

TIIVISTELMÄRAPORTTI

Uuden sukupolven HF-kommunikaatiotekniikat

Markku Renfors, Tampereen teknillinen yliopisto, markku.renfors@tut.fi, +358 40 849 0752;
Lauri Anttila, Mika Korhonen, Juha Yli-Kaakinen, Tampereen teknillinen yliopisto;
Hannu Tuomivaara, Kyynel Oy

Tiivistelmä: Hankkeessa kehitettiin (i) fyysisen kerroksen algoritmiratkaisuja uuden sukupolven HF-laitteille, jotka perustuvat kehittyneeseen suodatinpankkipohjaiseen monikantoaalto-tekniikkaan, sekä (ii) linearisoituja tehovahvistinratkaisuja HF-lähettimiin. Uudet monikantoaaltotekniikat mahdollistavat nykyisiin ratkaisuihin verrattuna aiempaa joustavamman ja tehokkaamman epäjatkuvan spektrinkäytön. Linearisointi mahdollistaa annettujen spektrimas-
kien saavuttamisen paremmalla hyötysuhteella ja suuremmalla lähetysteholla.

1. Johdanto

Radiotietoliikenteessä monikantoaaltomenetelmät takaavat perinteisiä yksikantoaaltojärjestelmiä joustavamman spektrinkäytön, suuremman spektraalisen tehokkuuden, sekä paremman robustiuden kanavan häiriöitä tai tahallista häirintää vastaan. PVT02013 hankkeen Johtamisjärjestelmät projektin työpaketeissa TP30–TP31 tutkittiin modernia laajakaistaista HF-tietoliikennettä, tavoitteenaan tiedonsiirtolinkkien kapasiteetin ja luotettavuuden parantaminen vastaamaan puolustusvoimien operatiivisia tarpeita. Hankkeen pidemmälle tähtäävässä, tutkimuksellisessa osiossa selvitettiin alustavasti uusien, tehokaiden, taajuusselektiivisten suodatinpankkipohjaisten monikantoaaltomenetelmien soveltuvuutta HF-taajuusalueella tapahtuvaan tiedonsiirtoon. Hankkeen HF-tutkimuksen pääpaino oli kuitenkin perinteisen yksikantoaaltotekniikkaan perustuvan HF-aaltomuodon sovittaminen joustavaan, epäjatkuvaan spektrinkäyttöön datansiirtonopeuden kasvattamiseksi. Tässä yhteydessä kävi ilmeiseksi, että jo muutaman (4–8) alikaistan tapauksessa tämä tekniikka kohtaa lähettimen tehovahvistimen osalta jokseenkin samat haasteet (lineaarisen tehovahvistimen toteuttaminen kustannustehokkaasti ja hyvällä hyötysuhteella) kuin monikantoaaltotekniikat. HF-tekniikassa epäjatkuva spektrinkäyttö on keskeisessä roolissa tiedonsiirtokapasiteetin parantamisessa, ja tässä yhteydessä perinteisten yksikantoaaltojärjestelmien merkittävin etu suhteessa monikantoaaltotekniikoihin pienee/häviää.

2. Tutkimuksen tavoite ja suunnitelma

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli (i) kehittää uusia fyysisen kerroksen algoritmiratkaisuja suodatinpankkimenetelmiin perustuville monikantoaaltojärjestelmille, sekä (ii) kehittää linearisoituja tehovahvistinratkaisuja HF-lähettimiin.

Keskeisenä ongelmana HF-taajuusalueella tapahtuvassa tiedonsiirrossa on kanavakorjainratkaisun toiminta haastavissa HF-kanavissa (near vertical incidence skywave eli NVIS- ja avaruusaaltokanavissa). Ensimmäisenä päätavoitteena olikin parantaa kanavakorjainratkaisun toimivuutta vaikeissa HF-kanavissa, soveltamalla edistyneitä menetelmiä kanavan estimoimiseksi sekä taajuustason signaalinkäsittelyä kanavan ekvalisoimiseksi. Uusilla suodatinpankkijärjestelmillä voidaan tehokkaasti toteuttaa taajuustason kanavakorjaimia laajakaistaisille aaltomuodoille. Näiden tiedonsiirtoratkaisuiden etuina ovat myös mahdollisuus tehokkaaseen häiriöiden ja häirinnän hallintaan, hyvä spektrin lokalisaatio ja vas-

taanotinprosessoinnin selektiivisyys sekä mahdollisuus joustavaan epäjatkuvaan spektrinkäyttöön.

Aiemman tutkimuksen perusteella paras suorituskky erittäin vaikeissa HF-kanavissa saavutettiin käyttäen ns. filtered multitone eli FMT-aaltomuotoa. Tästä syystä FTM oli myös valittu keskeisimmäksi toteutusteknologiaksi kehitettävään simulointimalliin, muita toteutusteknologioita (suodatettu OFDM, FBMC/OQAM) kuitenkin poissulkematta. Tavoitteena oli hakea FMT-aaltomuodolle optimaaliset parametrit sekä tarkastella lisäkais-tanleveyden (roll-off) vaikutusta ko. aaltomuodon robustisuuteen käytetyillä HF-standardikanavamalleilla.

Monikantaaltojärjestelmien (mukaan lukien monikanavainen perinteisiin aaltomuotoihin perustuva epäjatkuva spektrinkäyttö) keskeisenä ongelmana on lähetteen huippu- ja keskitehon suhteen (peak-to-average power ratio, PAPR) kasvu, joka yhdessä tehovahvistimen epälineaarisuuksien kanssa aiheuttaa häiriötehon vuotamista viereisille alikais-toille sekä heikentää oman signaalin häiriö/kohina-suhdetta. Toisena pää tavoitteena oli kehittää tehokkaita tehovahvistimen linearisointimenetelmiä ja PAPR:in mitigointimenetelmiä HF-lähettimein sekä varmistaa näiden toimivuus HW-testausympäristössä. Tässä yhteydessä arvioidaan myös kehitettyjen menetelmien toteutettavuutta käytännön HF-radioissa.

3. Aineisto ja menetelmät

Tehtävässä T1 pyrittiin tutkimuksen ja simulointien avulla kehittämään sellaisia monikantaaltojärjestelmän kanavaestimointiin sekä kanavakorjaimeen liittyviä teknologisia ratkaisuja, joiden avulla HF-tiedonsiirron robustisuutta ja suorituskkyä voidaan parantaa monitie-edenneissä HF-kanavissa (NVIS- ja avaruusaallot). Tavoitteena oli pyrkiä ymmärtämään, mikä bittivirhesuhde on saavutettavissa, kun laskennalliselle kompleksisuudelle ei aseteta olennaisia rajoitteita. Tämä käsitti seuraavat alitehtävät:

1. Toteutettiin MATLAB-ympäristössä FMT-aaltomuoto käytettävissä olevaan linkkitason HF-simulaatiomalliin sekä varmennettiin simuloinneilla toteutuksen toiminta ja suorituskky.
2. Optimoitiin FMT-aaltomuoto taajuusvasteen, häiriövaimennuksen ja toteutuksen kompleksisuuden kannalta. Työkaluina tässä vaiheessa olivat multirate-suodattimien ja suodatinpankkien optimointimenetelmät ja mallinnustyökalut. Vertailtiin lisäkaistanleveyden vaikutusta aaltomuodon robustisuuteen.
3. Suoritettiin kanavan estimointialgoritmin sekä aika- ja taajuustason kanavakorjainalgoritmien kehitys olemassa olevia HF-kanavamalleja hyödyntäen. Haettiin estimointialgoritmeille luotettavat perusasetukset kattavien simulointien avulla. Vertailtiin eri algoritmien suorituskkyä.
4. Toteutettiin suodatettu OFDM-aaltomuoto käyttäen tehokasta taajuustason prosessointia. Optimoitiin käytettävä prototyyppisuodin. Vertailtiin syklisen jatkeen vaikutusta sekä perus- että suodatetun OFDM-aaltomuodon suorituskkyyn. Toteutettiin suodatuksen rajoittavan tehokkaasti OFDM:n spektraalista vuotoa suorituskkyyn heiketessä ainoastaan hyvin vähän.
5. Toteutettiin nopeaan konvoluutioon perustuvat FMT sekä FBMC/OQAM-aaltomuotojen prosessointiratkaisut linkkitason simulaatiomalliin. Vertailtiin eri toteutusten suorituskkyä, laskennallista kompleksisuutta sekä konfiguroitavuutta.
6. Tehtiin johtopäätökset sekä kirjattiin ja julkaistiin tulokset.

Tehtävässä T2 kehitettiin HF-lähettimeen tehovahvistimeen liittyviä signaalinkäsittely-

menetelmiä. Aiemman tutkimuksen perusteella pidimme parhaana lähestymistapana verraten yksinkertaisen PAPR:in pienennysmenetelmän ja digitaaliseen esisäröytukseen (digital predistortion, DPD) perustuvan linearisointimenetelmän yhdistelmää. Tehtävä T2 sisältää seuraavat alitehtävät:

1. PAPR:n hallintamenetelmien osalta ajatuksena oli testata aiemmin PVT02013-hankkeessa tutkittuja menetelmiä (ikkunoitu verhoikäyrän piikkien leikkaus, peak windowing, sekä partial transmit sequences eli PTS-menetelmä) yhdessä DPD:n kanssa erityisesti epäjatkuissa spektrinkäyttötilanteissa. Tehovahvistimen mallinnuksen yhteydessä todettiin kuitenkin, että epäjatkuva spektrinkäyttöä ei päästä kunnolla testaamaan käytössä olevan lähetinkonfiguraation kaistarajoituksesta johtuen. PAPR:n hallintamenetelmillä ei ole merkittävää hyötyä yksittäisen yksikantaaltolähetteen tapauksessa, joten PAPR:n hallintamenetelmien tutkiminen yhteydessä jäi jatkotyön aiheeksi.
2. Selvitettiin HF-kommunikaatioon sopiva tehovahvistimen toiminnallinen simulointimalli.
3. Optimoitiin ja testattiin valittuun tehovahvistinmalliin sopiva DPD-algoritmi simulointien avulla.
4. Testattiin kehitettyä tehovahvistinratkaisua TTY:n RF-laboratoriossa käyttäen todellista HF-tehovahvistinmoduulia.

Tehovahvistimen mallinnus ja testaus perustui Kyynel Oy:n CNHF-radioon, johon syötettiin Matlab-ympäristössä generoituja testisignaaleita ja tehovahvistimen lähtösignaalia havainnoitiin vektorisignaalianalysaattorilla.

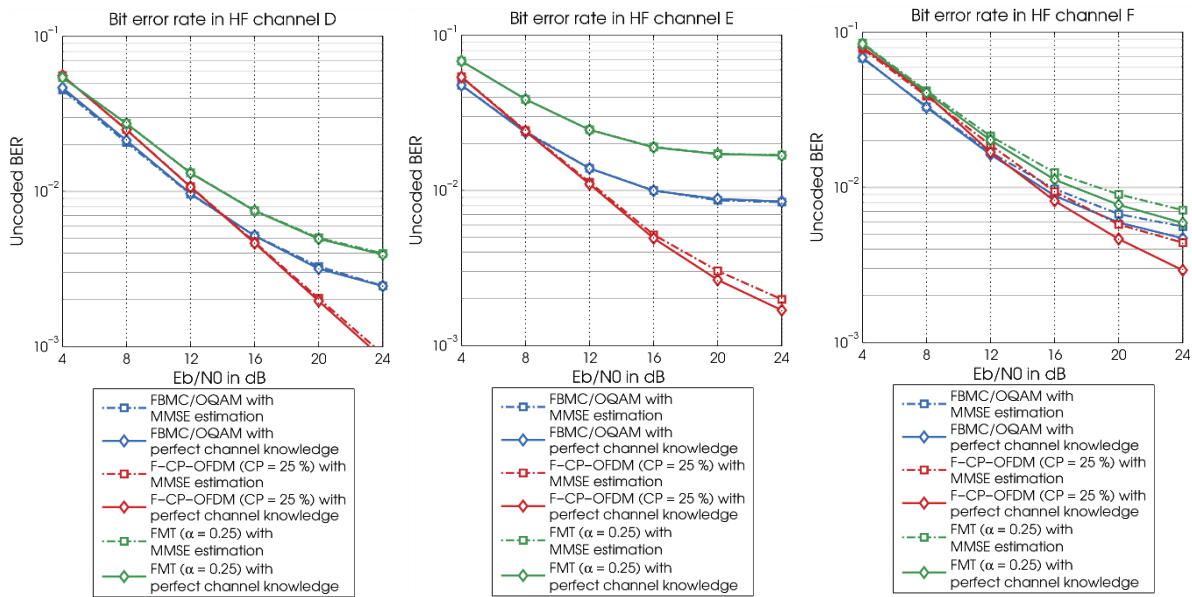
4. Tulokset ja pohdinta

Tehtävässä T1 saavutettiin seuraavat tulokset:

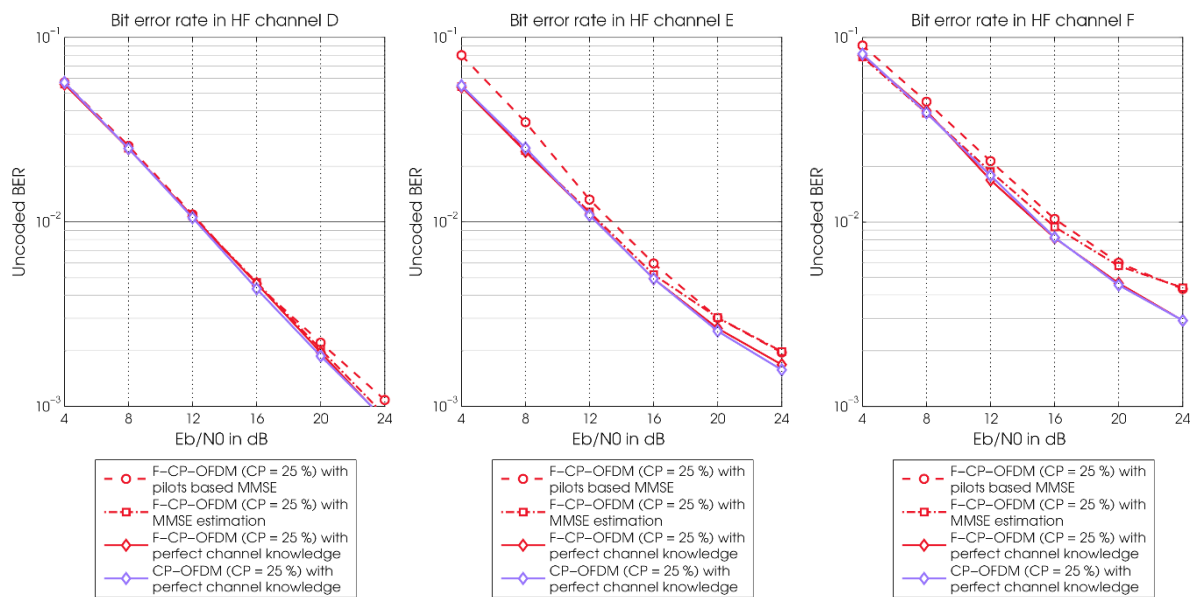
- Paras suorituskky erittäin haastavissa kanavissa saavutettiin OFDM aaltomuodolla, tosin syklisen jatkeen tulee tällöin olla lähes neljännes symbolin pituudesta. Kun OFDM aaltomuotoa suodatetaan hyvän spektraalisen lokalisaation saavuttamiseksi, suorituskyyssä ei havaittu merkittävää heikkenemistä.
- FMT:n lisäkaistanleveyden pienentäminen heikensi merkittävästi aaltomuodon suorituskkyä ja OFDM aaltomuotoon verrannollisella spektraalisella tehokkuudella (lisäkaistakertoimen ollessa enintään 0,25) suorituskky ei ole riittävä.
- FBMC/OQAM:n suorituskky on lähes yhtä hyvä kuin OFDM:n myös haastavimmissa kanavissa. Tällöin voidaan odottaa, että FBMC/OQAM saavuttaa parhaimman suorituskyyyn, jos maksimaalista spektraalista tehokkuutta hyödynnetään koodauksen avulla.
- Kanavakorjaimen suorituskkyä testattiin tapauksissa, joissa (i) kanava oli täysin tunnettu, (ii) kanava oli täysin tunnettu ainoastaan pilottisymbolien kohdalla, sekä (iii) kanavan estimaatti pilottisymbolien kohdalla laskettiin vastaanotettujen pilottisymbolien perusteella. Kanavaestimaattorina kahdessa jälkimmäisessä tapauksessa käytettiin lineaariseen interpolointiin perustuvaa estimaattoria sekä pienimmän keskineliövirheen (minimum mean-square error, MMSE) estimaattoria. MMSE estimaattorin suorituskyyyn havaittiin olevan tapauksissa (ii) lähes yhtä hyvä kuin tapauksessa (i). Tapauksessa (iii) suorituskky heikkenee jonkin verran. Lineaariseen interpolointiin pohjautuvan estimaattorin toiminta taas todettiin täysin riittämättömäksi.
- OFDM:n tapauksessa riittävä suorituskky saavutettiin yksikertoimisella alikanava-

korjaimella. FBMC/OQAM:n ja FMT:n tapauksessa toisen kertaluvun korjain oli tyypillisesti riittävä, mutta haastavimmissa kanavissa neljännen kertaluvun korjaimen käyttäminen paransi edelleen suorituskkyä.

- Taajuustason korjaimella saavutettiin parempi suorituskky kuin aikatazon prosessointiin perustuvalla korjaimella. Tällöin korjaimen kertoimien määrittäminen oli myös joustavampaa.
- Nopeaan konvoluutioon perustuva prosessointiratkaisu mahdollistaa joustavamman konfiguroinnin kuin polyphase-FFT rakenteisiin perustuvat prosessointiratkaisut. Tällöin myös taajuustason kanavakorjain- sekä kanavointiprosessointi voidaan yhdistää.



Kuva 1: Simuloitu bittivirhesuhde FBMC/OQAM, filtered OFDM, ja FMT-aaltomuodoille HF-kanavissa D, E ja F kun kanava on tunnettu sekä tapauksille joissa kanava on estimoitu pilottisymbolien kohdilla tunnetun kanavan vasteen avulla käyttäen MMSE-estimaattoria.



Kuva 2: Simuloitu bittivirhesuhde OFDM ja filtered OFDM aaltomuodoille HF kanavissa D, E ja F kun kanava on tunnettu sekä tapauksille joissa kanava on estimoitu käyttäen MMSE estimaattoria joko pilottisymbolien kohdilla tunnetun kanavan vasteen avulla tai käyttäen pilottisymbolien avulla määriteltyä vastetta.

Tehtävän 2 osalta mallinnustulosten perusteella DPD-malliksi valikoitui muistiton polynomimalli. Oppimistekniikkana käytettiin TTY:llä kehitettyä dekorrelaatioon perustuvaa algoritmia. Hyvyytlukuina käytettiin virhevektorin pituutta (EVM), joka mittaa hyöty-signaalin laatua, sekä viereisen kanavan tehosuhdetta (ACPR), joka mittaa viereisen kanavan häiriöiden suuruutta. Lisäksi tehospektriä verrattiin MIL-STD-188-141C spektrimaskiin. Testisignaaleina käytettiin BPSK, 8-PSK ja 256-QAM -signaaleita 6 kHz kaistanleveydellä.

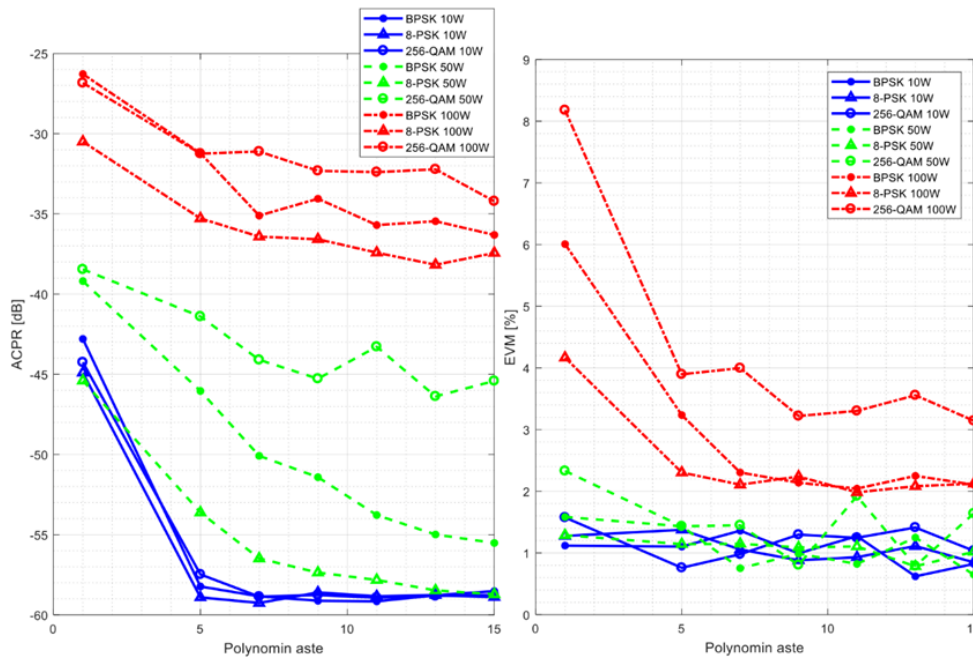
Tehtävän T2 päätulokset:

- Mallinnettiin Kyynel Oy:n CNHF-radion tehovahvistin RF-laboratoriomittauksin, toimintataajuuksilla 4, 12 ja 25 MHz. Radion nimellisteho on 50 W. Mallinnus suoritettiin muistipolynomimallilla, varioiden polynomiastetta (3–19) ja muistin syvyyttä (0–5). Hyvyytlukuina käytettiin normalisoitua keskineliövirhettä (NMSE) ja viereisen kanavan virhetehosuhdetta (ACEPR). Signaalina käytettiin 6 kHz BPSK-signaalia, ja lähetystehona 100 W, jotta vahvistin saatiin toimimaan reilusti epälineaarilla alueella.
- Mallinnus osoitti, että lähettimen tehovahvistin on oleellisesti muistiton käytetyllä signaalikaistanleveydellä. Muistittomalla polynomimallilla NMSE-arvoksi saatiin parhaimmillaan –47...–52 dB, riippuen toimintataajuudesta, mitä voidaan pitää erittäin hyvänä mallinnustuloksena. Mallinnustulosten perusteella DPD-malliksi valikoitui muistiton polynomimalli.
- DPD paransi lineaarisuutta ja erityisesti ACPR:ää huomattavasti 10 W ja 50 W lähetystehoilla kaikilla toimintataajuuksilla. Kuva 3 näyttää ACPR- ja EVM-tulokset 25 MHz:n kaistalla. Esimerkiksi BPSK-modulaatiolla 50 W teholla, ACPR parani –39 dBc:stä –55 dBc:iin. DPD paransi ACPR:ää myös 100 W teholla, mutta parannus oli vaatimattomampaa. Tällä teholla sekä tehovahvistin että digitaalinen etupää satureituivat, joten kovin hyvää linearisointitulosta ei ole mahdollista saavuttaa edes teoriassa.
- Tästä huolimatta EVM-tulokset paranivat selvästi 100 W teholla, parhaimmillaan noin 8 %:sta 3 %:iin (256-QAM @25 MHz). 10 ja 50 W tehoilla EVM oli hyvällä tasolla (<2 %) jo ilman linearisointia, joten näillä tehoilla havaittiin vain pientä parannusta. %:sta 3 %:iin (256-QAM @25 MHz). 10 ja 50 W tehoilla EVM oli hyvällä tasolla (<2 %) jo ilman linearisointia, joten näillä tehoilla havaittiin vain pientä parannusta.

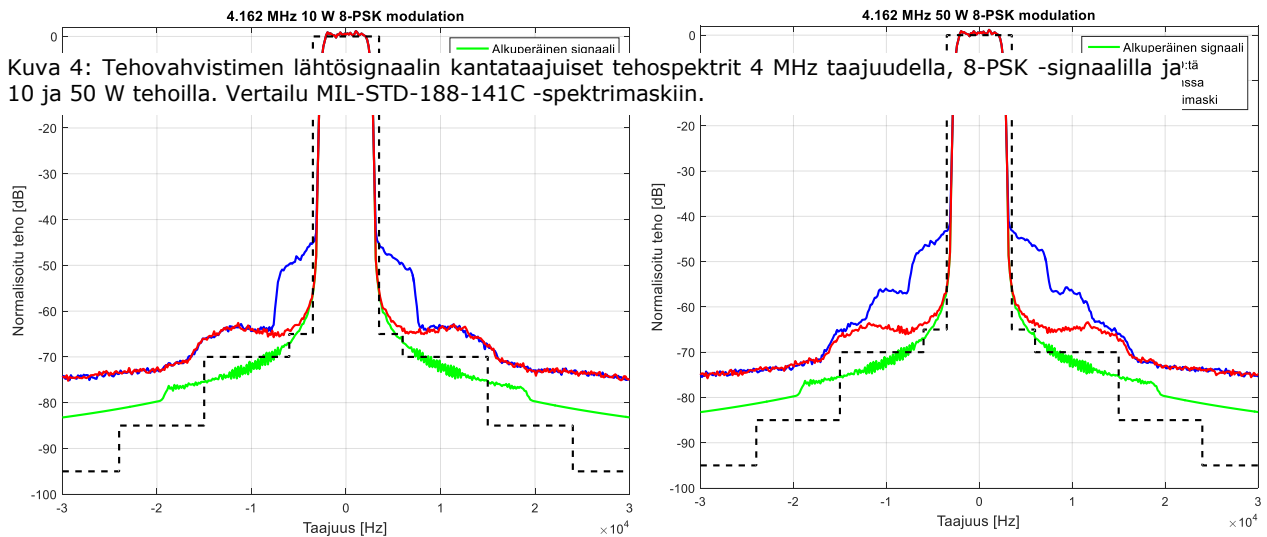
MIL-STD-188-141C -spektrimaski on erittäin tiukka, ja osoittautui liian haastavaksi mitattulle järjestelmälle. Kuva 4 näyttää esimerkit 4 MHz kaistalta 8-PSK -modulaatiolla, lähetystehoilla 10 ja 50 W. Tämä maski on täytettävissä, mutta se vaatisi lähettimen ja mitausjärjestelmän uudelleensuunnittelua, erityisesti kaistanleveyden mutta mahdollisesti myös resoluution suhteen. Käytetyn lähettimen kaista oli rajoitettu n. 48 kHz:iin, ja tämä määrittää suoraan kaistanleveyden mikä voidaan linearisoida. Muisti-ilmiöiden huomioon ottaminen DPD:ssä saattaisi myös tulla tarpeeseen. Tämän projektin puitteissa järjestelmän uudelleensuunnitteluun ei ollut resursseja. On syytä myös mainita, että mittaustulokset eivät vastaa käytetyn radiolaitteen normaalia testaustilannetta mm. testisignaalin generoinnin osalta (myöskään digitaalisen kantataajuuden signaalin spektri ei noudata maskin vaatimuksia).

Kuva 5 esittää mittaustuloksen epäjatkuvan spektrin tapauksessa. Tässä esimerkissä on kaksi 3 kHz 8-PSK -signaalia 6 kHz etäisyydellä toisistaan 25 MHz kaistalla. Lähetysteho on 10 W. Epäjatkuvan spektrin tapauksessa kantoaaltojen ristimodulaatiosäröt ovat ongelmallisimpia, koska ne voivat olla korkealla tasolla melko kaukanakin itse kantoaalloista jo pienillä lähetystehoilla. Kuvan 5 esimerkissä erityisesti kantoaaltojen 3:n asteen ristimodulaatiot, taajuuksilla ± 9 kHz, ovat voimakkaita ilman esisäröytystä, mutta esisäröy-

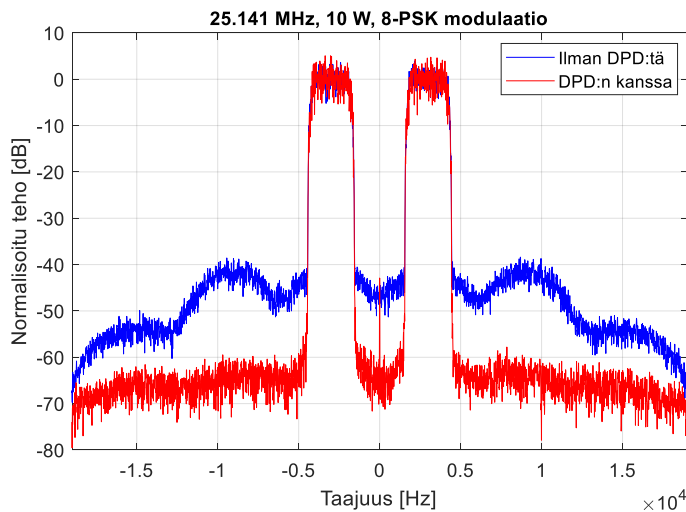
tyksen kanssa nämä vaimenevat yli 20 dB.



Kuva 3: Linearisoidun vahvistimen ACPR-kuvaajat (vas.) ja EVM-kuvaajat muistittomalla polynomimallilla 25 MHz toimintataajuudella.



Kuva 4: Tehovahvistimen lähtösignaalin kantataajuiset tehospektrit 4 MHz taajuudella, 8-PSK -signaalilla ja 10 ja 50 W tehoilla. Vertailu MIL-STD-188-141C -spektrimaskiin.



Kuva 5: Tehovahvistimen lähtösignaalin kantataajuiset tehospektrit kahden kantoaallon tapauksessa 25 MHz taajuudella, 8-PSK -signaaleilla ja 10 W teholla.

5. Loppupäätelmät

Tehtävän T1 perusteella voidaan tehdä seuraavat johtopäätökset:

- FMT:n heikko suorituskky haastavissa kanavissa oli pettymys, joten näissä tapauksissa tullaan jatkossa keskittymään suodatettuun OFDM sekä FBMC/OQAM aaltomuotoihin.
- Näillä menetelmillä voidaan saavuttaa luotettava tiedonsiirtokky myös haastavimmilla HF-kanavamalleilla, mikä on erittäin vaikeaa perinteisiä yksikantaalto-tekniikoita käytettäessä.
- Adaptiivisten tai iteratiivisten (kuten Kalman suodatin) menetelmien vaikutus suorituskkyyn tulisi selvittää.
- Tutkimuksessa käytettyyn kanavaestimaattoriin liittyi vielä tiettyjä yksinkertaisuuksia, joten suorituskvyn verifiointi käytännön toteutukseen sopivilla algoritmeilla ja kanavakoodausta käyttäen jää vielä tehtäväksi. Suorituskkyvertailussa FBMC/OQAM aaltomuodon odotetaan ylittävän suodatetun OFDM:n. Toisaalta OFDM:n etuna on kanavaekvalisoinnin ja synkronointitoimintojen robustisuus ja yksinkertaisemmat toteutusalgoritmit. Näitä vaihtoehtoja on tarpeen vertailla myös HW-toteutettavuuden kannalta.

Tehtävän T2 tuloksista voidaan tehdä seuraavat johtopäätökset:

- Mitattu tehovahvistin todettiin oleellisesti muistittomaksi käytetyllä signaalikaistanleveydellä. DPD-malliksi valittiin tämän perusteella muistiton polynomimalli.
- Linearisointi toimi hyvin kaikissa muissa tapauksissa paitsi täydellä 100 W teholla. Tehovahvistimen ja lähettimen digitaalisen etupään saturaatio, sekä lähettimen rajallinen kaistanleveys, rajoittavat saavutettavaa lineaarisuutta, erityisesti täydellä teholla.
- Vertailu MIL-STD-188-141C -spektrimaskiin osoitti, että saavutettu lineaarisuus ei ole riittävä täyttämään tätä maskia. Lähettimen kaistanleveyden laajentaminen ja resoluution parantaminen on tarpeen tämän spektrimaskin saavuttamiseksi. Tehovahvistimen muisti-ilmiöiden huomioon ottaminen saattaa myös olla tarpeellista,

koska DPD:n tarkkuudelle on tämän maskin tapauksessa erityisen suuret vaatimukset. Suurimmat teholumemat (~ 100 W) ovat kyseisellä laitteistolla saavuttamattomissa lähettimen saturaation vuoksi, mutta pienemmillä tehoilla MIL-STD-188-141C -spektrimaskin saavuttaminen on mahdollista, jos edellä mainitut rajoitteet korjataan.

- Mittausjärjestelyn kaistarajoituksesta johtuen DPD toimintaa epäjatkuvan spektrinkäytön tilanteissa ei voitu laajamittaisesti testata, kuten ei myöskään PAPR:n hallintamenetelmien hyödyntämistä näissä tilanteissa. Alustavat tulokset (Kuva 5) kuitenkin osoittavat, että DPD:llä on suuri potentiaali epäjatkuvan spektrinkäytön tilanteissa.
- Yllä mainittujen lisäksi, yksi erittäin mielenkiintoinen jatkotutkimuksen aihe HF-lähettimen suunnittelussa on tehovahvistimen harmonisten säröjen korjaaminen/suodattaminen, ja kuinka tätä voisi toteuttaa adaptiivisella DPD:llä kiinteiden suodattimien sijaan.

6. Tutkimuksen tuottamat tieteelliset julkaisut ja muut mahdolliset raportit

FMT, FBMC/OQAM ja CP-OFDM -järjestelmien suorituskykyä HF-kanavissa on vertailtu julkaisussa [1]. Lisäksi esitetään CP-OFDM -menetelmästä toteutettu paremman spektraalisen lokaalisaation omaava suodatettu OFDM-aaltomuoto. Tässä julkaisussa FBMC/OQAM ja FMT-aaltomuodot on toteutettu polyphase-FFT rakenteita käyttäen. Kanavaekvalisaattori on OFDM:n tapauksessa perinteinen yhden alikantoaaltokertoimen omaava taajuustason ekvalisaattori tai FBMC/OQAM:n tai FMT:n tapauksessa kompleksinen joko toisen tai neljännen kertaluvun FIR (finite-impulse response) suodatin. Suodatetun OFDM-aaltomuodon kanavointiprosessointi on toteutettu nopeaan konvoluutioon perustuvalla suodatinpankilla. Suorituskykyvertailut on simuloitu siten, että kanavan vaste on joko tunnettu tai kanavan vaste on estimoitu pilottisymbolien perusteella. Estimointimenetelminä on käytetty lineaarista tai pienimmän keskineliövirheen (minimum mean-square error, MMSE) estimaattoria. Paras suorituskyky on saavutettu CP-OFDM -menetelmällä, tosin ero FBMC/OQAM-menetelmään on varsin pieni. Lisäkaistakertoimen (roll-off factor) on todettu vaikuttavan FMT:n suorituskykyyn merkittävästi, mutta mielekkäillä lisäkaistakertoimen arvoilla suorituskyky jää vertailluista aaltomuodoista heikoimmaksi. Lisäksi suodatetun OFDM-järjestelmän suorituskyky ei merkittävästi eroa perus-OFDM-järjestelmän suorituskyvystä. FBMC/OQAM-menetelmän suurempaa spektraalista tehokkuutta voidaan koodauksen avulla käyttää parantamaan suorituskykyä. MMSE-estimaatin avulla ekvalisoidun järjestelmän suorituskyvyn on todettu vastaavan erittäin hyvin tapausta, jossa kanavan vaste on tunnettu, kun taas lineaarisen kaksiulotteisen estimaattorin suorituskyky on todettu riittämättömäksi haastavissa HF-kanavissa.

Nopean konvoluutioon avulla toteutettujen FMT, FBMC/OQAM ja CP-OFDM -järjestelmien suorituskykyä ja kompleksisuutta vertaillaan julkaisussa [2]. Lisäksi tässä julkaisussa vertaillaan aika- ja taajuustason ekvalisaattorien suorituskykyä HF-kanavissa. FMT-menetelmän suorituskyvyn on todettu paranevan merkittävästi siirryttäessä taajuustason ekvalisointiin, johtuen aikatasen ekvalisaattorin kompleksisuudesta pienillä lisäkaistakertoimen arvoilla sekä ekvalisaattorikertoimien estimoinnin haastavuudesta.

Tieteelliseen lehtiartikkeliin [3] on tavoitteena koota yhteen kaikki tutkimuksen aikana saavutetut tulokset, sekä analysoida tuloksia tarkemmin kuin konferenssijulkaisujen puitteissa on mahdollista.

Linearisointitutkimuksen osalta voidaan yleisesti todeta, että HF-järjestelmiä koskevia julkaisuja on avoimessa kirjallisuudessa erittäin vähän. Linearisointiratkaisusta onkin valmisteilla konferenssipaperi [4], missä tarkastellaan HF-lähettimen lineaarisuutta ylei-

sesti, ja laajennetaan tähän mennessä saatuja linearisointituloksia monikantoaalto-tapaukseen. Lisäksi Mika Korhonen teki diplomityönsä tästä aihepiiristä [5]. Työhön sisältyy kirjallisuuskatsaus tehovahvistimien mallinnuksesta ja linearisointimenetelmistä, yksityiskohtainen kuvaus suoritetuista mittauksista, sekä yksityiskohtaiset tulokset eri taajuuksilla (4, 12 ja 25 MHz), eri tehotasoilla (10, 50 ja 100 W) ja eri modulaatioilla (BPSK, 8BPSK, 256QAM) suoritetuista mittauksista.

[1] J. Yli-Kaakinen, J. Alhava, M. Renfors, and H. Tuomivaara. "Multicarrier waveform optimization for HF communications," submitted to IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Barcelona, Spain, Apr. 15–18, 2018.

[2] J. Yli-Kaakinen, J. Alhava, M. Renfors, and H. Tuomivaara. "Fast-convolution based multicarrier waveform processing for HF communications," to be submitted to International Conference on Military Communications and Information Systems (ICMCIS), Warsaw, Poland, May 22–23, 2018.

[3] J. Yli-Kaakinen, J. Alhava, M. Renfors, and H. Tuomivaara. "Multicarrier waveform processing for HF communications," to be submitted to IEEE Transaction on Circuits and Systems-I, 2018.

[4] L. Anttila, M. Korhonen, M. Renfors, and H. Tuomivaara, "HF transmitter linearity and linearization with multicarrier waveforms," to be submitted to International Conference on Military Communications and Information Systems (ICMCIS), Warsaw, Poland, May 22–23, 2018.

[5] M. Korhonen, HF-taajuusalueen tehovahvistimen linearisointi, Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, 2017.
