittodipoli (HF Link, n.d.).

Antennista käytetään myös nimitystä Terminated tilted folded dipole
(T2FD), koska asennus voidaan toteuttaa myös siten, että säteilijät ovat
kallistettuna maan pintaan nähden. Kuvan mukaisella asennuksella tällai-
seen käännettyyn V-asentoon voidaan vaikuttaa tarvittavan tilan määrään,
säteilykuvioon ja säteilykulmiin. Asennustavalla on mahdollista saavuttaa
ympärisäteilevä suuntakuvio ja useiden eri yhteysetäisyyksien (läheltä -
kauas) tavoitettavuus sekä NVIS-toiminnallisuus. NVIS-asiaa käsitellään
luvussa 4.3. (ARRL, 2011, s. 10-11.)

Laajakaistainen antenni ilman erillistä viritintä on käyttökelpoinen myös
niissä tapauksissa, kun radioyhteyden muodostaminen toteutetaan auto-
maattisella linkinmuodostuksella (Automatic Link Establishment, ALE).
Menetelmä perustuu ennalta asetettuihin taajuuksiin, joita radiot skanna-
vat ja yhteys muodostetaan automaattisesti käyttäen parasta mahdollista
liikennöintitaajuutta. Linkinmuodostuksessa radiot lähettävät vuoroin kut-

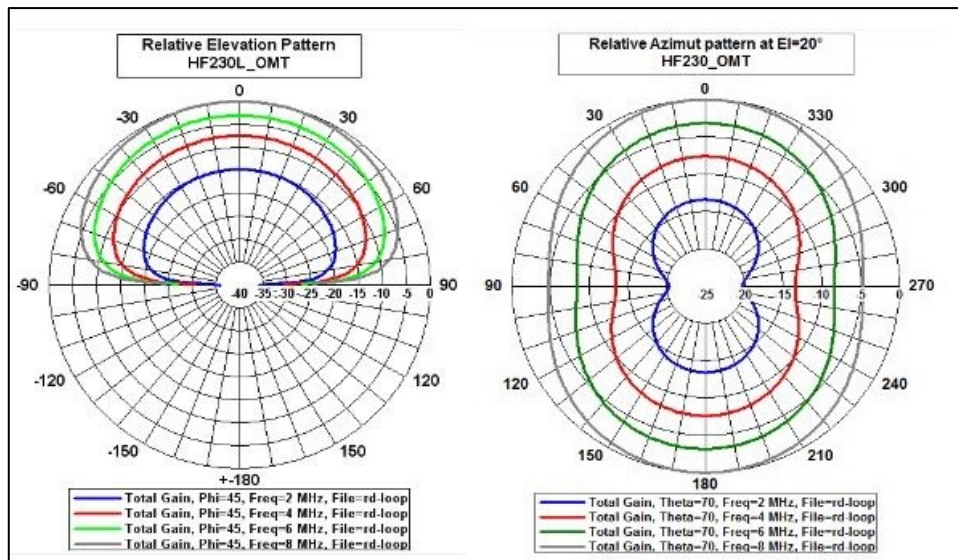
sua ja vastausta käyden ennalta asetettuja taajuuksia läpi. Näissä nopeissa taajuuden vaihdoksissa laajakaistainen antenni ilman viritintä on erittäin toimiva ratkaisu, jolla saavutetaan nopeampi yhteyden muodostuminen välttämättä linkinmuodostus- ja hyötyläheteiden hukkuminen antennin viritämiseen oikealle taajuudelle.

Monopoli-antennin ollessa ainoa vaihtoehto säteilijäksi johtuen esimerkiksi tilan rajoitteista (alus, ajoneuvo jne.), tuulikuormasta tai tavoiteltaessa ympärisäteilevää peittoaluetta, on laajakaistaisuus toteutettavissa erillisellä antennivirittimellä. Kattava peittoalue olisi toteutettavissa osittain myös suurilla 13 metriä pitkillä piiska-antenneilla. Haluttaessa käyttää maksimissaan 6–8 metrin pituisia antenneja, on virittimen käyttö välttämätöntä. (ARRL, 2011, s. 10-20.)

Antennin mitoitus sähköisesti oikean pituiseksi taajuuden perusteella tehdään virittimellä, jolla myös sovitaan taajuuden mukaan muuttuva antenin ja siirtolinjan välinen impedanssi. Virittimet kykenevät käsittelemään vain rajallisen alueen impedansseista tehokkaasti. Yleisesti hyvin matalat ja erittäin korkeat impedanssit johtavat suurempiin jännite- ja/tai virta-arvoihin virittimen komponenteissa, joka vaikuttaa laitteen suorituskykyyn heikentävästi. Viritin tulee sijoittaa fyysisesti niin lähelle antennin syöttöpistettä, kuin on mahdollista. Parhaassa tapauksessa syöttöpisteen välittömässä läheisyydessä on hyvä maadoituspiste, jonka yhteyteen myös viritin on asennettu. (ARRL, 2011, s. 10-20.)

3.4 Kehäantenni

Antenni on yleisimmän ympyrän tai neliön muotoinen, useasta kerroksesta muodostuva suljetun piirin silmukka. Pienen silmukan virtajakauma on lähes vakio koko antennin mitalla. Horisontaalisen suuntakuvion maksimit ovat samalla linjalla silmukan tasossa ja nollakohdat ovat kohtisuorassa silmukkaa vastaan. Antennin suuntakuviot ovat muuten samanlaiset kuin dipolin, mutta sähkö- ja magneettikentät ovat vaihtaneet paikkaansa. Pientä kehäantennia voidaan tästä syystä kutsua magneettiseksi dipoliksi. (Räisänen & Lehto, 2011, s. 163.) Kehäantennista käytetään myös nimityksiä silmukka, silmukka-antenni tai luoppi.

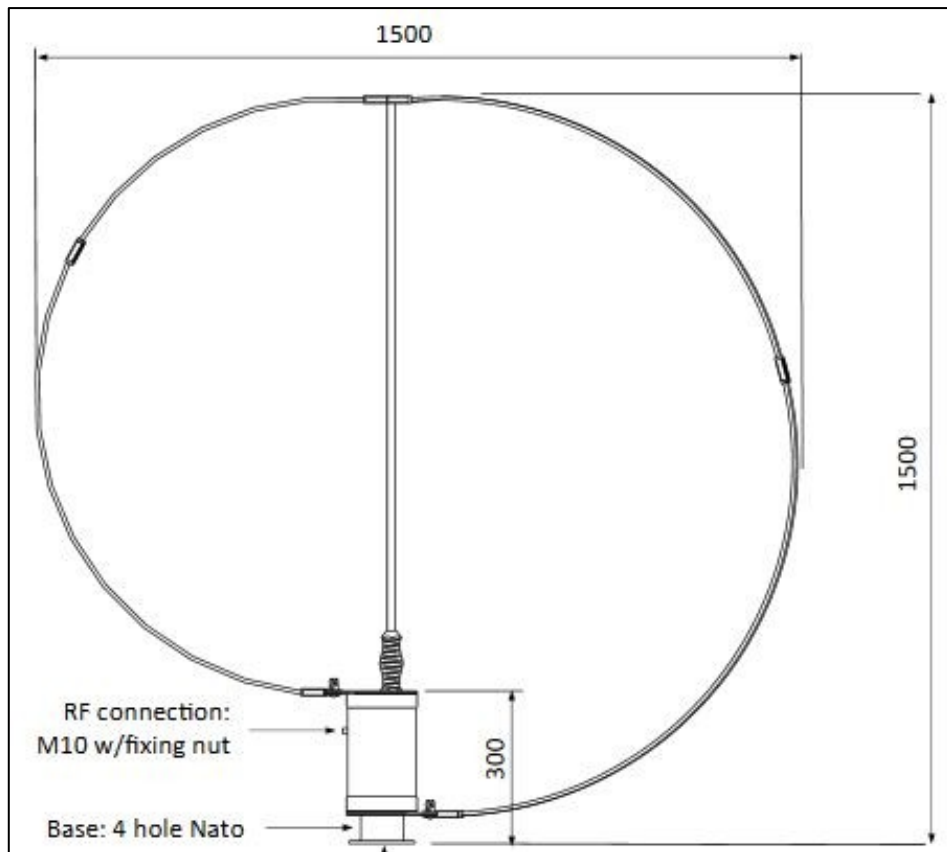


Kuva 11. Esimerkiantennin vertikaalinen ja horisontaalinen säteilykuvio taajuuksilla 2, 4, 6 ja 8 MHz (Comrod, 2007).

Antennit voidaan jakaa kokonsa perusteella isoihin ja pieniin luoppeihin. Isoissa antenneissa johdin sekä kehän koko ovat suhteellisia aallonpituuteen ja pienissä molemmat ovat hyvin pieniä fyysisiltä mitoiltaan aallonpituuden suhteen. Resonanssissa olevan luopin mitta on 1λ , eli käytettävän taajuuden aallon pituinen. Antennin tarkka muoto ei ole erityisen tärkeä, mutta paras antennivahvistus saavutetaan luopilla, jonka ympäröimitt peittää laajimman alueen taajuuden perusteella vaaditusta mitasta. Tämä muoto on ympyrä, seuraavaksi parhaat muodot ovat neliö ja kolmion muotoinen deltaluuppi. (ARRL, 2011, s. 5-1.)

Antennit asennetaan tavallisesti siten, että luopin taso on kohtisuorassa maata tai alustaa vasten. Säteilävän radioaallon polarisaatio määräytyy kohdalla, josta antennia syötetään. Alhaalta tapahtuva syöttö tuottaa horisontaalisen kentän suunnan ja sivulta syötetty antenni vastaavasti vertikaalisen polarisaation. (ARRL, 2011, s. 5-2.) Toimittaessa ionosfääriyhteyksillä polarisaation suunnalla ei ole merkittävää vaikutusta tämänkään antennin osalta, kuten luvussa 3.2 on mainittu.

Viritin mahdollistaa myös luoppiantennin käytön laajalla taajuusalueella sovittaen sen pituuden sähköisesti vastaamaan käytettävää taajuutta, samaan tapaan kuin piiska-antennin tapauksessa. Niin kutsutussa viritetyssä luopissa on myös antennin syöttöpisteen yhteyteen sijoitettu kondensaattori. Toteutuksella saadaan antennista selektiivisempi, eli tarkempi valitulla taajuudella ja lisäksi säteilykuvion nollakohdista muodostuu erittäin terävät. Lähetys tai vastaanotto näistä suunnista on mahdollista vain lyhyillä etäisyyksillä pinta-aaltoetenemisen kautta. (ARRL, 2011, s. 5-13.) Luopin säteilykuvio on tässä tapauksessa sellainen, että matalilla kulmilla antenniin saapuvista pitkän kantaman avaruusaalloista ei saada havaittavaa signaalia. Tällöin häiriösignaalit, jotka ovat usein matalilla kulmilla kaukaa saapuvia läheteitä, eivät kytkeydy antenniin. Säteilykuvion nollakohtien suunnat on myös huomioitava liikennöitäessä halutun vasta-aseman kanssa, jotta yhteydenmuodostus on mahdollista.



Kuva 12. Esimerkki silmukka-antennista (Comrod, 2007).

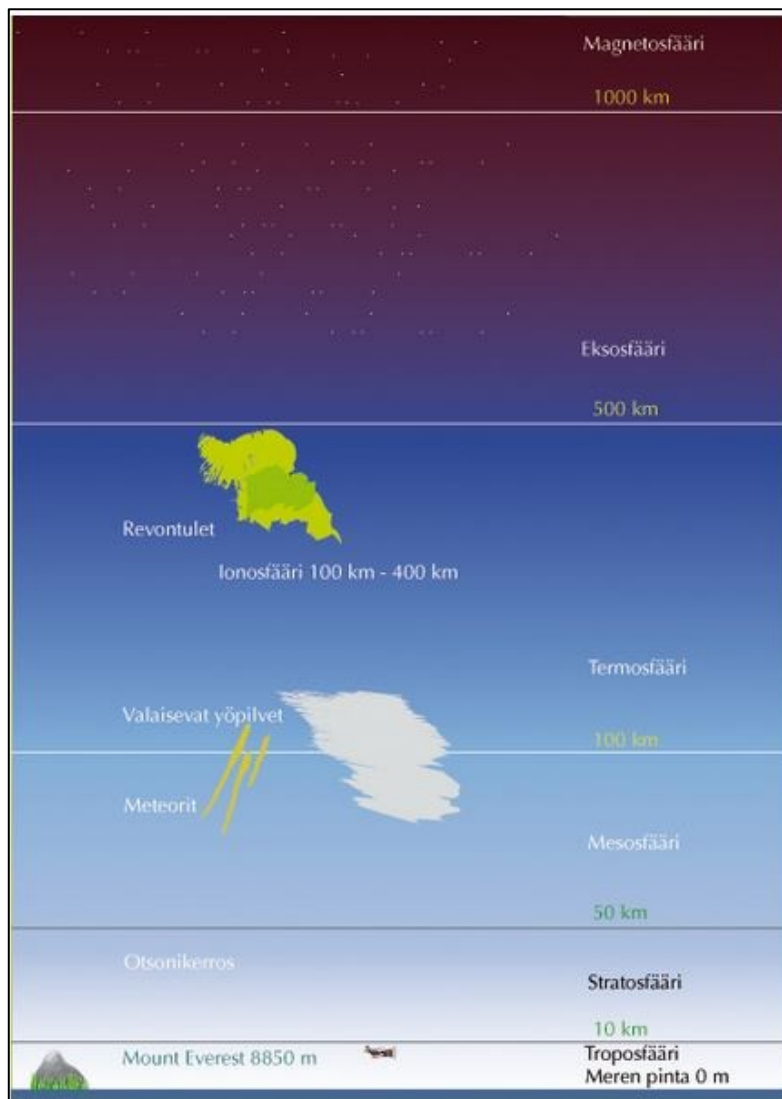
Antennin reaktiivisen lähikentän alueella on vallitsevana ominaisuutena magneettikenttä, toisin kuin dipoli- ja monopoli-antennin tapauksissa, joissa se on sähkökenttä. Magneettinen luuppi on immuuni sähköisille häiriöille, joita voi syntyä lähikentän alueella ja jotka kytkeytyvät edellä mainittuihin kahteen antennityyppiin aiheuttaen muutoksia näiden suorituskykyyn. Lisäksi työssä esimerkkinä ja käytännön testeissä käytetyn luupin säteilykuvioista johtuen kaukaa matalilla kulmilla saapuvat häiriölähteet eivät aiheuta pohjakohinaa vastaanottimessa, kuten tapahtuu dipolin ja monopolin osalta. Matalammat häiriötasot pohjakohinassa tuottavat luupille kyvyn havaita heikompia signaaleja, kuin kahta muuta verrokkina olevaa antennia käytettäessä.

4 HF-TAAJUUSALUE

Radioaallot etenevät taajuusalueella pinta- ja avaruusaaltona. Jälkimmäinen etenemistapa on pääsääntöinen pois lukien lyhyet yhteysvälit muutamasta kilometristä noin 30–50 kilometrin etäisyyksiin Suomen leveysasteilla. Ionosfäärin kautta heijastunut lähete voidaan kuulla vain tietyn matkan päässä lähettimestä, mutta ei yhtään lähempää. Lähetyspisteen ja vastaanottokohdan välistä aluetta kutsutaan tässä yhteydessä katvealueeksi tai kuolleeksi alueeksi (engl. skip zone) ja etäisyyttä lähettimen sekä ionosfääristä palanneen signaalin kohdan välillä kutsutaan hypyn pituudeksi tai hypypituudeksi (engl. skip distance) (ARRL, 2011, s. 4-21).

Signaali voidaan usein kuulla osittain myös katvealueella siroamisen monista tavoista johtuen, mutta se on tyypillisesti hyvin vähäinen voimakkuudeltaan. Hypyn pituuden ollessa lyhyt saattaa muodostua tilanne, jossa molempien etenemistapojen välittämät signaalit ovat vastaanotettavissa lyhyellä etäisyydellä lähettimestä. Näissä tapauksissa avaruusaallon signaali on usein voimakkaampi kuin pinta-aallon, koska suotuisissa olosuhteissa ionosfääri on tehokkaampi siirtotapa kuin paljon vaimennusta aiheuttava maan pinta. (ARRL, 2011, s. 4-21.)

Joidenkin olosuhteiden vallitessa on lähettimen ja vastaanottimen välille mahdollista luoda jopa 4–5 hypyn yhteysväli. Yleensä normaali hyppyjen määrä on kuitenkin kaksi tai kolme, joiden tuloksena on saavutettavissa tuhansien kilometrien yhteysetaisyys. Signaali vaimenee huomattavasti jokaisella hypyllä kulkiessaan ionosfäärin absorboivien D- ja E-kerrosten läpi. Vaimennus koskee erityisesti matalia taajuuksia päiväsaikaan. Lisäksi ionosfääri sirottaa radioaaltoja useaan suuntaan sen sijaan, että aalto pysyisi tiukassa nipussa. Maan pinnan epätasaisuudet aiheuttavat samanlaista siroamista heijastuspisteessä, josta signaali suuntautuu takaisin kohti ionosfääriä. (ARRL, 2011, s. 4-21).



Kuva 13. Ilmakehän eri kerrokset (Ilmatieteenlaitos, n.d.).

Saavutettavan yhteysvälin hypyn pituus riippuu erittäin paljon antennista lähtevän aallon elevaatiokulmasta, jonka ohella ionosfäärin kerrosten korkeus tietyllä ajan hetkellä vaikuttaa olennaisesti hyppypituuteen. Elevaatiokulmaa nimitetään myös lähtö-, laukaisu- ja aaltokulmaksi. Kerrosten korkeus on monimutkainen yhtälö auringon, ionosfäärin tilan ja maan magneettikentän välillä. Yhteysetäisyyksillä voi olla suurta vaihtelua eri aikoina riippuen E- ja F-kerrosten korkeudesta. Suurin hypyn pituus E-kerroksen kautta on teoreettisesti noin 2000 kilometriä tai toisin sanoen noin puolet F2-kerroksen kautta toteutuvasta maksimietäisyydestä. (ARRL, 2011, s. 4-32.)

Taulukko 3. Esimerkki tavoiteltavista yhteysetäisyyksistä ja vaadituista lähtökulmista.

Etäisyys	Lähtökulma
70 km	80°
120 km	78°
256 km	63°
296 km	60°
560 km	44°
720 km	42°
848 km	30°
1520 km	18°
2400 km	8°

HF-taajuusalueella liikennöiminen on kokonaisuudessaan äärimmäisen monimutkainen ja haastava tehtävä, joka tekee siitä tietysti myös kiehtovaa ja mielenkiintoista. Ionosfäärin tilan muutokset, niiden vaikutus yhteyden muodostumiseen ja radioaaltojen etenemiseen saattavat tapahtua välillä nopeastikin. Tässä yhteydessä puhutaan usein HF-kielistä viitaten säätilojen vaihteluihin, koska taajuusalueen käyttö ja ilmiöt liikennöinnissä muuttuvat edellä mainituilla tavoilla joskus nopeasti kuten säätilatkin.

4.1 Aurinko

Auringon magneettikentän vaihteluista aiheutuvat aktiivisuusilmiöt vaikuttavat Maan ilmakehään ja erityisesti ionosfääriin muuttaen sen tilaa tavalla tavalla. Ionosfääri koostuu kerroksista, joilla on erilaiset ominaisuudet suhteessa maan magneettikentän ja auringon vaikutuksiin. Pääasiassa auringon aiheuttama ultraviolettisäteily saa kerrokset varautumaan sähköisesti, mikä on edellytys HF-taajuusalueen radioaaltojen taipumiselle. (ARRL, 2011, s. 4-12.)

Auringon pinnalla on aktiivisia alueita, jotka toimivat ultraviolettisäteilyn lähteinä. Alueita kutsutaan auringonpilkuiksi ja niiden määrä vaihtelee keskiarvoisesti 11 vuoden jaksoissa. Yli 300 vuotta pitkällä seuranta-ajalla jaksojen pituus on vaihdellut 9–13 vuoden välillä. Aika tämän jakson sisällä jakaantuu siten, että kasvu auringonpilkkuminimistä kohti maksimiarvoa on neljästä viiteen vuotta ja tämän jälkeen lasku kohti minimiä kestää noin 6–7 vuotta. (Perkiömäki, 2006.)

Ionisaation mekanismi perustuu auringosta saapuvan fotonin törmäämiseen perustilassa olevaan atomiin. Törmäyksessä atomista irtoaa elektroni, jolloin se muuttuu positiiviseksi ioniksi. Erilaiset voimat aiheuttavat edelleen elektronien ja ionien törmäyksiä, jolloin ne palautuvat takaisin perustilaan neutraaleiksi atomeiksi. Tätä palautumista kutsutaan rekombinaatioksi. Ionisaation ja rekombinaation vaikutuksesta aiheutuu ionosfäärin jatkuva liiketila, jossa sen sähköiset ominaisuudet ovat samoin jatkuvan muutoksen alla. (Perkiömäki, 2006.)

4.2 Ionosfääri

Ionosfäärin tila vaihtelee säännöllisesti monien ilmiöiden vaikutuksesta. Vuorokauden aika vaikuttaa esimerkiksi alimpiin D- ja E-kerroksiin saaden ensimmäisen katoamaan kokonaan ja jälkimmäisen heikentymään merkittävästi auringon laskun jälkeen. Vuodenajan mukaiset vaihtelut ilmenevät muun muassa F₂-kerroksen korkeuden vaihteluna kesällä ja talvella. Eroavaisuudet maantieteellisestä sijainnista johtuen vaikuttavat käytettävissä oleviin taajuuksiin. Ionisaatio on voimakkainta päiväntasaajan alueella, mikä mahdollistaa korkeampien taajuuksien käyttämisen. Auringon 27 päivän pyörähdysjakso vaikuttaa auringonpilkkujen esiintymiseen ja pilkut aiheuttavat edelleen muutoksia ionosfäärin pitkän ajan toimintaan. (Perkiömäki, 2006.)

Ionosfäärin alin D-kerros (60–90 km) esiintyy vain päivällä ja sen hiukkastiheys on suuri. Pitkien aallonpituuksien taajuudet (< 3,5 MHz) kärsivät tässä kerroksessa suurimmasta vaimennuksesta etenkin niiden aaltojen osalta, jotka saapuvat kerrokseen matalalla kulmalla. Auringon 11-vuoden jakson pilkkumaksimien aikaan myös sellaiset aallot matalilla taajuuksilla (< 7 MHz), jotka saapuvat kerrokseen jyrkillä kulmilla, kärsivät lähes totaalista energian sulautumisesta keskipäivällä. Auringon laskiessa ionisaatio loppuu tällä korkeudella ja kerros häviää voimakkaan rekombinaation vaikutuksesta. (ARRL, 2011, s. 4-17.)

Signaalin vaimennus on suhteessa taajuuteen. Suuremmat taajuudet vaimenevat vähemmän D-kerroksessa ja voidaan todeta, että vaimennus on vähäinen 7 MHz:n, lievä 14 MHz:n ja merkityksetön ylemmillä taajuuksilla. Kerros on tehon taivuttamaan HF-aaltoja takaisin maahan, joten sen rooli pitkillä yhteysetäisyyksillä on negatiivinen. Tästä syystä alle 7 MHz:n taajuudet ovat päivällä hyödyllisiä lähinnä lyhyille etäisyyksille pinta-aaltoyhteyksiin. (ARRL, 2011, s. 4-17.)

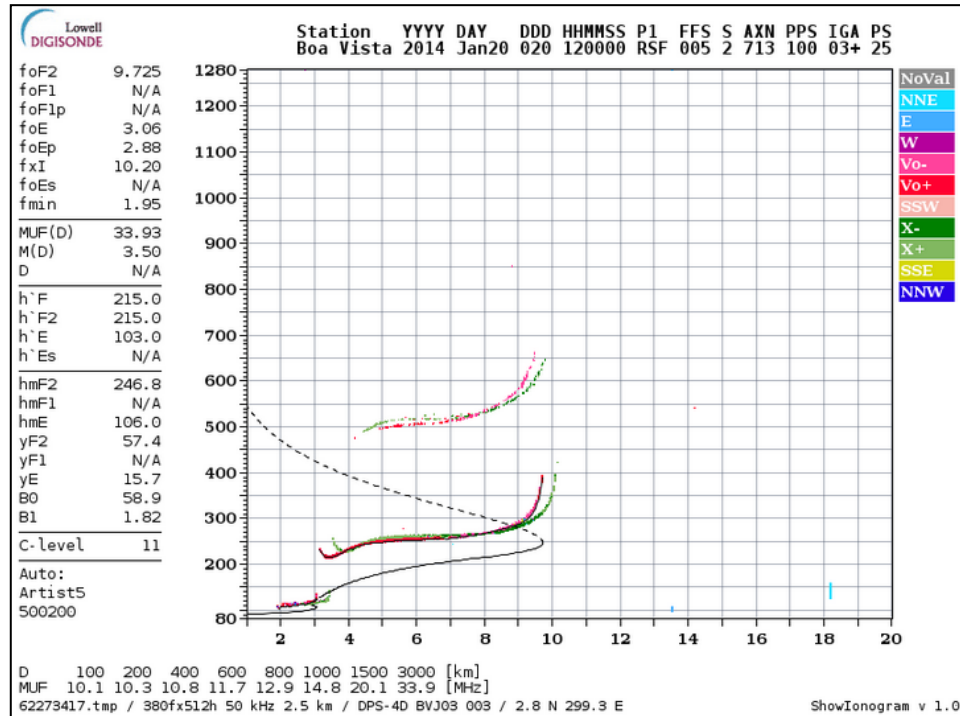
E-kerros (100–115 km) on ionosfäärin alin hyödyllinen kerros avaruusaaltoyhteyksiin sen kyetessä taivuttamaan aaltoja takaisin maahan päin. Ionisoituminen tällä korkeudella tapahtuu röntgen-, ultravioletti- ja kosmisen säteilyn vaikutuksesta. Ionisoituminen alkaa auringon noustessa ja heikenee huomattavasti auringon laskun jälkeen. E-kerros absorboi energiaa edellisen tapaan päivällä matalien taajuuksien osalta. (ARRL, 2011, s. 4-17.)

F-kerros on suurin mahdollistaja pitkien matkojen yhteyksissä ja siten HF-taajuusalueen tärkein kerros, koska suurin osa liikenteestä kulkee tämän

kerroksen kautta. F-kerroksen korkeus voi olla 160–500 km riippuen vuorokauden ja vuoden ajasta, maantieteellisestä sijainnista sekä auringon pitkän ja lyhyen ajan vaihteluista. Auringon lyhyen ajan vaihtelut viime minuuteista kolmeen vuorokauteen vaikuttavat kerroksen ominaisuuksiin välittää radioaaltoja. Ionisaatio on voimakasta tässä kerroksessa toimien myös pimeällä ja tällä korkeudella ilmakehän pienestä tiheydestä johtuen rekombinaatio on suhteellisen hidasta. (ARRL, 2011, s. 4-17.)

Kesäpäivinä kerros voi jakaantua kahdeksi osaksi, joista alempi ja heikompi F_1 -kerros on pienemmässä roolissa radioaaltojen vaikutuksen suhteen käyttäytyen samaan tapaan kuten E-kerros. Yöllä ionisaation laskiessa F_1 -kerros häviää eli kerrokset yhdistyvät. Auringon pilkkujen maksimin aikana F-kerroksen ionisaatio on korkea ja se mahdollistaa yhteydet ylempillä taajuuksilla (21–28 MHz) paremmin. Syklin ollessa pilkkuminimissä korkeammat taajuudet eivät taivu tehokkaasti ja ne läpäisevät kerroksen kulkeutuen avaruuteen. Pilkkuminimin aikana koko ionosfäärin tila on vakaampi ja vaimeneminen alemmissä kerroksissa on vähäisempää, jolloin yhteydet matalillakin < 5 MHz:n taajuuksilla paranevat. (ARRL, 2011, s. 4-17.)

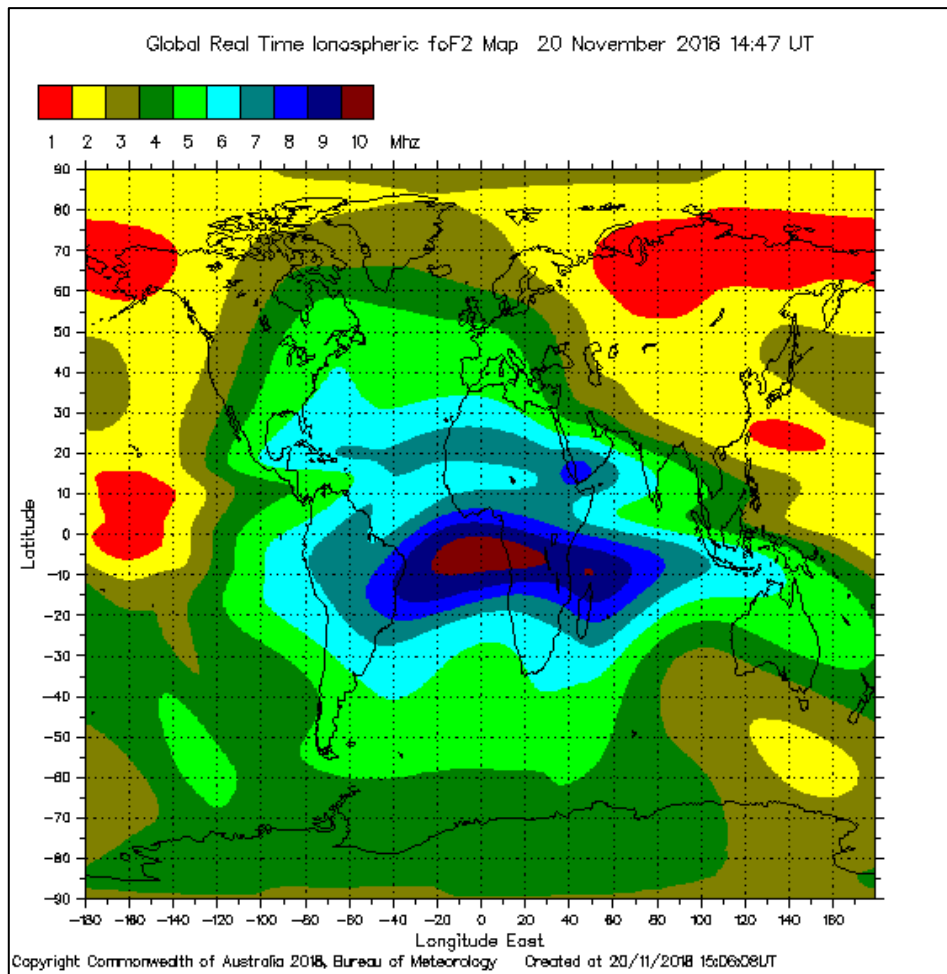
Ionosfääriluotauksilla tutkitaan eri kerrosten korkeutta ja elektronitiheyttä. Pystyluotauksilla saadaan selville kriittinen taajuus, eli korkein taajuus jolla kerros kykenee heijastamaan pystysuoraan ylöspäin lähetetyn signaalin takaisin kohti maata. Kriittinen taajuus ilmoitetaan merkinnällä f_o ja sen lisämääreenä kerroksen kirjain, esimerkiksi f_oE tai f_oF_1 . (Perkiömäki, 2006.)



Kuva 14. Esimerkki ionosfääriluotauksesta (Ionospheric Sounder Station Link List, n.d.).

Kuvassa on esitetty luotaustieto Boa Vistan asemalta Etelä-Amerikassa. Luotauksien ulkoasu ja informaation määrä vaihtelee hieman riippuen

asemasta, joka suoritteen on toteuttanut. Keskeiset HF-liikennöintiin vaikuttavat tiedot on saatavissa raporteista ymmärtämällä aiheeseen liittyvät perusteet ja käsitteet. Luotaustietoja on käytettävissä erittäin laajasti eri osista maailmaa pois lukien suurten valtamerten alueet, joilla ei ole saaria.



Kuva 15. Maailmanlaajuinen F₂-kerroksen kriittinen taajuus (Australian Government, n.d.).

Ionosfääriluotauksien tietoja on kerätty myös maailmanlaajuisiksi f_oF₂-kartoiksi, joissa esitetään ionosfäärin kokonaistila halutulla ajanhetkellä helpottamaan käytettävien taajuuksien suunnittelua kulloiseenkin liikennöintitarkoitukseen sopivaksi. Huomioitavaa on, että näissä esityksissä ilmoitetaan vain ylimmän F₂-kerroksen kriittinen taajuus likiarvona.

Radioaaltojen taajuuden laskiessa vaimennus kasvaa ja aallot heijastuvat matalammalta. Pienin heijastuskorkeus ja vaimennus määrittävät käytettävissä olevan taajuuden alarajan (LUF). Ionosfäärin alimpien kerrosten vaimentava vaikutus on merkittävän riippuvainen radioaallon taajuudesta, joten mahdollisimman korkea taajuutta on tarkoituksenmukaista käyttää. Käytettävissä olevan korkeimman taajuuden (MUF) määrittää ionosfääriluotausten tuottamat kriittiset taajuudet. Lähellä MUF-arvoa operoitaessa on vaarana, että vähäisetkin ionosfäärin epähomogeenisuudet aiheuttavat aallon karkaamisen avaruuteen. Parhaaksi liikennöintitaajuudeksi esitetään

useissa tapauksissa $0,85 \cdot \text{MUF}$, joka perustuu hyväksi havaittuun käytäntöön. (Kosola & Solante, 2013, s. 74.)

Ukkosmyrskyt aiheuttavat häiriöitä, joita ionosfääri heijastaa erityisesti alle 30 MHz:n taajuuksilla. Tällaiset luonnonilmiöistä johtuvat häiriöt kulkeutuvat pitkienkin matkojen päästä matalilla säteilykulmilla ja pääsevät kytkeytymään antenniin aiheuttaen taustakohinaa etenkin auringon laskun jälkeen, kun D-kerros ei ole vaimentamassa niitä pois. Tässä yhteydessä D-kerroksen vaikutuksesta on siis hyötyäkin HF-taajuusalueella. (Ilmatieteenlaitos, n.d.)

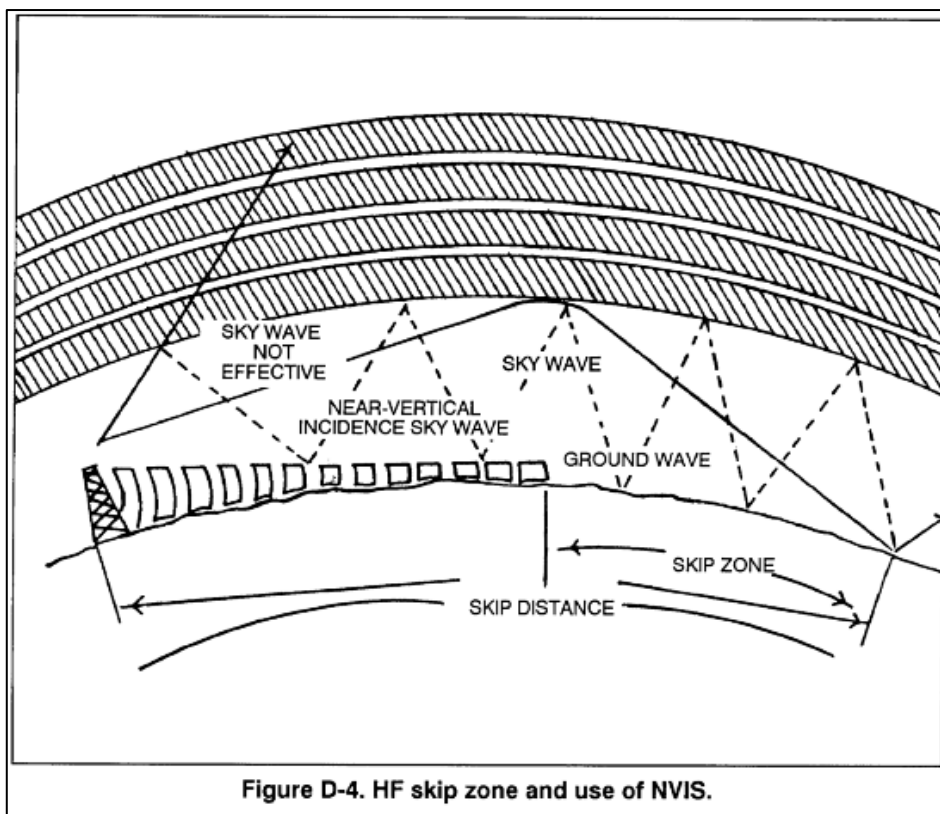
Pohjoisen Euroopan leveyspiireillä esiintyy ionosfäärissä myös revontulia auringonpilkkujen aiheuttamina. Revontulien vaikutukset koskevat HF-taajuusaluetta aiheuttaen sen käyttöön poikkeavuuksia ionosfäärin tilan ja ominaisuuksien muuttuessa revontulien esiintymisaikaan, joka on suurimmillaan maaliskuusta syyskuuhun. (Ilmatieteenlaitos, n.d.)

4.3 NVIS Near vertical incidence skywave

Pinta-aaltoetenemisen vaimennuttua havaitsemattomaksi ja ensimmäisen avaruusaaltoyhteyden vastaanottokohdan väliin jää useissa yleisesti käytössä olevien antennien tapauksissa yhteydetön katvealue. NVIS-eteneminen perustuu signaalin lähettämiseen antennista jyrkällä kulmalla kohti ionosfääriä, jolloin heijastuminen takaisin maahan tapahtuu myös jyrkällä kulmalla lähempänä lähetuspistettä. NVIS-antennia käyttämällä on väistettävissä katvealueen ja matalan kulmien avaruusaaltojen tuottamat yhteysongelmat tiettyyn etäisyyteen asti.

NVIS-etenemistavalla voidaan saavuttaa antennista riippuen ympärisäteilevät ja katveettomat yhteydet 0–500 kilometrin etäisyyksillä. Korkealla laukaisukulmalla lähetetyn signaalin taajuuden tulee olla alle F-kerroksen kriittisen taajuuden, jotta ionosfääri kykenee taivuttamaan aallon takaisin maahan. Päivällä käytettävä taajuus voi olla edellisissä luvuissa määritetyin perustein 5–15 MHz:ä ja auringonlaskun jälkeen 3–5 MHz:n välillä juuri ennen auringonnousua. (ARRL, 2011, s. 14-14.)

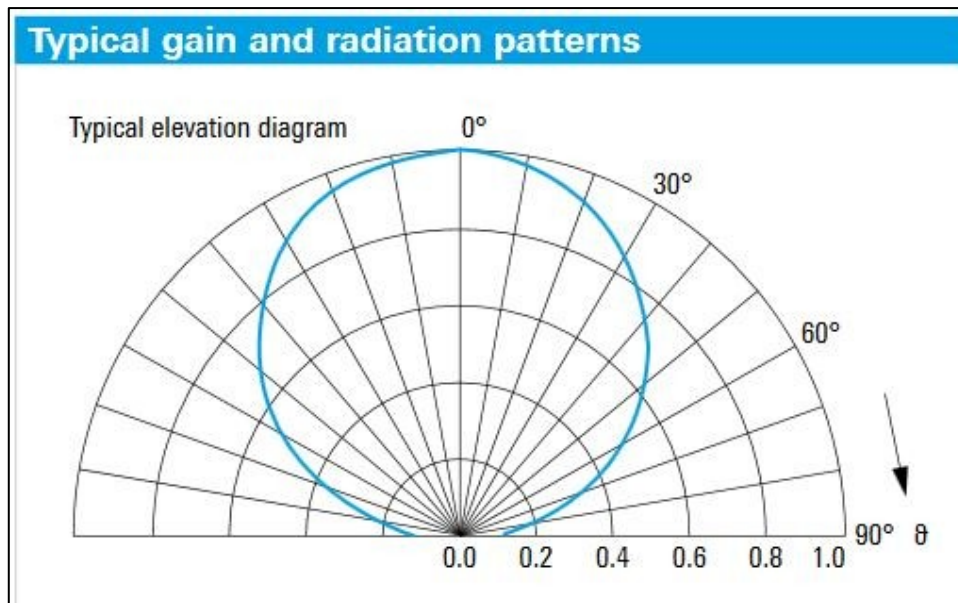
Opinnäytetyössä vertailun kohteena olevien antennien säteilykuvioita tarkastelemalla (luku 3), on nähtävissä antennien kyky toimia korkeilla kulmilla lähellä 90 astetta. Piiska-antenni on käytännössä kyvytön säteilemään korkeammilla kulmilla ja lanka-antennin osalta tähän kykenee vain käänteiseen V-asentoon toteutettu muunnos dipolista.



Kuva 16. NVIS-etenemistavan periaate (US Army, n.d.).

Käytettävien taajuuksien osalta erityisesti 40, 60 ja 80 metrin signaalit ovat sellaisia, joilla saavutetaan kohtuullinen heijastus ionosfäärissä myös jyrkillä säteilykulmilla. Edellä mainittuja aallonpituuksia vastaavat taajuudet ovat 7,5 MHz:ä, 5 MHz:ä ja 3,5 MHz:ä. Suorituskykyinen NVIS-liikennöinti kattavalla alueella on mahdollista toteuttaa tyypillisellä HF-radioiden 100 watin lähetysteholla. Joissakin tapauksissa lisätehoa saataan tarvitta päivällä D-kerroksen vaimennuksesta johtuen. NVIS-etenemistavalla radioaalto kulkee useamman kerran vaimentavan kerroksen läpi, mutta matka kerroksessa on mahdollisimman lyhyt johtuen lähes vertikaalisesta säteilyn suunnasta. (ARRL, 2011, s. 14-15.)

Kriittisin tekijä NVIS-tapauksessa on antenni, joka mahdollistaa säteilyn sekä vastaanoton hyvällä vahvistuksella korkeammille kulmille. Hyvän NVIS-antennin säteilykuvio vertikaalitasossa muistuttaa ilmapalloa, jonka täyttöaukko on maata kohti. Antennin säteilykuvio voi olla esimerkiksi 100 astetta keskikohdan ollessa kohtisuoraan ylöspäin, eli 50 astetta kaikkiin suuntiin sivuille. Tässä tapauksessa antenni ei säteile ja vastaanota lähetitteitä alle 40 asteen kulmilla, jolloin myös kaukaa matalilla kulmilla saapuvat luonnon tai ihmisen aiheuttamat häiriöt eivät aiheuta pohjakohinaa antennissa ja vastaanottimessa. (ARRL, 2011, s. 14-16.)



Kuva 17. Esimerkki NVIS-antennin vertikaalisesta säteilykuvioista (Rohde & Schwarz, n.d.).

Kuvassa on korkeuskulmaa ilmaiseva asteikko merkitty erisuuntaiseksi kuin yleisesti. Dipoli- ja piiska-antennin säteilykuviot eroavat huomattavasti NVIS-antennin kuvioista tehden tässä tapauksessa eri antennien välillä muodostettavan yhteyden erittäin haastavaksi. Tästä NVIS-antennin säteilykuvioista johtuen sen pohjakohinatasot ovat huomattavasti alhaisemmat verrattuna muihin antenneihin, koska useat matalilla kulmilla saapuvat häiriöt jäävät kytkeytymättä antenniin.

5 ANTENNIEN SUORITUSKYKY POHJOISELLA ITÄMERELLÄ

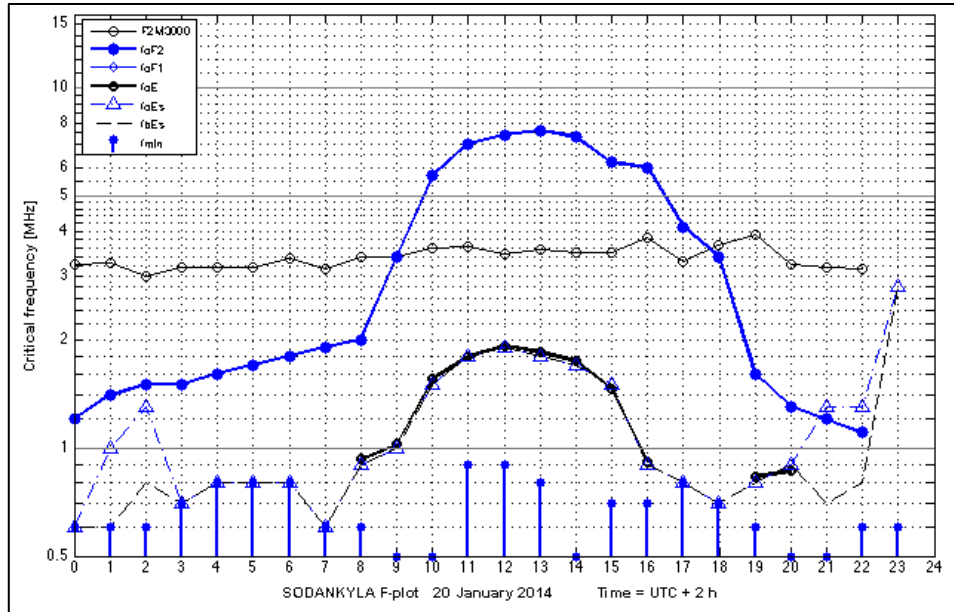
Vertailtavat antennityypit ovat luvun 3 mukaiset lanka-antenni (TFD), piiska-antenni (monopoli) ja luuppiantenni (magneettinen NVIS-kehäantenni). Vertailu suoritetaan antennien ominaisuuksien kesken suhteessa toimintaympäristön olosuhteisiin ja ilmiöihin sekä valittuihin muutamaankäyttötapaukseen.

Aiemmissa luvuissa on käsitelty HF-taajuusalueen pinta- ja avaruusaaltojen etenemiseen vaikuttavia tekijöitä ja ilmiöitä. Radioaalto etenee pidemmälle hyvin johtavan pinnan yläpuolella ja suolainen merivesi on huomattavasti parempi sähkön johde kuin maa. Vertailtaessa merien suolapitoisuuksia voidaan havaita, että suurilla valtamerillä pitoisuuksien ollessa korkeammat myös sähkönjohtavuus on 4–5 kertaa parempi. Tästä johtuen Suomessa ei merelläkään saada pinta-aaltoyhteyksiä muodostettua niin pitkälle kuin se useissa lähteissä ilmoitetaan. Käytännön kokemusten kautta on havaittu, että saavutettavat pinta-aaltoyhteydet ovat taajuudesta riippuen arviolta noin 50–70 kilometriä.

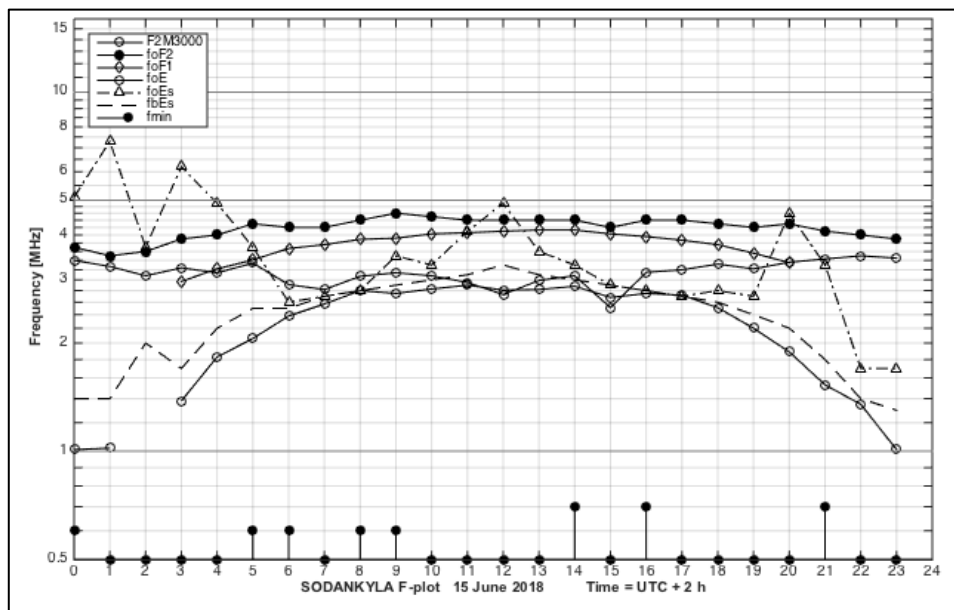
Suomen merialueilla on lisäksi paljon saaria, joista aiheutuu vaimennusta radioaaltoihin, kun sähkönjohtavuus muuttuu heikommaksi verrattuna mereen. Mahdollinen jääpeite vaikuttaa edelleen sähkönjohtavuuteen heikentävästi veden olomuodon muuttuessa nestemäisestä kiinteäksi. Talvella

pinta-aaltoetenemisen kautta muodostettavat yhteydet kärsivät huomattavasta vaimennuksesta mikäli toimitaan jäisellä merialueella.

Ionosfäärin eroavaisuuksista maantieteellisestä sijainnista johtuen Itämeren alueella ei voida käyttää HF-taajuusalueen kaistaa niin tehokkaasti kuin etelässä lähempänä päiväntasaajaa. Ionisaation voimakkuus laskee talvella, jolloin on mahdollista käyttää vain matalampia taajuuksia ilman radioaaltojen karkaamista avaruuteen. Tämä asia vaikuttaa erityisesti NVIS-etenemisessä käytettäviin taajuuksiin signaalien säteilykulmien ollessa jyrkkiä.



Kuva 18. Ionosfääriluotaus Sodankylän mittausasemalta tammikuussa 2014 (University of Oulu n.d.).



Kuva 19. Ionosfääriluotaus Sodankylän mittausasemalta kesäkuussa 2018 (University of Oulu n.d.).

Yllä olevissa kuvissa on esitetty ionosfääriluotaukset Sodankylän observatoriosta tammikuussa 2014 ja kesäkuussa 2018. Meneillään olevan auringonpilkkujen 11 vuoden jakson pilkkumaksimi ajoittui vuodelle 2014, joka selittää korkeammat kriittiset taajuudet tuolloin talvella kuin nyt kuluvan vuoden kesällä.

Luotausten perusteella nähdään, että MUF on ensimmäisessä tapauksessa noussut päivällä lähelle 8 MHz:ä ja pimeään aikaan tippunut alle 2 MHz:iin. E-kerros on esiintynyt vain päivällä kriittisen taajuuden pysyessä todella matalana ja F₁-kerrosta ei ole havaittu lainkaan.

Kuvan 19 mukaan F₂-kerroksen kriittinen taajuus ja siten myös MUF on pysynyt lähes tasaisena ympäri vuorokauden 4–5 MHz:n tuntumassa. E-kerroksen kriittinen taajuus on ollut havaittavissa muuna aikana paitsi keskiyön tunteina ja f_oE on parhaimmillaan ollut päivällä noin 3 MHz:ä. F₁-kerros on esiintynyt samaan aikaan E-kerroksen kanssa ja sen kriittinen taajuus on ollut hieman F₂-kerrosta matalampi.

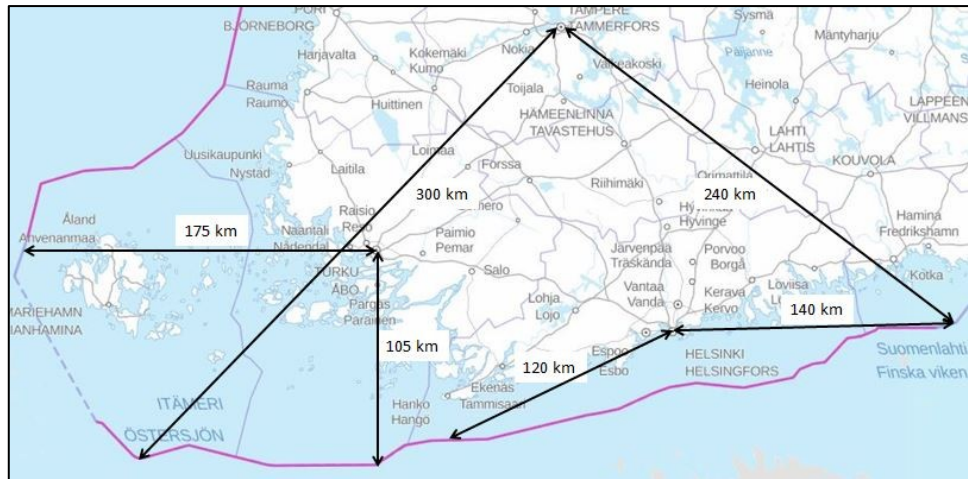
Ionosfäärin kerrokset, niiden korkeudet ja kriittiset taajuudet vaikuttavat saavutettaviin hypyn pituuksiin, käytettävissä oleviin taajuuksiin ja jyrkki- en säteilykulmien käyttömahdollisuuksiin. Tästä johtuen ei voida tehdä yleistävää sääntöä, joka määrittelee esimerkiksi tietyn yhteysetäisyyden saavuttamisen, antennityypin ja käytettävän taajuuden.

Pitkien yhteyksien signaalitasot vaihtelevat käytännössä koko ajan suhteessa vuorokauden aikaan, vuodenaikaan, auringon lyhyen ja pitkän ajan vaihteluihin sen aktiivisuudessa sekä maapallon ja auringon väliseen etäisyyteen. Näyttää siltä, että vain erittäin viisas tai erittäin hölmö yrittää ennustaa radioaaltojen heijastuksia. Yleisesti käytössä olevien simulaatio-työkalujen avulla on kuitenkin mahdollista tehdä niin, edes jonkinlaisella onnistumisen todennäköisyydellä. (ARRL, 2011, s. 4-17.)

5.1 Toimintaympäristö

Tarkastelemalla vaadittavia yhteysetäisyyksiä, taulukon 3 tietoja ja antennien säteilykuvioita voidaan havaita, että matalimmilla lähtökulmilla lähetettäviä keskipitkän ja pitkän kantaman avaruusaaltoyhteyksiä ei Suomen aluevesillä toimittaessa tarvita.

Tyypilliset yhteysetäisyydet ovat rannikko- ja merialueella toimittaessa alle 200 kilometriä ja usein etäisyydet saattavat olla vähemmän kuin 100 kilometriä. Suomenlahden suurin leveys aluevesirajalta Ahvenanmaan eteläpuolelta itäisen aluevesirajan reunaan on noin 450 kilometriä. Pitkät yhteysetäisyydet ja siten matalien kulmien säteilyyn tehokkaasti kykenevät antennit tulevat kyseeseen poikkeustapauksissa, jos tarpeena on liikennöidä johonkin kauas, kuten esimerkiksi Välimerelle. Etäisyys Helsingistä Välimeren keskiosaan on noin 2500 kilometriä.



Kuva 20. Havainnekuva etäisyyksistä toiminta-alueella.

Kuvassa on esitetty muutamia etäisyyksiä Helsingistä, Turusta ja Tampereelta eri kohtiin aluevesirajalle. Kuvan avulla voidaan hahmottaa, minkälaisista etäisyyksistä on kyse toimittaessa Saaristomerellä, Suomenlahdella tai mereltä kauemmaksi maalle ja toisinpäin.

Lyhyemmät muutamien kymmenien kilometrien pinta-aaltoyhteydet ovat toteutettavissa hyvin piiska-antennilla. Antennin ongelmaksi muodostuu kuitenkin kuollut alue pinta-aallon vaimennuttua olemattomiin. Huomioiden antennin kyky säteillä korkeammilla kulmilla taajuudesta riippuen, piiska-antennilla saattaa olla saavutettavissa välttävän tasoinen avaruusaaltoyhteys tämän alueen suurimmilla etäisyyksillä. Yhteyden laatu ei kuitenkaan todennäköisesti ole korkea.

Lanka-antennin suorituskyky muodostuu piiskaa paremmaksi, mikäli sen asennustapa on toteutettu korkeampia avaruusaaltokulmia suosivaksi. Antenni toimii tällöin NVIS-antennin tapaan, mutta kykenee säteilemään myös pinta-aaltoyhteyden vaatimilla lähtökulmilla. Antennin fyysinen koko ja asennustapa rajoittavat kuitenkin merkittävästi sen käyttömahdollisuuksia.

Luuppiantennin osalta toiminta-alueen koko ja tyypilliset yhteysetäisyydet ovat sellaisia, että yhteyden muodostuminen on todennäköisintä useimmissa tapauksissa edellyttäen, että vasta-aseman antenni on myös kykenevä operoimaan jyrkillä säteilykulmilla. Luupin heikkoutena voidaan pitää huonoa säteilykuviota pinta-aaltoyhteyksien mahdollistamilla kulmilla, joille esiintyy lyhyillä etäisyyksillä tarvetta. Toinen ongelma antennin kohdalla on ionosfääristä johtuvat Suomessa käytettävissä olevat NVIS-taajuudet, jotka ovat selkeästi matalampia verrattuna teoreettisiin taajuuksiin tämän etenemistavan osalta.



Kuva 21. Esimerkki luuppiantennin ja kahden piiska-antennin peittoalueista sekä katvealueista.

Kuvassa 21 on esitetty kahden piiska-antennin pinta-aaltokantama ja näiden ympärillä katvealue. Iso ympyrä kuvaa NVIS-antennin peittoaluetta 300 kilometrin olettamana. Piiska-antennien pinta-aaltokantama on esitetty 60 kilometriksi ja katvealue näiden ympärillä 60–100 kilometriä. Katvealueet esittävät sen alueen laajuutta, jolle ei tässä esimerkissä saada muodostetuksi yhteyttä ympyrän keskellä olevasta lähettimestä.

Erialaisten antennien säteilyominaisuuksien yhteensopivuus saattaa aiheuttaa haasteita kokonaisuudelle. Tiettyyn tarkoitukseen ja kohteeseen valittu antenni ei välttämättä tue yhteistoimintaa jonkin muun aseman omilla perusteilla valitun antennin kanssa. Pinta-aaltoetenemisen suhteen antennin polarisaatiolla on lähes ratkaiseva merkitys. Mikäli polarisaatiot ovat erilaiset, radioaallon vastaanottotaso on heikko tai sitä ei vastaanoteta lainkaan.

Avaruusaallon tapauksessa polarisaatiolla ei ole merkitystä, mutta säteilykuvion kannalta antennien eroavaisuudet ovat tässä tapauksessa ratkaisevassa asemassa. Luupin säteilyssä jyrkillä lähtökulmilla, radioaallon vastaanotto piiskalla ja lanka-antennilla ei ole erityisen tehokasta korkealta saapuvien lähettiläiden suhteen. Sama asia toimii heikosti myös toiseen suuntaan pois lukien lanka-antennin käänteisen V-toteutuksen osalta.

5.2 Käyttötapausten määrittämä antennitoteutus

Antennin valitseminen kuhunkin toimintaan on tehtävä suurella harkinnalla suorituskyvyn näkökulmasta, huomioiden rajoitukset. Rajoitteet eivät voi olla prioriteetti ja lopullista toteutusta määrittävä tekijä. Lähtökohta suunnittelulle tulisi olla vaadittava suorituskky suhteutettuna toiminta-alueeseen ja tyypilliseen toimintaan, jonka kautta ilmenee vaadittavat yhteystarpeet sekä tätä tukevat tekniikat.

Mekaaniset ominaisuudet rajoittavat usein käytettäväksi soveltuvia antennityyppejä. Kaikkia vertailun kohteena olevia antennia on mahdollista käyttää tukiasemakäytössä, jossa tilaa voidaan olettaa olevan paljon. Liikkuvalla asemalla käytettävissä olevat antennit ovat piiska ja luuppi, mutta ei lanka-antenni. Poikkeuksena on sellainen maalla liikkuva asema, jonka yhteyteen voidaan pystyttää erillinen masto.

Tukiasemien tehtävänä on luoda kyky verkkoihin ja järjestelmiin liittymiseksi liikkuvien asemien tarpeisiin. Mikäli liittyvillä asemilla on jonkun tietyn ominaisuuden perusteella valittuja antennia käytössä, on samanlaisia tai samat ominaisuudet omaavia antennia oltava myös tukiasemilla.

Mantereella kauempanakin olevat antennit toimivat hyvin tukiasemakäytössä ja suhteellisen vähäisellä määrällä maantieteellisesti hajautettuna voidaan luoda kohtuullisen kattava järjestelmä koko toiminta-alueen yhteyksien saavuttamiseksi avaruusaaltoetenemisen kautta. Tähän tarkoitukseen lanka-antenni on sopiva toteutus laajan 3–30 MHz:n taajuuskaistansa vuoksi, jos voidaan hyväksyä säteiltävän tehon lasku joillakin taajuuksilla. Näillä yhteysetäisyyksillä tehon lasku ei ole merkittävässä asemassa. Eri-laisia antennia käyttämällä voidaan parantaa yhteensopivuutta vasta-
asemien kanssa ja saavutetaan variaatioita käytettäviin säteilykuvioihin.

Tavoiteltaessa liikkuvien asemien välisiä yhteyksiä tilanne hankaloituu käytettävien antennien osalta. Joissakin tapauksissa saatetaan olla hyvin-kin lähellä vasta-asemaa ja toisaalta samaan aikaan sellaisella etäisyydellä toiseen asemaan, joka on esimerkiksi piiska-antennin osalta katvealueella.

Yhteydet liikkuvien asemien välillä saattavat muodostua haastaviksi erityisesti tapauksissa, joissa ei tiedetä vasta-aseman suuntaa ja etäisyyttä. Päätöstä taajuudesta ja valintaa mahdollisesti useamman käytettävissä olevan antennin välillä on vaikea tehdä ilman tietoa halutusta yhteysetäisyydestä. Tämän tyyppisiin ongelmiin on apua automaattisesta linkinmuodostusprosessista, joka ei kuitenkaan tee antennivalintaa käyttäjän puolesta.

Liikkuvia asemia koskee myös antennien mahdolliset nollakohdat horisontaalisessa säteilykuviossa tai rajoitteet rakennelmien aiheuttamista sähköisistä häiriöistä säteilykuvioissa. Joissakin tilanteissa saattaa olla niin, että yhteyttä ei saada luotua johtuen omasta asennosta tai suunnasta vasta-
aseman suhteen.

Toimittaessa lyhyillä etäisyyksillä piiska-antenni on yksinkertaisuuden ja helpon asennuksen johdosta erittäin hyvä ratkaisu siinä tapauksessa, että

antennille on tuotettavissa hyvä maataso. Piiskalla voidaan toteuttaa myös tilapäisiä asemia hyvinkin nopeasti.

Luuppiantenni kykenee toimimaan kaikissa tapauksissa ja voidaan asentaa lähes jokaiseen kohteeseen, jos jätetään huomioimatta henkilön mukana kuljetettavat ratkaisut. Entistä paremman toimintavarmuuden takaamiseksi kaikissa tilanteissa, luuppiantennien tulisi mahdollistaa myös pinta-aaltoyhteyksien käytön.

Antennin lisäksi kokonaisuuden suorituskykyyn vaikuttaa myös järjestelmä, jolla antennia käytetään. Esimerkiksi käytettävän taajuuden, lähtökulmien ja vasta-asemien etäisyyksien kannalta ainoa toimiva sekä tehokas käyttötapa on järjestelmä, joka muodostaa yhteyden automaattisesti ennalta asetettujen taajuuksien perusteella (ALE). Tällä tavalla toteutettuna tekniikka voi huomattavasti auttaa järjestelmän tehokasta käyttöä ja yhteyden muodostaminen on helpompaa sekä nopeampaa.

5.3 Kehittyneet radiojärjestelmät

HF-taajuusalueella toimivat radiojärjestelmät ovat satelliittien ohella ainoa menetelmä, jolla saavutetaan pitkien matkojen yhteyksiä. Yhteysetäisyydet sekä peittoalueet vastaavat hyvin käyttötärpeelle asetettuja vaatimuksia. Nykyään yleisesti käytössä olevat HF-järjestelmät perustuvat aaltomuotoihin, jotka on kehitetty analogiseen tiedonsiirtoon kuten sähkötyös tai puhe. Taajuusalueen järjestelmien ongelmana on heikohko tiedonsiirtokapasiteetti ja häirinnän sieto. (Tiivistelmäraportti, 2011.)

Ohjelmistoradiossa on perinteisen elektronisiin piireihin perustuvaan radioon verrattuna toteutettu taajuuden muodostus, signaalin suodatus ja muut toiminnot ohjelmistollisesti. Radiosignaali muodostetaan digitaalisesti signaalin käsittelyllä ja täydellisessä ohjelmistoradiossa myös vastaanotettu signaali muunnetaan suoraan radiotaajuisesta aallosta digitaaliseksi. Myös muut komponentit, kuten vahvistimet ja impedanssisovittimet ovat ohjelmoitavissa. (Kosola & Solante, 2013, s. 149.)

Ohjelmistollisesti muutettavat radion ominaisuudet (mm. siirtokapasiteetti, kaistanleveys ja modulaatio) ilman laitteiston muokkauksia ovat joustavia. Useat radioon ohjelmoidut erilaiset toiminnallisuudet mahdollistavat sen monipuolisen käytön erilaisiin käyttötärkoituksiin. Uudet toiminnot voidaan ottaa käyttöön suoraan radiosta, lataamalla ne ulkoisesta muistista tai siirtää radiolähetteen mukana. Radio kykenee tällä tavalla toimimaan samanaikaisesti usealla aaltoalueella ja monessa eri järjestelmässä. (Kosola & Solante, 2013, s. 150.)

Ohjelmistoradio mahdollistaa myös sitä ympäröivän signaaliympäristön laajan havainnoinnin ja oppimisen eli kognitiivisuuden. Tällä voidaan tuottaa signaaliympäristöön ja tiedonsiirtotarpeeseen perustuva aaltomuodon asettelu kulloiseenkin käyttötärkoitukseen sopivaksi. Toiminnolla saavutetaan automaattiset sovitukset esimerkiksi tiedustelua vastaan tai parannetaan toimintavarmuutta häiriöllisessä ympäristössä. (Kosola & Solante, 2013, s. 151.)

Ohjelmistoradioteknologia ei yksinään paranna koko suorituskykyä ja voidaan edelleen sanoa, että radiojärjestelmän yhden tärkeimmän osan muodostaa antenni. Ohjelmistoradiot kuitenkin asettavat antennit entistä suurempien suorituskykyvaatimusten kohteeksi.

6 KÄYTÄNNÖN TESTIT

Kenttätestauksen tarkoituksena oli mitata vakioidulla ja toistettavalla menetelmällä kahden eri antennin käyttäytymistä yhteysvälin muuttuessa. Valitut säteilijät olivat piiska-antenni (monopoli) ja NVIS-antenni (magneettinen kehäantenni). Testaus suoritettiin yhden päivän aikana pois lukien ensimmäinen testi suurimmalla yhteysvälillä, joka toteutettiin varsinaista testipäivää edeltävänä iltana.

Mittauspaikkoja määritettiin kymmenen kappaletta yhteysvälin pituuden laskiessa 350 kilometristä 25 kilometriin, aluksi 50 km:n ja lopuksi 25 km:n välein. Erillisenä testinä suoritettiin antennien välinen pohjakohtinasomittaus erittäin häiriölliseksi arvioidulla alueella, joka oli sähköverkkoyhtiön muuntoaseman läheisyydessä.

Testaustapahtuman valmisteluna jouduttiin käyttämään jonkin verran aikaa dokumentoimattomien testien suorittamiseen, koska kehäantenni ja siihen liittyvä viritin sekä näiden toiminta olivat entuudestaan tuntemattomia. Alustavan testin avulla pyrittiin löytämään sellaiset taajuudet käyttöön varsinaisiin mittaustapahtumiin, joilla antennit menevät vireeseen ja kirjattavia tuloksia saavutettaisiin. Valmisteluista huolimatta joissakin mittauspisteissä kehäantenni ei kuitenkaan virittänyt alimmalla testaustajuu- della ja näiltä osin tulokset jäivät myös saamatta. Lisäksi näiden mittaustapahtumien kokonaisuutta ja tulosten absoluuttisia arvoja vertailtaessa saattaa aiheutua vääristymää, jos jätetään huomioimatta edellä mainittu asia.

6.1 Testijärjestelyt ja mittausmenetelmä

Testilaitteet (antennit ja radiot) valmisteltiin kiinteänä asemana toimineeseen konttiin sekä liikkuvana asemana toteutettuun kevytkuorma-autoon. Kontin osalta testaus suoritettiin kokonaisuudessaan samasta paikasta ilman muutoksia ja sijoituspaikka oli verrattain häiriöllinen kaupunki-/teollisuusympäristö. Liikkuvan aseman paikka pyrittiin löytämään kulloinkin saavutettavaksi määritetyn yhteysetäisyyden kohdalta ja mahdollisimman häiriöttömäksi oletetulta alueelta, kuten pelto- tai metsäaukeat. Testauksen yleisjärjestelyt ja periaate on kuvattu liitteessä 2.

Kenttätesti toteutettiin yhdellä radiolla ja kahdella antennilla molemmissa alustoissa. Testattavaksi haluttu antenni oli valittavissa radion perään kääntökytkimellä, ilman että antennikaapeleita tarvitsi välillä irrottaa. Mittattava signaali määriteltiin yksinkertaisuutensa ja varmuutensa takia CW-moduloiduksi lähetteeksi ja lähetystehoksi päätettiin 100W. CW-modulaatioissa katkotaan radiolähetteen kantoaaltoa ja tämä suoritettiin käytännössä radion omalla mikrofonilla.

Aiemmin mainituilla kymmenellä mittauspaikalla testattiin aina molemmat antennit kumpaankin suuntaan kuudella eri taajuudella. Kaikilla kuudella taajuudella, molemmilla antennilla ja molempiin suuntiin suoritettujen mittaukset toteutettiin kolme kertaa. Tulokset kaikista tapahtumista kirjattiin ylös kummassakin testiasemassa (kontti ja auto). Käytössä olleessa radiossa on sisäänrakennettuna ominaisuutena signaalitasomittari, jota käytettiin mitattavien arvojen määrittämisessä ja näin ollen ulkoisille/erillisille mittalaitteille ei ollut tarvetta.

Testipöytäkirjaan kirjattavaksi arvoiksi määritettiin radion näytöltä suoraan luettavissa olevat vastaanotetun signaalin taso ($\text{dB}\mu\text{V}$) ja pohjakohinataso ($\text{dB}\mu\text{V}$) sekä näiden erotuksena saatava hyötysignaalin suhde häiriötasoon, eli SNR (dB).

6.2 Odotusarvot, tulokset ja havainnot

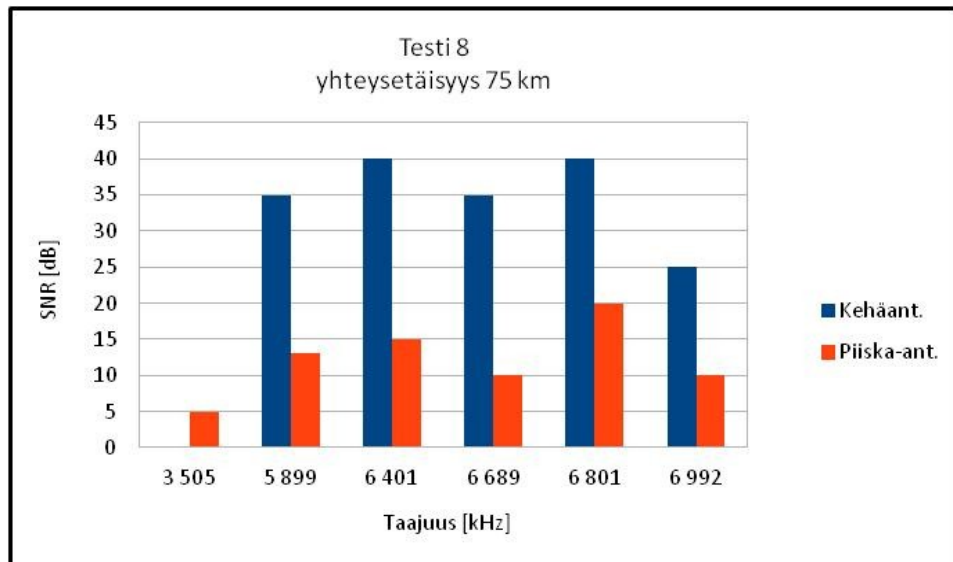
Yleisen antennitekniikan tuntemuksen, aiemmin hankitun kokemuksen ja NVIS-tekniikasta kerätyn tiedon perusteella testiryhmällä oli joitakin oletuksia ennen kenttämittauksia. Tarkoituksena oli lisäksi havainnoida mahdollisia muita ilmiöitä, joita syntyi varsinaisten testien ohella. Keskeisimmät kysymykset ennen testejä olivat:

- Havaitaanko pinta-aallon kantaman raja selkeästi ja onko antennien suorituskyvyssä tällä alueella merkittäviä eroavaisuuksia?
- Magneettisella kehäantennilla pitäisi olla huomattavasti pienemmät pohjakohinatasot verrattuna piiska-antenniin. Onko myös näin ja tapahtuuko tämä aina vai onko toiminnassa poikkeuksia?
- Minkälainen yhteyden taso kehäantennilla on kantaman yläpäässä NVIS-tekniikkaa hyödyntäen? Eli vaimeneeko signaali usean avaruusaaltoheijastuksen jälkeen jo huomattavasti enemmän kuin piiska-antennin signaali?

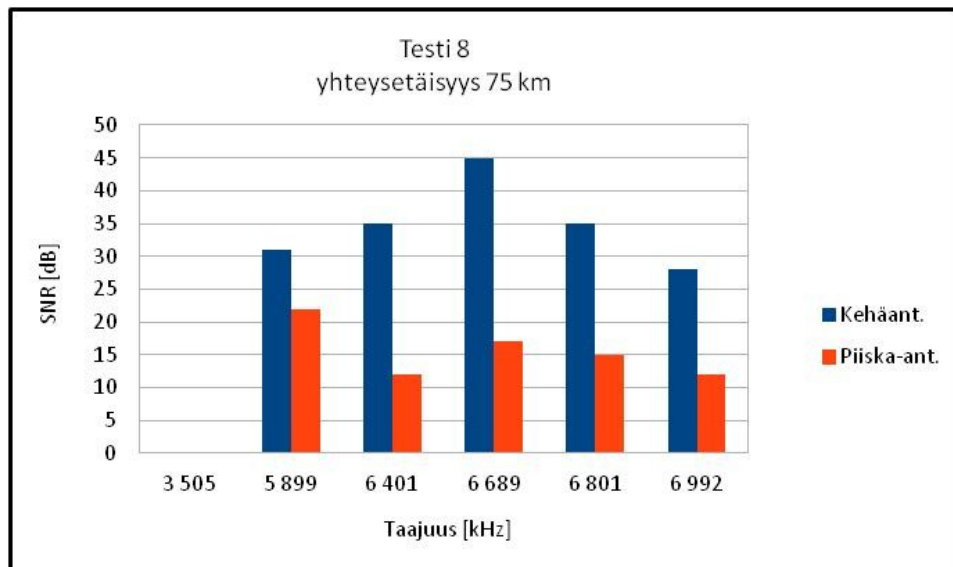
Ensimmäisen kysymyksen mukaista täysin yhteydetöntä etäisyyttä ei piiska-antennin osalta todettu, mutta testeissä numero 8 ja 9 (yhteysvälit 75 km ja 50 km) havaittiin huomattava suorituskykyero antennien kesken.

Mittauserot signaalikohinasuhteen arvoissa olivat hieman pienemmät kontissa kuin ajoneuvossa. Kontin osalta antennien signaalikohinasuhde oli noin kaksinkertainen kehäantennin hyväksi ja ajoneuvossa mitatut arvot olivat jopa kolminkertaiset. Testiasemien välinen ero selittyy liikkuvan aseman antennien matalilla pohjakohinatasoilla, jotka saavutettiin edullisella ajoneuvon sijainnin valinnalla.

Pohjakohinatasot ajoneuvossa olivat molempien antennien osalta pienemmät kuin kontissa ja mittaustuloksia tarkastelemalla asia näyttäisi korostuvan kehäantennin eduksi. Tarkastelemalla ainoastaan vastaanotetun signaalin tehoa, voidaan siitäkin todeta kehäantennin kaksinkertaiset arvot suhteessa piiska-antennin arvoihin. Kuvioissa 1 ja 2 on esitetty antennien signaalikohinasuhteiden tasoero eri taajuuksilla testissä numero 8.



Kuvio 1. Ajoneuvossa mitatut signaalikohinasuhteet testissä numero 8.



Kuvio 2. Kontissa mitatut signaalikohinasuhteet testissä numero 8.

Luvun alkupuolella mainittu kehäantennin viritysongelma on nähtävissä kuviossa 1 ensimmäisen taajuuden kohdalla. Mittaustulosta ei saatu toisen antennin osalta ja sen seurauksena kuvion ensimmäinen sarja taajuuden 3505 kHz kohdalla on virheellinen. Kuviossa 2 on vastaava testi kontin osalta, josta voidaan todeta sama ongelma ensimmäisen taajuuden kohdalla. Tässä tapauksessa mittaustulos on jäänyt saavuttamatta molempien antennien osalta.

Aiemmin mainittuun toiseen kysymykseen pohjakohinasuhteiden tulokset mittaustulosten tai yksittäisten mittausten perusteella osoittavat, että kehäantennin häiriötasot olivat käytännössä aina pienemmät kuin piiskaantennin. Ajoneuvoaseman mittauspöytäkirjojen mukaan ainoastaan yhden kerran kirjattiin pienempi häiriötaso piiska-antennille ja kontin osalta matallampia arvoja oli viisi kappaletta.

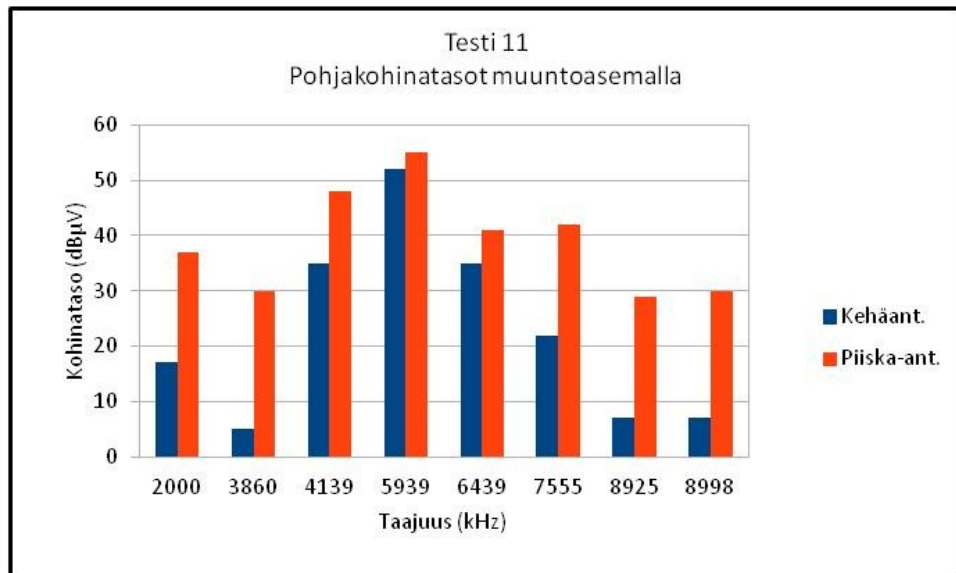
Taulukko 4. Pohjakohinatasojen vertailu, jossa on kirjattuna mitattu pienempi arvo.

Antenni	Ajoneuvo		Kontti	
	kehäant.	piiska-ant.	kehäant.	piiska-ant.
Testauspaikkoina	10	0	10	0
Kaikki mittaukset	50	1	45	5

Taulukkoon on jätetty kirjaamatta tulos antennille, jos mitattu arvo on ollut tasan tai mikäli pohjakohinatasoa ei ole saatu lainkaan (antennin viritysongelma). Kaikkien mittausten summa oli 60 molempien asemien osalta ja käytännössä puuttuvat arvot eivät muuta tulosta, joka osoittaa kehäantennin paremmuuden tämän testin kohdalla.

Erittäin häiriöllisen kohteen (sähköverkon muuntoasema) pohjakohinatasotestissä mittaustulos oli edelleen kehäantennin puolella. Mitattaviksi taajuuksiksi valittiin sellaiset, joissa oli kohtalaisen tasalaatuinen häiriö mittaustuloksen lukemisen helpottamiseksi.

Alla olevassa kuviossa on kirjattuna pohjakohinatasot kahdeksalla eri taajuudella ja kaikki tulokset osoittavat kehäantennin paremmaksi. Taajuuksilla 5959 kHz ja 6439 kHz ero ei ole kovin merkittävä sekä lisäksi kaikki sellaiset lähetteet, jotka tulevat erittäin kaukaa (tuhansien kilometrien päästä) eivät olisi muutenkaan tulleet vastaanotetuksi kehäantennissa. Tämä johtuu aiemmissa luvuissa käsitellystä antennin ominaisuuksista vastaanottaa ja lähettää matalilla säteilykulmilla.

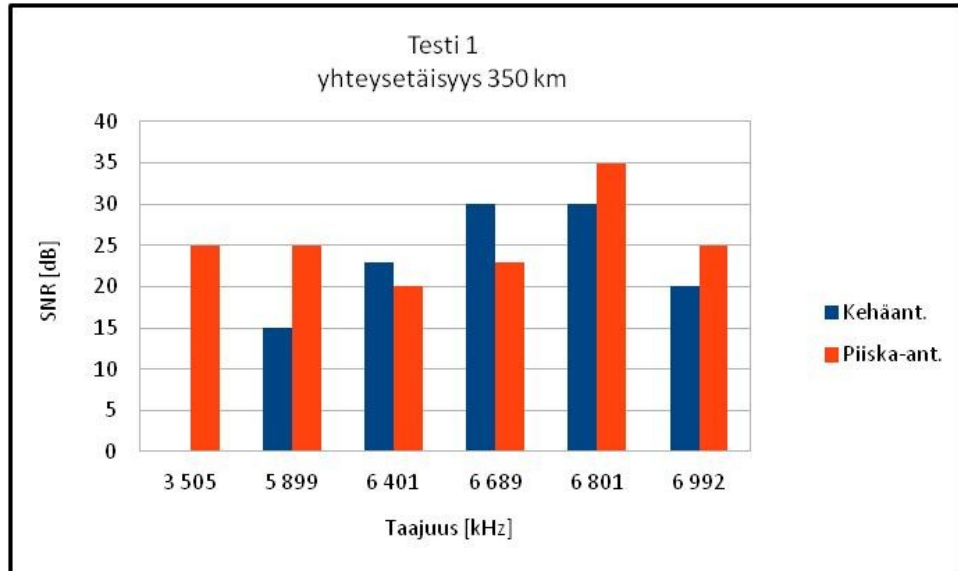


Kuvio 3. Häiriötasot muuntoasemalla.

Kolmannen testikysymyksen osalta kantaman ääri rajoilla suoritettu mittaus osoittaa piiska-antennin hieman paremmaksi, kun toimitaan pitkillä yhteysetäisyyksillä. Kehäantennilla oli edelleen aiempien tulosten mukaiset pienemmät pohjakohinatasot, mutta piiska-antennilla saavutetut paremmat

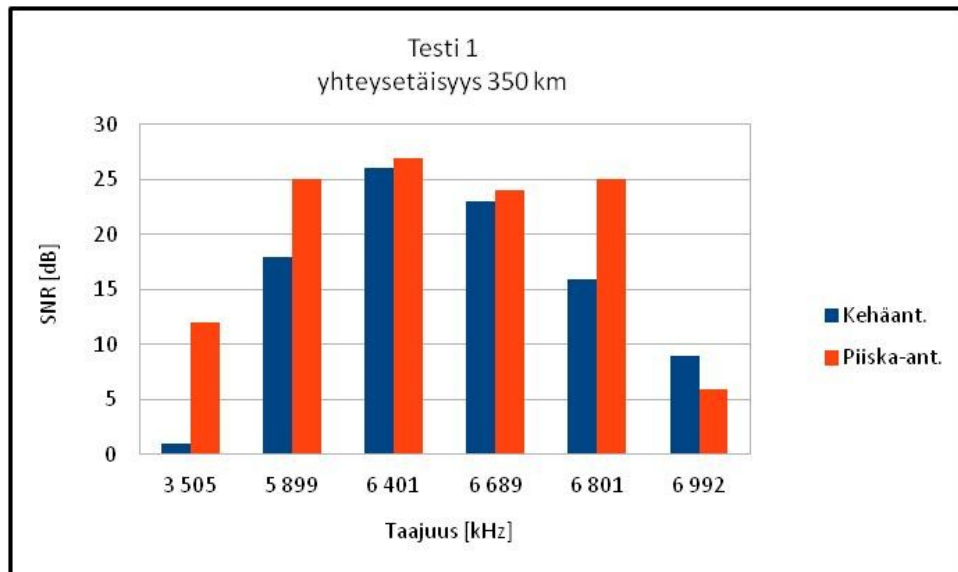
lähetteen vastaanottotasot tuottivat lopputuloksena korkeammat signaalikohinasuhdearvot.

Tässä testissä mitattu antennien suorituskykyero piiska-antennin hyväksi ei ole kovinkaan suuri verrattuna testiin numero 8, jossa todettiin kehäantennin huomattavasti paremmat tulokset. Kuvioissa neljä ja viisi on esitetty mittausarvot molempien asemien osalta.



Kuvio 4. Ajoneuvossa mitatut signaalikohinasuhteet testissä numero 1.

Kehäantennin mittaustulosta ei saatu alimman taajuuden kohdalla samoin kuin aiemmissakin tapauksissa. Lisäksi kahden keskimäisen taajuuden kohdalla kehäantennin pienemmät pohjakohinatasot tuottivat paremman lopputuloksen, toisin kuin alla olevassa kuviossa kontin osalta.



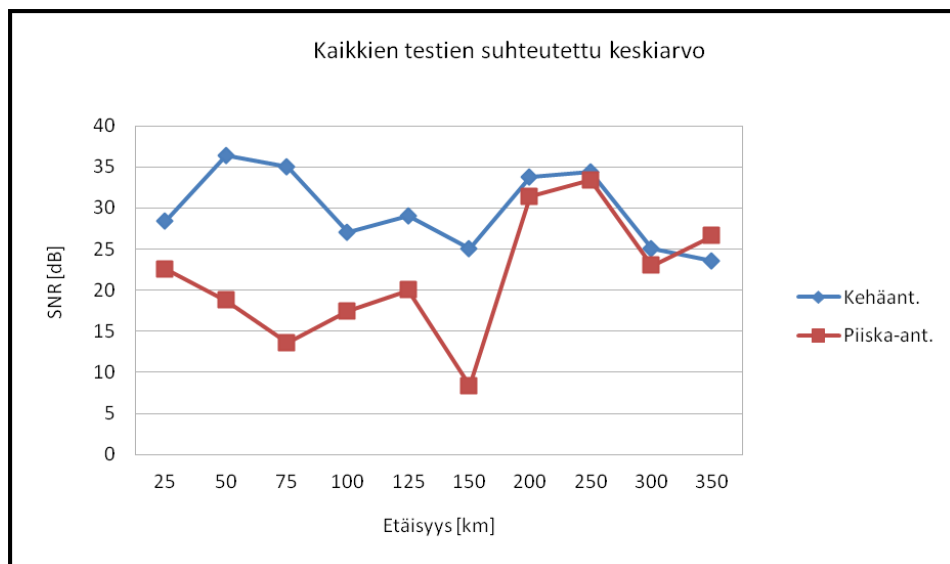
Kuvio 5. Kontissa mitatut signaalikohinasuhteet testissä numero 1.

Kontissa mitatut tulokset olivat yhtä lukuun ottamatta kaikki parempia piiska-antennilla, mutta selkeää eroa antennien kesken ei ole kuitenkaan kuin kolmella taajuudella.

6.3 Yhteenveto testistä

HF-taajuusalueen pinta-aallon vaimenemisen vaikutukset todettiin yhteys-etaisyydellä 50–70 km, jossa piiska-antennilla toteutettu hyötyliikenteen siirtoyhteys olisi todennäköisesti katkennut. Kehäantennilla saavutettiin kuitenkin erittäin hyvät arvot ja tässä tapauksessa käytössä ollut yhteysasemien kesken olisi toiminut katkeamatta myös tällä yhteysvälillä. Tuloksena voidaan todeta, että operoitaessa tämän tyyppisillä etäisyyksillä NVIS-tekniikkaa hyödyntävä antenni on toimintavarmin ratkaisu. Vaihtoehtoista korkeamman taajuusalueen (VHF tai UHF) menetelmää ei myöskään ole hyödynnettävissä tällä yhteysetaisyydellä.

Alla olevassa kuviossa on esitetty mittausten keskiarvot kaikilta yhteys-etaisyyksiltä. Keskiarvot on muodostettu jättämällä heikoin tulos pois molempien antennien osalta jokaisella mittausetaisyydellä.



Kuvio 6. Yhteysetaisyyksien SNR-keskiarvot.

Kehäantennin pohjakohinatasot olivat käytännössä aina pienempiä jokaisessa testissä ainakin liikkuvan aseman osalta, jolla pyrittiin valitsemaan mahdollisimman häiriöttömältä vaikuttava paikka. Edellä mainittu havainto tukee teoriaa, jonka mukaan antennin tietyt ominaisuudet korostuvat signaalin vastaanotossa pienempien pohjakohinatasojensa takia.

Erillisenä testinä suoritettu häiriöllisen paikan pohjakohinavertailussa tulokset antennien kesken olivat jopa dramaattisia. Testipaikaksi valittiin sähköjakoalueen muuntoaseman alue ja taajuudet valikoitiin ns. tasalaatuisen häiriön perusteella. Tällöin eri antennille saatiin jopa 20–30 dB:n eroja kehäantennin hyväksi.

Magneettiselle kehäantennille / NVIS-etenemiselle määritetty katkeamaton yhteysväli etäisyydelle 0–500 km jäi koko matkan osalta testaamatta. Suurimmalla yhteysvälillä (350 km) suoritettu testi osoitti, että piiskaantenni toimi paremmin, mutta antennien väliset tulokset eivät kuitenkaan eronneet huomattavasti toisistaan.

Nyt mitatun suurimman etäisyyden yli menevät testit osoittaisivat todennäköisesti, että laskeeko kehäantennin suorituskyky edelleen etäisyyden kasvaessa kohti 500:aa kilometriä. Suoritetulla testillä ei todettu kyseisen antennin toimimattomuutta millään etäisyydellä pois lukien käytettävissä olleen matalimman taajuuden ongelma, jolloin antenni ei virittynyt. Ongelman syytä ei tarkemmin tutkittu tässä yhteydessä. Syy liittyy arviolta joko testikäytössä olleen antennin kaistanleveyteen, virittimen suorituskykyyn tai näiden yhdistelmään.

Testissä toteutettu mittaustapa ja tehdyt testit ovat vain pieni osa isommasta kokonaisuudesta. Mahdollisia testejä ja määriteltäviä ominaisuuksia sekä erilaisia variaatioita on miltei rajaton määrä, mutta kulloinkin testattavaksi määritellyssä asiassa on vain tietty aika ja mahdollisuus erilaisten skenaarioiden tai toteutuksien suorittamiseen. Onkin tärkeää määrittellä ja rajata hyvin testauskokonaisuudet ja päättää mihin keskitytään ja mitä ei testata.

Tällaisissa testeissä on tärkeää tunnistaa erilaiset tavoitteet, asioiden suhteet toisiinsa ja näiden vaikutukset, koska moni asia vaikuttaa useaan toiseen asiaan. Esimerkkinä lähetystehot testeissä ovat aivan oma lukunsa, joilla pystytään rajaamaan mm. pinta-aallon yhteysetäisyys. Nyt suorite-
tuissa testeissä käytettiin maksimilähetystehoa kaikissa tapauksissa.

Radioteitse suoritettavassa tiedonsiirrossa käytettävä modulaatio vaikuttaa myös erittäin paljon yhteyden laadun vaatimukseen. Testissä käytetty CW-modulaatio ei tarvitse kovinkaan häiriötöntä yhteyttä, vaan signaalin todentamiseen riittää kun lähete ylittää juuri ja juuri pohjakohinan. Oikeassa tiedonsiirrossa vaatimukset vastaanotetun signaalin tasolle ja laadulle ovat korkeammat sekä näiden lisäksi virheiden määrä todennäköisesti kasvaa mikäli signaalikohinasuhde on alhainen. Virheiden lisääntyessä kasvaa myös niiden korjaus ja samoin korjaukseen käytettävä aika, joka taas aiheuttaa tiedonsiirtoon hitautta ja viiveitä.

7 POHDINTA

Työn tarkoituksena oli perehtyä HF-taajuusalueeseen, sen ilmiöihin ja taajuusalueella käytettävään antennitekniikkaan kolmen antennityypin osalta. Lisäksi huomioitiin Suomen merialueilla vaikuttavat erityispiirteet antennien käyttöön liittyen sekä dokumentoitiin kahden antennin välillä tehty käytännön testaustoiminta.

Monilla HF-käyttäjillä on peruskäsitys käytettävistä taajuuksista ja niiden muutoksista vuorokauden ajan suhteen. Samoin ymmärretään, että joskus on ongelmia liikennöinnissä ja taajuusalueen käytössä. Yleisesti ei kuitenkaan enää ymmärretä vaadittavien taajuusmuutosten ja ajoittain esiintyvi-

en ongelmien välistä suhdetta ja luonnetta. Simulointi- ja ennustusohjelmien käytöstä saattaa olla hyötyä taajuusalueen käytön suunnittelussa, mikäli hallitsee tiettyjä perusasioita. Keskeistä on ymmärtää radio- ja antennitekniikan perusteista ainakin pieni osa sekä hieman laajemmin HF-taajuusalueen toiminnan perusteita ja ilmiöitä.

Dipoli-, monopoli ja kehäantennien ominaisuuksia sekä suorituskykyjä vertaamalla havaittiin antenneilla omia vahvuuksia ja heikkouksia erilaisissa tilanteissa tai käyttökohteissa. Tutkimus kuitenkin osoittaa magneettisen NVIS-antennin suorituskykyisimmäksi vaihtoehdoksi näistä kolmesta antennista toimittaessa Suomessa rannikko- ja merialueilla. Ottaen huomioon antennin harvat rajoitteet, on sen laajemmalla käytöllä mahdollista toteuttaa suorituskykyinen järjestelmä HF-tiedonsiirtoon.

Kenttätestinä toteutettu piiska-antennin ja magneettisen NVIS-luuppiantennin suorituskykymittaus usealla yhteysesäisyydellä osoitti jälkimmäisen antennin kaikilla valituilla mittareilla paremmaksi. Saadut havainnot testistä tukevat hyvin teoriaa antennin osalta myös Suomen toimintaympäristössä.

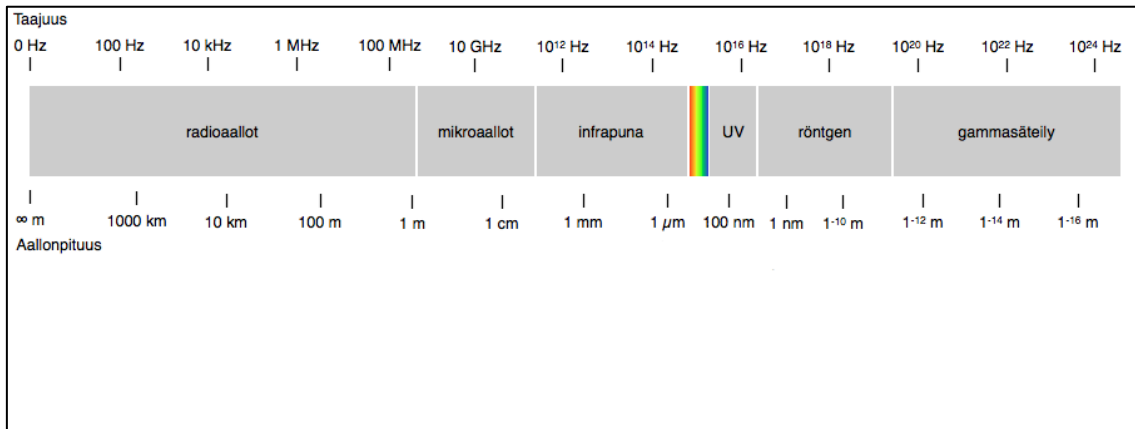
Käytettävien antennityyppien valinta ja antennijärjestelmän kokonaistoiteutus kaikilla käytettäväksi määritetyillä taajuusalueilla tulee tehdä harkiten ja tutkimukseen tai testattuun tietoon perustuen. Määrä ei tässäkään tapauksessa korvaa laatua ja radiotekniikan osalta on erityisesti vaarana häiriöiden aiheuttaminen oman toiminnan seurauksena. Järjestelmiä ja niiden langattomia rajapintoja suunnitellessa tulisi erityistä huomiota kiinnittää antennien toteutukseen. Mikäli antennisuunnittelu laiminlyödään, aiheutetaan mahdollisesti muuten tehokkaalle järjestelmälle huomattavaa haittaa tiedonsiirtorajapinnassa.

LÄHTEET

- Antenna Polarisation. Viitattu 17.11.2018.
<http://hardhack.org.au/book/export/html/72>
- Astrosurf. Viitattu 17.11.2018.
<http://www.astrosurf.com/luxorion/Radio/yagi--6ele-radiation-pattern.gif>
- Australian Government. Bureau of Meteorology. Ionospheric Map. Viitattu 20.11.2018. https://www.sws.bom.gov.au/HF_Systems/6/5
- Canada Centre for Remote Sensing. Tutorial. Fundamentals of Remote Sensing. Viitattu 18.6.2018.
<https://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/geomatics/satellite-imagery-air-photos/satellite-imagery-products/educational-resources/14621>
- Comrod. 2007. HF230L_OTM Datasheet. Viitattu 9.10.2018.
<https://www.comrod.com/wp-content/uploads/HF230L-OTM.pdf>
- Hamwaves.com. Real-Time Ionograms. Ionospheric Sounder Station Link List.
<https://lgdc.uml.edu/common/DIDBYearListForStation?ursiCode=BVJ03>
- Eklöf, K., Markku, A., Railo, K. & Vehmasvuori, J. 2004. Radiotekniikan perusteet. 1-1. p. Opetushallitus.
- Electronic Design. Difference between a dipole and a ground plane antenna. Viitattu 22.9.2018.
<https://www.electronicdesign.com/wireless/what-s-difference-between-dipole-and-ground-plane-antenna>
- Electronics Notes. Radio signal path loss. Viitattu 16.11.2017.
<https://www.radio-electronics.com/info/propagation/path-loss/rf-signal-loss-tutorial.php>
- Electronics Notes. HF Propagation. Viitattu 23.9.2018.
<https://www.electronics-notes.com/articles/antennas-propagation/ionospheric/hf-propagation-basics.php>
- HF Link. ALE Antenna Articles. Viitattu 20.11.2018.
<http://hfink.com/antenna/#T2FD>
- Ilmatieteenlaitos. Teematietoa. Avaruus ja magneettikenttä. Maan magneettikenttä. Viitattu 10.4.2018. <http://ilmatieteenlaitos.fi/ionosfaari>
- Ilmatieteenlaitos. Teematietoa. Ilmakehä ja sääilmiöt. Ilmakehän kerrokset. Viitattu 30.9.2018. <https://ilmatieteenlaitos.fi/ilmakeha-ja-saailmiot>
- Kosola, J & Solante, T. 2013. Digitaalinen taistelukenttä. Informaatioajan sotakoneen tekniikka. Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotatekniikan Laitos. Julkaisusarja 1. No 35. 3. p. Helsinki.

- Lehto, A. 2006. Radioaaltojen maailma. Helsinki: Otatieto.
- Lindell, I. & Nikoskinen, K. 1995. Antenniteoria. 3. tark. ja korj. p. Helsinki: Otatieto.
- Peltonen, H., Perkkiö, J. & Vierinen K. 2012. Insinöörin (AMK) FYSIIKKA OSA II. 8. painos. Lahti: Lahden teho-opetus.
- Perkiömäki, J. 2006. Avaruussään vaikutukset HF-keliin. Viitattu 23.3.2018. <http://www.voacap.com/avaruussaa.html>
- Rohde & Schwarz. Brochures and Data Sheets. R&S®HD420 Antenna. Viitattu 14.11.2018. https://www.rohde-schwarz.com/us/product/hd420-productstartpage_63493-9050.html
- Räisänen, A. & Lehto, A. 2011. Radiotekniikan perusteet. 13. p. Helsinki: Otatieto.
- The American Radio Relay League. 2011. The ARRL Antenna book for radio communications. 22nd edition. Newington: ARRL.
- Tiivistelmäraportti. 2011. Kehittyneiden aaltomuotojen käytettävyys HF - alueen tiedonsiirrossa. Maanpuolustuksen tieteellisen neuvottelukunnan julkaisuja 2011. Helsinki: Puolustusministeriö.
- Tiivistelmäraportti. 2015. Kanavamittaus moderneja laajakaistaisia HF - järjestelmiä varten. Maanpuolustuksen tieteellisen neuvottelukunnan julkaisuja 2015. Helsinki: Puolustusministeriö.
- University Of Oulu. Sodankylä Geophysical Observatory. Ionosonde Data. Viitattu 20.11.2018. <http://www.sgo.fi/Data/Ionosonde/ionData.php>
- US Army. Field Manual. Viitattu 14.11.2018. https://en.wikisource.org/wiki/United_States_Army_Field_Manual_7-93_Long-Range_Surveillance_Unit_Operations/Appendix_D

SÄHKÖMAGNEETTINEN SPEKTRI



KENTTÄTESTAUKSEN LAITTEISTOJÄRJESTELYT

