

TIIVISTELMÄRAPORTTI

KEHITTYNEIDEN AALтомуOTOJEN KÄYTETTÄVYYS HF-ALUEEN TIEDONSIIRROSSA

Markku Jokinen, Oulun yliopisto, Center for wireless communications
markku.jokinen@ee.oulu.fi

Tiivistelmä

Tässä tutkimuksessa selvitettiin ylemmille taajuusalueille kehitettyjen tekniikoiden soveltuvuutta HF-alueen sotilasradiojärjestelmiin. Aaltomuodoksi valittiin OFDM, joka on käytössä lukuisissa nykyaikaisissa tiedonsiirtojärjestelmissä. Näistä lähtökohdista toteutettiin ohjelmistoradioalustalle demonstraatiojärjestelmä, jolla pystyttiin käytännössä todentamaan aaltomuodon toimivuus HF-alueella.

Ohjelmistoradioalustana käytettiin WARP-alustaa, joka on suunniteltu huomattavasti HF-alueella korkeammalle taajuusalueelle. Alusta tukee OFDM-aaltomuotoa, jota muokattiin pienemmän kaistanleveyden ja alemman kantotaajuuden saavuttamiseksi. Käyttöön otettiin 30MHz:n kantotaajuus ja 78-312kHz:n kaistanleveydellä toimiva lähete.

Lopuksi uuden järjestelmän toimivuus testattiin mittauksin. Mittaukset aloitettiin kantotaajuudelta ja todettiin järjestelmä toimivaksi. Tämän jälkeen siirryttiin HF-kantotaajuudelle laboratorio-olosuhteissa, ja mitattiin syntyneet pakettivirhesuhteet koherenttia ja epäkoherenttia vertailutaajuutta käyttäen. Lopuksi järjestelmä testattiin myös kenttämittauksin Radio Arcalan antennimastoja käyttäen.

1. Johdanto

Nykyaikaisissa sotilasoperaatioissa vaaditaan joukoilta aiempaan verrattuna entistä enemmän liikkuvuutta ja operaatiot tapahtuvat laajemmilla maantieteellisillä alueilla. Samanaikaisesti vaatimukset käyttäjille tarjottavista palveluista kasvavat jatkuvasti. Lisääntyneet palvelut ja vaatimukset tiedon reaaliaikaisuudesta taas asettavat entistä kovempia vaatimuksia viesti- ja johtamisjärjestelmien tiedonsiirtokapasiteetille. Samoin kansainvälisten operaatioiden merkitys on entisestään korostunut. Edellä mainittu asettaa viesti- ja johtamisjärjestelmät sellaisen haasteen eteen, ettei olemassa olevilla järjestelmillä kyetä vastaamaan asetettuihin vaatimuksiin.

Käytännössä vaadittavat yhteysetäisyydet, joukkojen liike huomioiden, on mahdollista toteuttaa vain HF- tai satelliittiyhteyksillä. Satelliittiyhteydet taas soveltuvat huonosti joukkojen taktis-operatiiviseen johtamiseen. Lisäksi omien satelliittien puuttuminen aiheuttaa selkeän luotettavuusongelman yhteyksien kannalta.

HF-alueella saavutettavat yhteysetäisyydet sekä alueellinen peitto riittävät hyvin vastaamaan johtamisyhteyksille asetettavia vaatimuksia, mutta HF-alueella ongelmana on perinteisten aaltomuotojen huono tiedonsiirtokapasiteetti sekä häiriön ja häirinnän kesto. Nykyisin käytössä olevat HF-järjestelmät nojaavat aaltomuotoihin, jotka on kehitetty analogiseen tiedonsiirtoon, kuten sähkötyt tai analoginen puhe.

Postiosoite	MATINE Puolustusministeriö PL 31 00131 HELSINKI	Sähköposti	matine@defmin.fi
Käyntiosoite	Eteläinen Makasiinikatu 8 00130 HELSINKI	WWW-sivut	www.defmin.fi/matine
Puhelinvaihe	(09) 16001	Y-tunnus	FI01460105
Pääsihteeri	(09) 160 88310	OVT-tunnus/verkkolaskuosoite	003701460105
		Itellan operaattorivälittäjä-tunnus	003710948874
Suunnittelusihteeri	(09) 160 88314	Verkkolaskuoperaattori	Itella Information Oy
Toimistos sihteeri	050 5555 837	Yhteyshenkilö/Itella	helpdesk@itella.net
Faksi kirjaamo	(09) 160 88244		



2. Tutkimuksen tavoite ja suunnitelma

Tutkimuksessa demonstroidaan käytännössä kehittyneiden aaltomuotojen soveltuvuutta HF-taajuusalueen tiedonsiirtoon. Demonstraatiossa keskitytään aaltomuodon fyysisen kerroksen ominaisuuksien demonstroimiseen.

Käyttämällä moderneja tekniikoita HF-alueen aaltomuodossa, voitaisiin tiedonsiirtokapasiteettia kasvattaa merkittävästi. Esimerkiksi vuoden 2010 tutkimuksessa referenssinä käytetyllä DRM järjestelmällä päästään käytettävästä taajuuskaistasta ja etenemisolosuhteista riippuen 7,1 – 72kbit/s tiedonsiirtonopeuteen.

Tutkimuksen tavoitteena on demonstroida tulevaisuuden HF-taajuusalueen aaltomuodon fyysisen kerroksen ominaisuuksia. Tässä tutkimuksessa selvitetään millaista suorituskykyä HF-alueella on mahdollista luoda käyttämällä moderneja fyysisen kerroksen ratkaisuja ja demonstroida niiden toimintaa käytännössä. Tutkimustulosten perusteella kyetään arvioimaan, millaista suorituskykyä HF-alueen tiedonsiirrossa olisi mahdollista saavuttaa käyttämällä kehittyneitä aaltomuotoja yhdessä ohjelmistoradioalustan kanssa.

Tutkimus luo perustaa edelleen kehittää HF-alueen tiedonsiirtoa kohti nykyaikaisia vaatimuksia ja luo valmiuksia mahdolliselle HF-alueen aaltomuodon implementoinnille ohjelmistoradioalustaan. Demonstraattorivaiheen tavoitteena on luoda perustaa HF-alueen tiedonsiirron kehittämisen jatkohankkeelle Puolustusvoimissa.

3. Aineisto ja menetelmät

3.1. WARP-ohjelmistoradioalusta

Demonstraattorialustaksi valittiin Wireless open-Access Research Platform (WARP), joka on hyvin joustavasti muokattavissa oleva langattomien tiedonsiirtojärjestelmien tutkimusalusta. WARP-alusta perustuu Xilinx:in Virtex II pro FPGA-piiriin, joka sisältää kaksi kappaletta PowerPC 405 (PPC) prosessoreita ja ohjelmoitavaa logiikkaa. FPGA logiikalle voidaan toteuttaa erilaisia moduuleja, joita kutsutaan myös Intellectual Property (IP)-lohkoiksi, nämä moduulit liitetään toisiinsa ja piirin prosessoreihin käyttäen Processor Local Bus (PLB)-väylää.

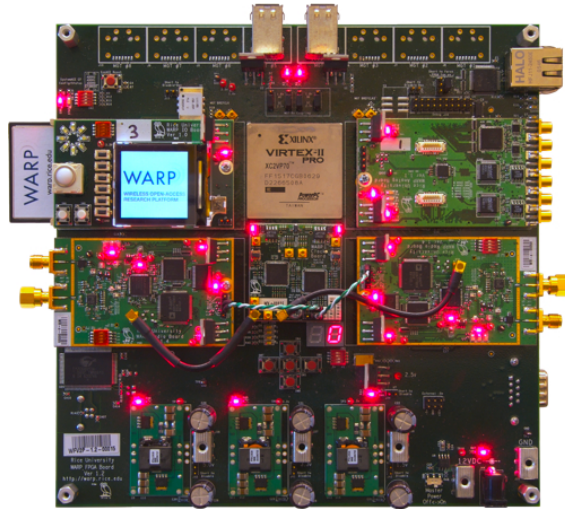
Centre for Multimedia Communications (CMC) Rice yliopistosta Teksasista on kehittänyt WARP-alustan. CMC on myös kehittänyt referenssitoteutuksen WARP-alustalle, joka sisältää fyysisen kerroksen MIMO-OFDM lähetin vastaanottimen, joka muodostaa yhden IP-lohkon, sekä MAC-kerroksen ohjauskoodin jota suoritetaan piirin PPC prosessorilla. Referenssitoteutuksessa on käytetty hyväksi myös monia Xilinx:in valmistamia IP-lohkoja, jotka mahdollistavat alustan monia toiminnallisuksia. Referenssitoteutus perustuu läyhästi IEEE 802.11a-g standardiin, ja se toimii 2,4GHz kantotaajuusalueella. Avainominaisuuksiltaan toteutus kuitenkin eroaa selvästi WLAN standardista, niitä ovat:

- 10 MHz kaistanleveys
- tuki BPSK, QPSK ja 16-QAM modulaatiolle
- ei kanavakoodausta

WARP-alusta voidaan liittää tietokoneeseen Ethernet yhteyden avulla, jolloin WARP-alustat toimivat langattomana Ethernet linkkinä kahden tietokoneen välillä. Tällöin tietokoneelta tulevat paketit välitetään eteenpäin langattomalle siirtotielle, jonka toteuttavat fyysinen kerros ja MAC-kerros. Tietokoneelle näkyy ainoastaan Ethernet yhteys, joten sen ohjattavaksi jää ainoastaan ylemmän kerroksen protokollat kuten reititys ja käyttäjäsovellukset.

Kuvassa 1 esitetyssä WARP-alustassa on neljä lisäkorttipaikkaa, joihin on kytkettävissä

ohjelmitteina radiokortti, analogiakortti tai IO-kortti. Referenssitoteutus käyttää 2,4GHz ja 5GHz taajuusalueella toimivaa radiokorttia. HF-taajuusalueelle siirryttäessä radiokorttia ei voida käyttää, joten käyttöön otettiin analogiakortti. Analogiakortti toteuttaa ainoastaan digitaali-analogi- (DA) ja analogi-digitaalimuunnoksen (AD), eli sen ulostulo on kantataajuinen. Analogiakortti sisältää kaksi DA-muunninta ja yhden AD-muunnin, joten analogisia ulostuloja on neljä ja sisääntuloja kaksi.



Kuva 1: WARP ohjelmistoradioalusta.

3.2. HF-toteutus

Kuten edellisessä kappaleessa todettiin, WARP-alustan muuttaminen käyttämään HF-taajuuksia vaatii radiokortista luopumista. Koska analogiakortin ulostulo on kantataajuisia, täytyy ulkoisella laitteella toteuttaa HF-taajuudelle sekoitus. Ylös- ja alas-sekoitukseen käytettiin laboratoriokäyttöön suunnattuja vektorisignaali-generaattoria ja vektorimodulaatioanalyysointia.

Referenssitoteutukseen tehdyt muutokset painottuvat käytettyihin kellotaajuuksiin ja fyysisen kerroksen muutoksiin. Referenssitoteutuksessa käytetyt kellotaajuudet ovat prosessoriytimen 240MHz ja PLB-väylän 40MHz kellotaajuus. Toteutuksessa käytettyjen IP-lohkojen kellotaajuus määräytyy käytetyn väylän mukaan, joten lähetinvastaanotinlohko toimii 40MHz:n kellotaajuudella. HF-toteutuksessa kellotaajuuksia laskettiin pienemmän kaistanleveyden saavuttamiseksi. Käyttöön otettiin 20MHz:n kellotaajuus prosessorille ja 5MHz:n väylätaajuus. Rajoittava tekijä kellotaajuuksien laskussa on alustan Ethernet-ohjain joka vaatii vähintään 5MHz:n kellotaajuuden toimiakseen 10Mbit/s nopeudella. Fyysistä kaistanleveyttä voidaan lisäksi kaventaa näytteistystä muuttamalla, joka tapahtuu desimointikerrointa kasvattamalla toteutuksessa.

3.3. WARP referenssitoteutuksen muutokset

Taulukossa 1 vertaillaan referenssitoteutus v12.1 ja HF-toteutuksen avainominaisuuksia. Referenssitoteutuksessa fyysinen kerros toimii 40MHz:n kellotaajuudella ja desimointikerroksena käytetään neljää, tällöin signaalin kaistanleveydeksi muodostuu 10MHz:ä. Referenssitoteutuksessa alikantoaaltojen määrä on 64, joista DC komponentti ja pilotti alikantoaallot pois lukien 48 keskimmäistä ovat varattu datan lähettämiseen. HF-toteutus on tehty referenssitoteutuksen pohjalta, mutta siinä fyysisen kerroksen kellotaajuus on 5MHz ja desimointikerroin on tehty joustavaksi. Käytetyt desimointikerroimet ovat 16, 32

tai 64 ja näin ollen kaistanleveys on saatu pudotettua taulukon mukaisesti. Myös alikantoaaltoa rakennetta muunnettiin, kuitenkin pitäen alikantoaaltojen lukumäärä vakiona. DC-komponentin ympäriltä neljä alikantoaaltoa siirrettiin taajuusalueen reunuille, koska DC-komponentin poistosuodatus vaikuttaa keskimmäisiin alikantoaaltoihin kapeampaa signaalin kaistanleveyttä käytettäessä.

Taulukko 1: Avainominaisuuksien vertailu

	ref. toteutus	HF toteutus I	HF toteutus II	HF toteutus III
kaistanleveys	10MHz	312,5kHz	156,25kHz	78,13kHz
symboliaika	8μs	256μs	512μs	1,024ms
desimointikerroin	4	16	32	64
PHY kellotaajuus	40MHz	5MHz	5MHz	5MHz
alikantoaaltojen lkm.	48	48*	48*	48*
keskitaajuus	2,4 tai 5GHz	30MHz	30MHz	30MHz
* neljä keskimmäistä alikantoaaltoa siirretty				

Suurin lähetinlogiikkaan tehty muutos on siihen lisätty puskuri, jonka avulla pakettia voidaan venyttää, ja näin ollen näytenopeus pienenee. Tämän jälkeen suodattimiin tehdyt muutokset tekevät läheteestä kapeakaistaisemman alkuperäiseen verrattuna. Muutoin lähetinlogiikka on pyritty säilyttämään alkuperäisenä.

Vastaanottimeen tarvittavat muutokset ovat hieman mittavammat kuin lähettimen puolella. Muutoksen vaativat lohkot sijoittuvat signaalitiellä ennen FFT-lohkoa, jonka jälkeen näytenopeus ei enää vaikuta signaalinkäsittelyyn. Myös radiokortista luopuminen tuotti muutoksia vastaanottimeen. Radiokortilta tulevaa RSSI (vastaanotetun signaalin vahvuus indikaattori) signaalia käytetään paketin havaitsemiseen, mutta HF-toteutuksessa tätä ei voitu käyttää, ja sen sijaan siirryttiin käyttämään korrelaatiopohjaista paketinhavaitsemislohkoa. Radiokortista luopuminen poisti myös AGC (automaattinen vahvistuksen säätö) lohkon, jolloin käyttäjä joutuu manuaalisesti säätämään optimaalisen lähetystehon. Paketin venyttämisen takia myös paketin ajoituslogiikkaan ja taajuusoffsetinkorjaimen täytyi tehdä muutoksia.

4. Tulokset ja pohdinta

4.1. Havaitut rajoitukset

Desimointikertoimet $N=16$, 32 ja 64 , jotka vastaavat $312,5\text{kHz}$, $156,25\text{kHz}$ ja $78,13\text{kHz}$:n kaistanleveyttä, saatiin toimimaan luotettavasti. Fyysisen kerroksen suunnitteluun käytetyllä System Generator työkalulla toteutusta simuloitaessa pystyttiin käyttämään jopa desimointikertoimia $N=128$, 256 ja 512 virheettömästi. Nämä desimointikerroimet vastaavat kaistanleveytenä $39,1\text{kHz}$, $19,5\text{kHz}$ ja $9,76\text{kHz}$ ja symboliaikana tämä tarkoittaa n. 2 , 4 ja 8ms . Vaikka simulaatiomallia käytetään suoraan myös toteutuksen generoimiseen WARP-alustalle, havaittiin että virheettömään yhteyteen ei päästä reaali-maailmassa.

Ongelmat johtuivat paketin ilmaisusta, sillä kaikkia paketteja ei isommilla desimointikerroimilla havaittu. Kuitenkin havaitut paketit vastaanotettiin virheettömästi, joten muussa vastaanottologiikassa ei tapahtunut virheitä. Paketin ilmaisuongelman voi nähdä selvästi kun tarkastellaan korrelaattorin ulostuloa. Kuvassa 2 esitetään System Generator työkalulla simuloitua korrelaatiopiikkeitä eri desimointikerroimilla, kuvassa valkoisilla kirjaimilla on esitetty desimointikerroin. Kuvasta nähdään että korrelaatiopiikkien amplitudi pysyvät

samassa suuruusluokassa desimointikertoimesta riippumatta, ja jopa kasvaa desimointikertoimen kasvaessa.



Kuva 2: System Generator simulaatioissa nähtävät korrelaatiopiikit eri desimointikertoimilla.

Kuva 3 puolestaan esittää alustalta mitatut korrelaatioarvot, joista nähdään että korrelaatiopiikkien amplitudi selvästi pienenee desimointikertoimen kasvaessa. Lisäksi korrelaatiopiikkien korkeus vaihtelee selvästi peräkkäisten pakettien välillä, jolloin suurimmilla desimointikertoimilla osa paketeista jää havaitsematta. Jo desimointikertoimen arvolla $N=64$ jouduttiin korrelaatiopiikkien havaitsemisraja-arvoa pienentämään, jotta mittauksissa kaikki paketit saatiin vastaanotettua virheettömästi. Koska simulaatiot ja mitatut arvot eroavat näin radikaalisti, ei virhelähdettä saatu paikallistettua tämän projektin puitteissa. Täten desimointikertoimen ollessa $N=128$ tai yli, luotettavaa linkkiä ei alustoilla saatu toteutettua.

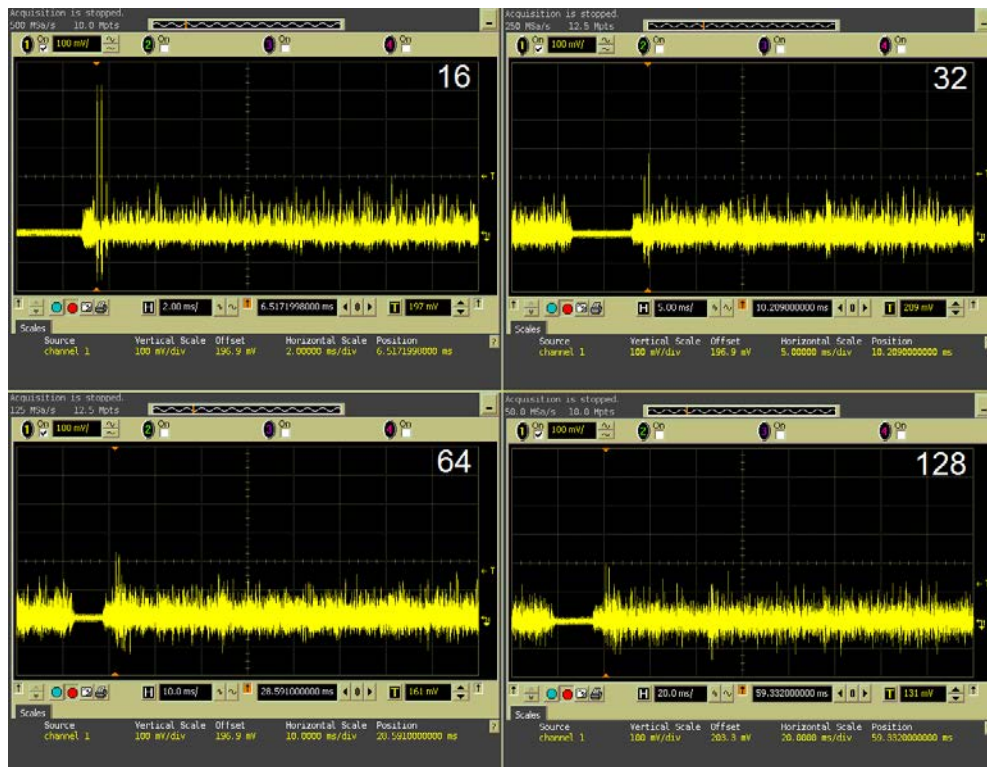
4.2. Laboratoriomittaukset

Laboratoriomittaukset suoritettiin mittaamalla fyysisenkerroksen suorituskykyä sekä kantataajuudella että sekoittamalla lähete HF-kantotaajuudelle.

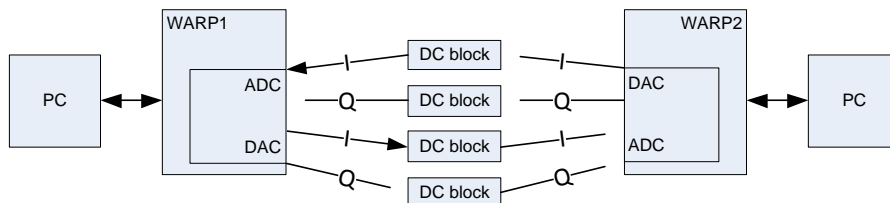
i. Kantataajuiset mittaukset

Fyysisenkerroksen suorituskyky mitattiin lähettämällä MAC-kerroksella generoituja paketteja tunnetun määrän ja mittaamalla tähän kulunut aika WARP-alustan omalla ajastimella. Pakettien määrä valittiin siten, että yhden mittauksen kestoksi saatiin noin yksi minuutti. Käytetyt desimointikertoimet olivat $N=16$, 32 ja 64 , modulaatiomenetelmänä käytettiin QPSK ja 16-QAM. Tämä kantataajuinen mittauslaitteisto on esitetty Kuvassa 4.

Datanopeus mitattiin käyttämällä eri paketin pituuksia, jolloin saatiin Kuvan 5 mukainen kuvaaja. Datan lähettämiseen kulunut aika mitattiin lähettimessä, samalla laskettiin vastaanottimessa tapahtuneita pakettivirheitä joiden määrä tallennettiin. Jokaista mittauspistettä varten tehtiin kaksi mittausta, ja mittausten keskiarvo on esitetty kuvaajassa. Kantataajuudella toimittaessa pakettivirheitä ei havaittu, joten vastaanotettu datanopeus on sama kuin lähettimessä. Paketin pituutta kasvattaessa myös datanopeus kasvaa, mutta maksimi datanopeutta rajoittaa käytetty kaistanleveys ja modulaatiomenetelmä. Lisäksi paketin koko rajoitettiin n. 1500 tavuun, joka on Ethernet-paketin maksimi pituus.



Kuva 3: Oskilloskoopilla mitatut korrelaatiopiikit eri desimointikertoimilla.

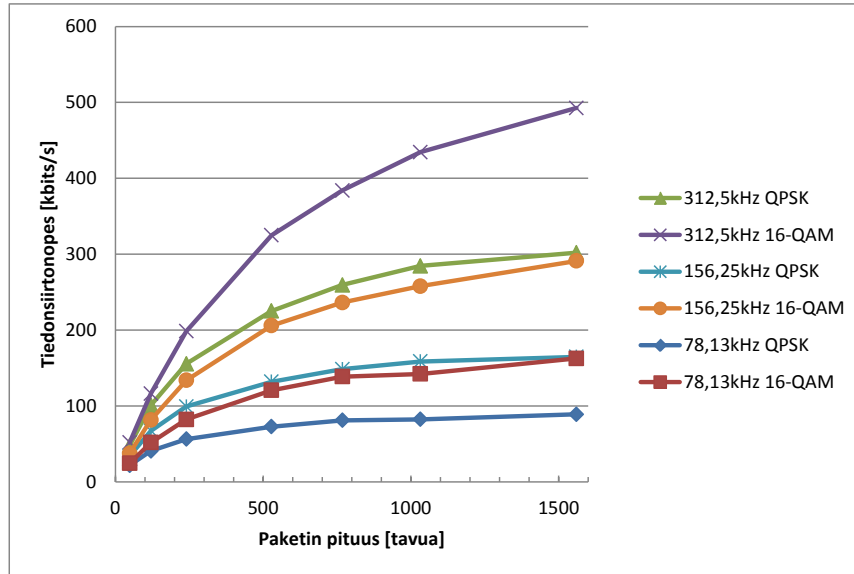


Kuva 4: Kantataajuisten mittauslaitteiston lohkokaavio.

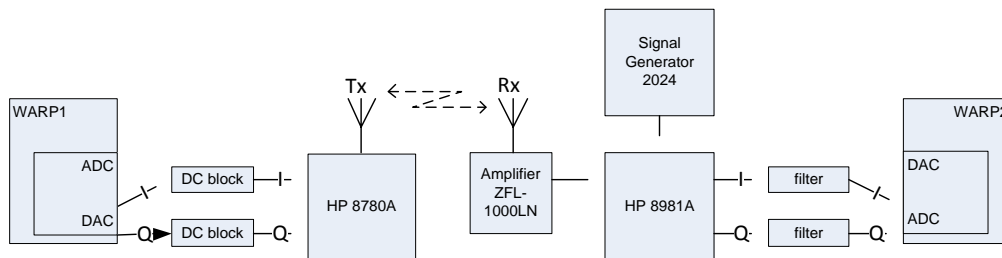
ii. HF-kantotaajuiset mittaukset

Siirryttäessä HF-kantotaajuudelle, tiedonsiirtoyhteys jouduttiin muuttamaan yksisuuntaiseksi. Kuvassa 6 on esitetty lohkokaavio mittauslaitteistosta, jossa HP 8780A vektorisignaali-generaattori hoitaa analogisten I ja Q haarojen sekoittamisen 30MHz:n kantotaajuudelle, josta signaali etenee lähetyksentennille. Antenneina käytettiin yksinkertaisia johtimen pätkiä, jotka mitoitettiin neljäsosa aallonpituiseksi eli 30MHz:n tapauksessa 2,5m mittaan. Antennit asetettiin laboratoriossa n. 70cm korkeuteen lattiasta vaakavaakatasoon ja 50cm:n etäisyydelle toisistaan yhdensuuntaisesti. Vastaanottoantennilta tulevaa signaalia vahvistettiin Mini-Circuits ZFL-1000LN vahvistimella 20 desibeliä, jonka jälkeen HP 8981A vektorimodulaatioanalyysointilaite sekoittaa signaalin takaisin kantotaajuudelle ja erottaa I ja Q haarat. Alassekoitusta varten tarvitaan vertailutaajuus joka voitaisiin ottaa lähetyksenmoduulista koherenttina, eli samanvaiheisena kuin ylössekoituksessa on käytetty. Todenmukaisemman tilanteen luomiseksi vertailutaajuuden luontiin käytettiin Marconi Instruments Signal Generator 2024:ää jolla luotiin 30MHz:n vertailutaajuus, joka ei ollut enää samanvaiheinen lähettimen kanssa. Alassekoitetut I ja Q signaalit vielä suodatettiin desimointikertoimesta riippuen 500kHz:n tai 200kHz:n suodattimilla. Desimointikertoimen ollessa 16 kaistanleveys on 312kHz, jolloin 500kHz:n suodatin oli käytössä.

tössä, muissa tapauksissa käytettiin 200kHz:n suodatinta. Tämän jälkeen signaali on valmis käsiteltäväksi vastaanottavan WARP-alustan AD-muuntimella.



Kuva 5: Fyysisen kerroksen datanopeus.



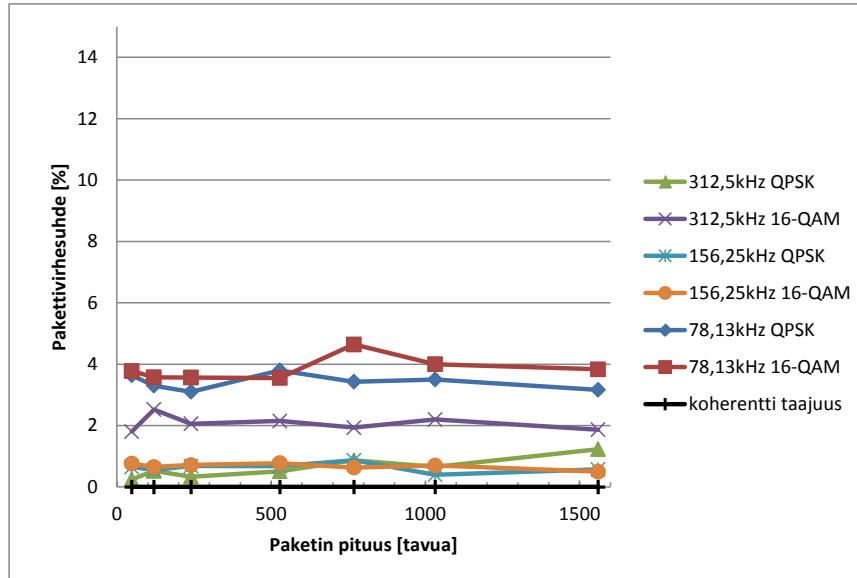
Kuva 6: HF-kantotaajuisen mittauslaitteiston lohkoakaavio.

HF-kantotaajuiset mittaukset suoritettiin samaan tapaan kuin kantataajuisetkin, lähettämällä MAC-kerroksella generoituja paketteja ja mittaamalla siihen kulunut aika sekä lasquemalla vastaanottimessa havaitut pakettivirheet. Koska lähetykseen kulunut aika mitattiin lähettimessä, datanopeus pysyy samana kuin kantataajuisissa mittauksissa Kuvassa 5. Pakettivirheillä on vaikutus vastaanotettuun datanopeuteen, kuitenkin pakettivirhehuhde oli melko alhainen, joten vastaanotettu datanopeus on hyvin lähellä lähetettyä. Mittauksissa havaittiin, että epäkoherentti vertailutaajuus aiheuttaa pakettivirheitä, pakettivirheet prosentteina on esitetty Kuvassa 7. Vertailun vuoksi tehtiin myös mittauksia joissa käytettiin lähettimeltä saatavaa koherenttia vertailusignaalia, jolloin pakettivirheitä ei havaittu.

iii. Kenttämittaukset

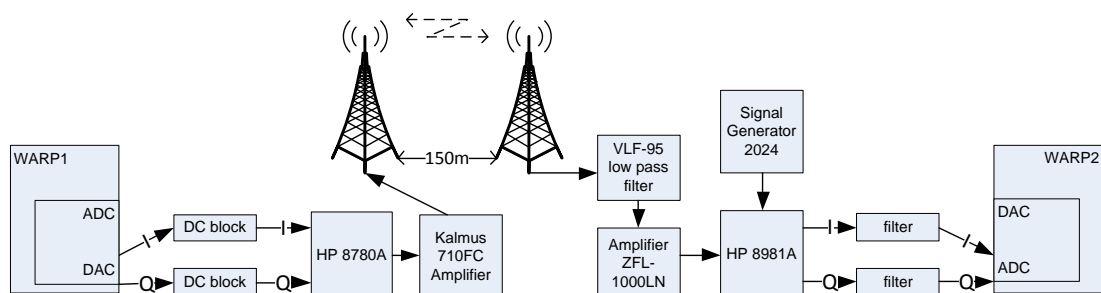
Laboratoriomittausten lisäksi järjestettiin kenttämittaukset, jotka suoritettiin Radio Arcalan antennimastoja käyttäen. Radio Arcala on amatööriradiokäyttöön vuonna 2003 rakennettu radioasema, joka sijaitsee n. 40km itään Oulun kaupungista, sen sijainti on valittu mittausten perusteella spektriltään puhtaaksi. Arcalan radioasema on rakennettu 20 hehtaarin alueelle, ja laitteisto kattaa aallonpituusalueen 10m – 160m, eli taajuudet 1,9MHz – 30MHz. Radioasema koostuu yhteensä seitsemästä antennimastosta, joista kahta käytettiin näissä kenttämittauksissa. Lähetykseen käytettiin kolmea 6 elementtistä monoband jagi antennia, vastaanotossa oli käytössä kuusi kappaletta 10 elementtistä tri-

banderia (JP2000), antennit olivat pinottuina 60m korkeisiin mastoihin. Mastojen etäisyys toisistaan oli n. 150m, ja antennit suunnattiin toisiaan kohti.



Kuva 7: Epäkoherentin vertailutaajuuden aiheuttamat pakettivirheet.

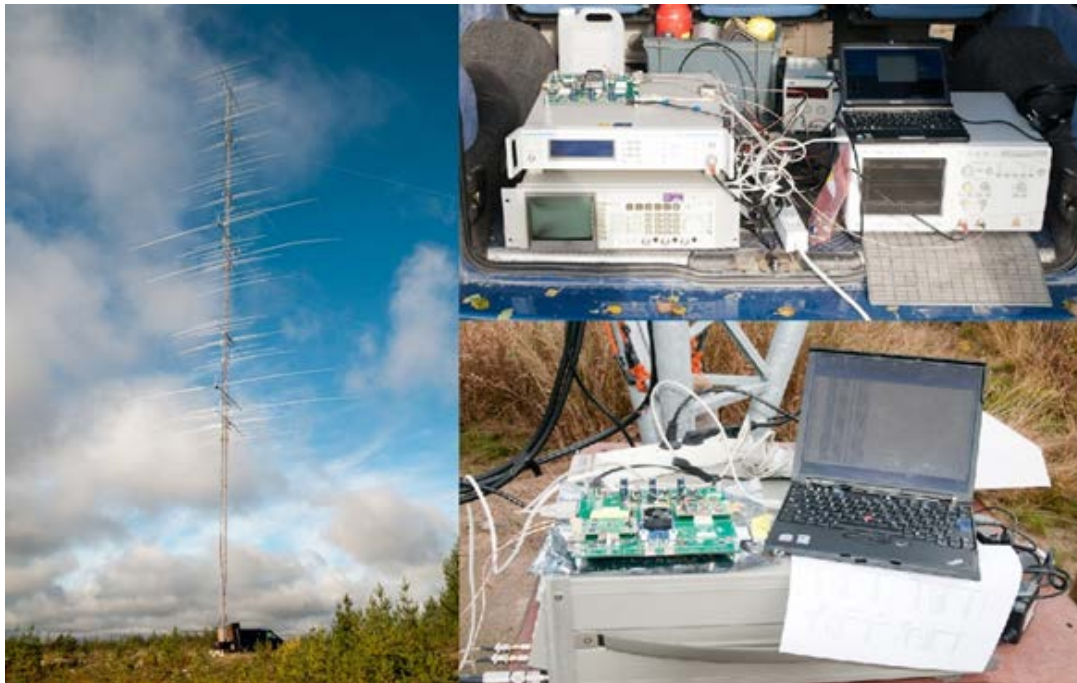
Mittauslaitteisto on esitetty Kuvassa 8, josta nähdään että laboratoriomittauksiin verrattuna laitteistoon tehtiin joitain muutoksia. Huomattavasti laboratoriomittauksia järeämpiä lähetyksentenneja ennen signaalia vahvistettiin Kalmus 710FC-vahvistimella. Vastaanottiin puolestaan lisättiin heti vastaanottoantennien jälkeen Mini Circuits VLF-95 alipäästösuodatin, jonka rajataajuus on 95MHz, eli sen tehtävänä oli vain poistaa häiriöitä huomattavasti kantotaajuutta korkeammilta taajuuksilta. Kuvassa 9 on esitetty valokuvia mittauslaitteistosta, kuvista puuttuu lähetyksenvahvistin ja lähetyksenantennit. Kuvissa esiintyviä kannettavia tietokoneita käytettiin ainoastaan WARP-alustan ohjaamiseen, eivätkä ne osallistuneet datan lähettämiseen.



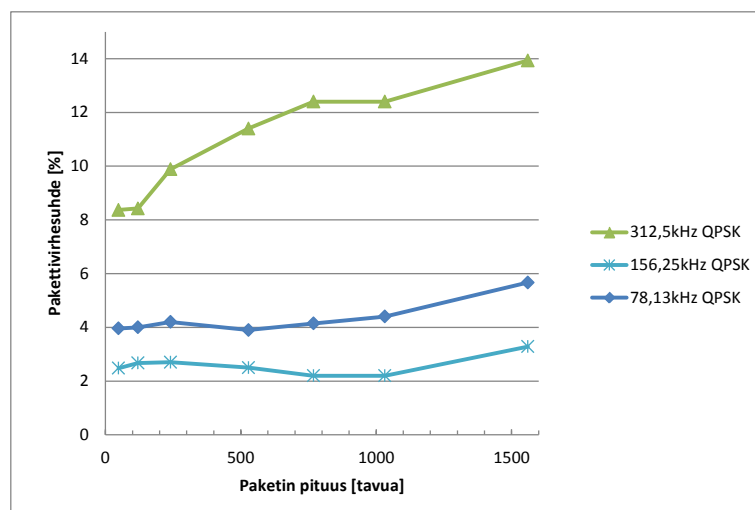
Kuva 8: Kenttämittauksissa käytetty järjestelmä.

Mittaukset suoritettiin fyysisen kerroksen mittauksista tutulla tavalla, joten mittauksissa tutkittiin ainoastaan syntyneitä pakettivirheitä. Pakettivirheprosentit on esitetty Kuvassa 10. Kuvasta nähdään että QPSK-modulaatiota käytettäessä pakettivirheitä syntyi hiukan enemmän kuin laboratorio-olosuhteissa. Pienimmällä desimointikertoimella eli leveimmällä kaistanleveydellä pakettivirheitä syntyy eniten, toiseksi eniten virheitä syntyy yllättäen kapeimmalla kaistanleveydellä, joten vähiten pakettivirheitä syntyy desimointikertoimen arvolla $N=32$. Tämä voidaan selittää käytetyllä suodatuksella, joka on parhaiten sovitettu keskimmaiselle desimointikertoimelle. Kuvassa näkyy myös trendi, jonka mukaan paketin koon kasvaessa pakettivirhesuhde hieman kasvaa. 16-QAM:ia käytettäessä pakettivirheprosentti kohosi huomattavan korkealle, tämän takia näitä tuloksia ei ole esitetty

kuvassa. Toteutetussa tiedonsiirtoketjussa suurin muutos laboratoriomittauksin verrattuna on siihen lisätty lähetinvahvistin, jonka lineaarisuus ei näyttäisi olevan riittävä, joten 16-QAM modulaatiomenetelmällä ei saavutettu kohtuullisia pakettivirhe arvoja.



Kuva 9: Kenttämittauksissa käytetty laitteisto, vastaanottoantennimasto (vasemmalla), vastaanotinlaitteisto (ylhällä) ja lähetinlaitteisto (alhaalla).



Kuva 10: Kenttämittauksissa havaitut pakettivirheet.

5. Loppupäätelmät

Työn tavoitteena oli toteuttaa demonstraattori jossa käytetään kehittyneitä aaltomuotoja HF-taajuusalueella. Kehittyneenä aaltomuotona käytettiin OFDM-aaltomuotoa, jota pysytettiin käyttämään käytännön kokeissa 30MHz:n kantotaajuudella. Virheettömyyden tiedonsiirto linkkiin päästiin laboratoriomittauksissa koherentissa tapauksessa, mutta täysin virheettömyyden tiedonsiirtoyhteyteen ei päästy kenttämittauksissa tai ilman koherenttia ver-



tailutaajuutta.

Työssä pystyttiin muuntamaan korkeammille kantotaajuuksille suunniteltu ohjelmistoradioalusta toimimaan HF-kantotaajuudella ja huomattavasti alkuperäistä kapeammalla kaistanleveydellä. Samalla kuitenkin joistain alustan toiminnallisuuksista jouduttiin luopumaan, ja tiedonsiirtokapasiteetista jouduttiin tinkimään. Mittauksissa todennettiin että laitteisto kykenee kuitenkin huomattavasti suurempaan tiedonsiirtonopeuteen kuin perinteisesti HF-alueella on totuttu näkemään.

Riippuen käytettävissä olevasta kaistanleveydestä, tiedonsiirtokapasiteetiksi saadaan jopa satoja kilotavuja sekunnissa. Suurilla tiedonsiirto nopeuksilla paketin keston täytyy olla lyhyt, tämä taas ei sovi suuren viivehajeen kanavaan. Eli pitkän matkan ionosfääriheijastuksia sisältävä kanava on toteutetulle järjestelmälle ongelmallinen. Kuitenkin pinta-aalto etenemistä käytettäessä viivehajeet ovat tarpeeksi pienet suurempien tiedonsiirtonopeuksien saavuttamiseksi. Tämä kuitenkin tarkoittaa samalla maantieteellisesti rajatumpaa, n. 60km:n, tiedonsiirtokattavuutta.

Tutkimuksen tavoitteena oli tutkia fyysisen kerroksen ominaisuuksia ja luoda pohjaa HF-taajuusalueen uusien aaltomuotojen kehitykselle. Tehdyn tutkimuksen pohjalta pystytään päättämään mitä OFDM-järjestelmän rajoituksia täytyy ottaa huomioon siirryttäessä käyttämään HF-alueen kantotaajuutta. Näistä tärkeimpinä täytyy huomioida korrelaatorin ja vaihekorjaimen toimivuus vastaanottimessa, sekä RF-osien soveltuvuus leveäkaistaisen signaalin käsittelyyn HF-taajuusalueella.

Kuitenkin jo tässä työssä kyettiin ohjelmistoradioalustaa käyttäen toteuttamaan toimiva tiedonsiirtojärjestelmä HF-taajuusalueelle. Aaltomuoto soveltuisi HF-taajuusalueelle pinta-aalto etenemistä hyväksi käyttäen. Jatkotutkimusta kuitenkin vaatisivat havaitut ongelmat paketinhavaitsemisessa, vaihevirheen korjaamisessa ja RF-osien epäideaalisuudet tällaisessa järjestelmässä.

6. Tutkimuksen tuottamat tieteelliset julkaisut ja muut mahdolliset raportit

Tämän raportin kirjoitus hetkellä tutkimuksesta ei ole tehty muita julkaisuja.