

TIIVISTELMÄRAPORTTI

Kanavamittaus moderneja laajakaistaisia HF- järjestelmiä varten

**Harri Saarnisaari, Oulun Yliopisto/CWC, harri.saarnisaari@ee.oulu.fi, +358-405727803; Veikko Hovi-
nen, Oulun Yliopisto/CWC, Hannu Tuomivaara, Kyynel Oy; Juha Yli-Kaakinen, Jukka Rinne, Markku
Renfors, Tampereen teknillinen yliopisto**

Tiivistelmä: Hankkeessa selvitettiin mittaamalla (high frequency) HF-radiokanavan laatua Suomen sisäisessä tietoliikenteessä linkkivälien ollessa lyhyitä, maksimissaan muutamia satoja kilometrejä. Tarkemmin sanottuna selvitettiin, mikä on "hyvien" yhden etenemistien kanavien osuus kaikista löytyneistä käytettävissä olevista kanavista. Nämä kanavat soveltuvat nopeaan HF-tiedonsiirtoon. Mittaukset suoritettiin useilla 200 kHz kaistoilla kanava kerrallaan koko HF-alueella. Tulosten mukaan pinta-aaltoyhteydet ovat lähes aina yksitiekanaavia ja lisäksi saatavilla on useita rinnakkaisia kanavia, mikä mahdollistaisi normaalia 3 kHz suuremmat kaistanleveydet. Tulosten mukaan (near vertical incidence skywave) NVIS-yhteyksillä löytyy aina myös yksitiekanaavia, mutta usein kanavat ovat monitiekanaavia. Tulosten perusteella HF-yhteydenmuodostuksessa (Suomen oloissa) kannattaisi etsiä vapaita yksitiekanaavayhteyksiä, jotka mahdollistavat nopeammat yhteydet. Tämä tarkoittaisi, että nykyistä yhteydenmuodostusprosessia olisi muokattava siten, että muutamien taajuuksien sijaan tarkasteltaisiin satoja taajuuksia, joka on nykyteknologian avulla mahdollista. Myös leveäkaistaiset HF-yhteydet ovat mahdollisia.

1. Johdanto

HF-yhteyksiä on käytetty pitkän matkan tietoliikenteeseen; useiden tuhansien kilometrien matkoille. Niitä voi käyttää myös lyhyille muutamien kilometrien etäisyyksille, jolloin puhutaan pinta-aaltoyhteyksistä signaalin etenemistavan mukaan. Suuntaamalla signaalit suoraan ylöspäin saavutetaan muutamien satojen kilometrien kantama NVIS-etenemisen kautta.

HF-tiedonsiirron eräs ongelma on tiedonsiirron nopeus, joka on parhaimmillaan joitakin kilobittejä sekunnissa. Nopeampaan tiedonsiirtoon on perinteisesti pyritty käyttämällä suurempia modulaatioaakkostoja eli kahden bitin (BPSK) sijaan lähetetään parhaimmillaan jopa kahdeksan bittiä kanavasymbolia kohti (256QAM). Tämäkään ei ole helppoa, jos kyseessä on monitiekanaava, jollaisia käytetyt HF-radiokanavat usein ovat. Sitten nopeutta on ehdotettu parannettavan kaistanleveyttä kasvattamalla ja/tai käyttämällä useaa erillistä kanavaa yhtä aikaa. Ensimmäisestä vaihtoehdosta on esitetty standardi MIL-STD-188-110B, joka kuvaa $N \times 3$ kHz kaistanleveydet aina 24 kHz asti. Suomessa tätä kehitystä edustaa Kyynel Oy:n CNHF-radio. Jälkimmäistä kehitystä edustaa Thales HF XL-radio. Maailmalla suoritettujen kanavamittaukset antavat ymmärtää, että kovin laajoja kaistanleveyksiä ei kuitenkaan välttämättä ole saatavilla.

HF-tiedonsiirron toinen ongelma on HF-radiokanaava. Sen tila riippuu vuorokauden ja vuoden ajasta, jopa vuosista auringon aktiivisuuden mukaan. Perinteisesti on pyritty ennustamaan milloin ja missä mikin HF-taajuus on käytettävissä ja vastaavasti on mitattu HF-taajuuden/taajuuksien saatavuutta (% ajasta). Toinen radiokanavaa kuvaava suure on sen laatu: muiden muassa se onko kanava yksitiekanaava vai monitiekanaava, joista tässä yhteydessä on kiinnostuttu. Kansainvälinen televiestintäliitto ITU ja eritoten sen radiotieviestintäsektori (ITU-R) on esittänyt referenssikanavamalleja HF-radioiden testaukseen. Nämä sisältävät sekä yksitiekanamallin että monitiemalleja ja kuvaavat myös Doppler-hajetta ja

Postiosoite	Käyntiosoite	Puhelin	s-posti, internet
Postadress	Besöksadress	Telefon	e-post, internet
Postal Address	Office	Telephone	e-mail, internet
MATINE/Puolustusministeriö	Eteläinen Makasiinikatu 8 A	Vaihde 295 160 01	matine@defmin.fi
PL 31	00130 Helsinki		www.defmin.fi/matine
FI-00131 Helsinki	Finland		
Finland			

–taajuuseroa. Laatu mittaavia julkaisuja ei ole runsaasti, mutta ne indikoivat, että HF-kanava on monitiekanava.

Viimeinen tähän tutkimukseen liittyvä taustatieto on HF-radioiden välinen yhteydenmuodostus. Nykyinen automaattinen menettely (ALE, automatic link establishment, sen versiot 2G ja 3G) käyttävät ensisijassa muutamaa ennalta valittua taajuutta ja valitsee niistä sen, jolla yhteys on riittävä perustuen kättelyprosessissa mitattuun bittivirhearvioon. Menettely sallisi satojenkin taajuuksien käytön, mutta se hidastaisi prosessia. Lisäksi, jos valittujen taajuuksien joukosta ei löydy toimivaa, niin yhteydenmuodostus on hyvin hidas. Nykyteknologia mahdollistaisi satojen kanavien, jopa koko HF-alueen läpikäymisen yhteydenmuodostusprosessissa mikä yhdistettynä kanavan laadun mittaukseen todennäköisesti tarkoittaisi parempia yhteyksiä.

2. Tutkimuksen tavoite ja suunnitelma

Perustuen johdannossa esitettyyn taustatietoon, tutkimuksen tavoitteet ovat seuraavat:

1. Selvittää mittauksin kanavan laatu Suomessa pinta-aalto ja NVIS-yhteyksille. Tätä ei havaintojemme mukaan ole aiemmin tehty.
2. Analysoida paljonko löytyy ”hyviä” yksitiekanavia ja kuinka leveälle kaistalle.
3. Analysoida muita kanavaparametreja, jotka mittaustapa huomioiden ovat mahdollisia.

Johtopäätöksiä saadaan tietoa HF-kanavamallista Suomen oloihin, arvio modernin laajakais-
taisen HF-yhteyden käytettävyydestä sekä suosituksia yhteydenmuodostusprosessia varten. Eli tarkoituksena on selvittää onko ”suuri”datanopeuksisille moderneille HF-järjestelmille edellytyksiä Suomen oloissa.

Lyhyesti sanottuna suunnitelma oli hankkia riittävät taajuusluvut, tehdä mittauksia eri etäisyyksillä eri vuorokaudenaikoina, analysoida tulokset ja tehdä johtopäätökset. Käytännössä näin tapahtui, ja vieläpä siten, että analyysiohjelmisto tehtiin etukäteen pohtien samalla mitä parametreja ja miten voidaan mitata käytettävissä olevalla laitteistolla.

3. Aineisto ja menetelmät

Mittaukset tehtiin Kyynel Oy:n CNHF-radiolla käyttäen taittodipolia loivassa käänteisessä V-muodossa, jonka pitäisi olla varsin hyvä NVIS-tapauksiin. Toki parempiakin antenneja löytyy, mutta niitä ei ollut käytettävissä. Mittausten kiinteä pää oli radioasema Arkalassa, lähellä Kiiminkiä. Täällä oli käytössä tulosten automaattitallennus. Pinta-aaltoyhteyksiä varten oltiin 3 km ja 8 km päässä Arkalasta. NVIS-yhteyksiä varten oltiin 100 km, 250 km ja 370 km päässä. Pidemmällä yhteyksillä mitattiin yli vuorokausi (paitsi 250 km etäisyydellä). Mittausdataa kertyi joka paikasta yksi tai useampia settejä ja jokainen setti (ajanhetki) analysoitiin erikseen. Mittaustapahtuman ohjausta (aloitus, taajuuksien kaukovalinta, jne) varten radiot oli yhdistetty GSM/3G-yhteydellä. Mittaukset suoritettiin molempiin suuntiin.

FICORA:n kanssa neuvoteltiin taajuuslupa, joka kattoi 200 kHz kaistoja tai liki sellaisia läpi koko HF-taajuusalueen. Alla olevassa kuvassa *Kuva 1* on havainnollistettu mittauksissa käytetyt taajuudet.



Kuva 1: Mittauksissa käytetyt taajuudet on merkitty punaisella palkilla.

Mittaussignaalin kanavasymbolinopeus oli 1,5 kHz, jonka aikaresoluutio 0,67 μ s oli ITU-R referenssimallien mukaan riittävä analyysiin. Mittaussignaali koostui synkronointiosuudesta, jonka avulla kanavan impulssivaste laskettiin, sekä dataosuudesta. Kanavan laatu analysoitiin vain signaaleista, joissa i) havaittiin synkronointisignaali ja ii) vastaanotettiin data oikein eli käyttökelpoisista kanavista.

Mittausdatasta analysoitiin oliko kanava i) yksitie- vai ii) monitiekanava. Monitiekanavia etsittiin kolmella kriteerillä/kynnyksellä: jos löydetty etenemistie on i) -3 dB, ii) -6 dB, iii) -10 dB voimakkainta etenemistietä heikompi se luettiin monitiekomponentiksi kuitenkin siten, että hyväkyttiin yksi monitiekomponentti noin 1 ms kohti, joka oli mittausten resoluutoraja.

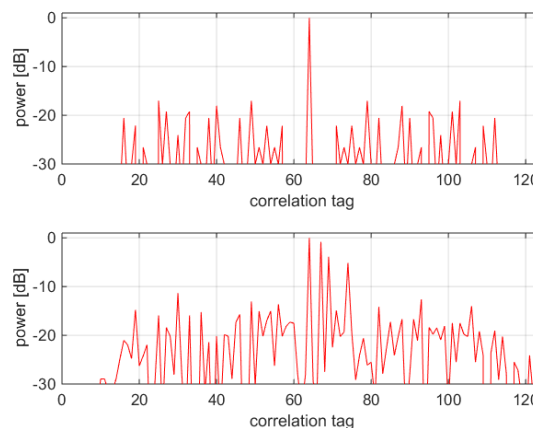
Monitiekanavista laskettiin lisäksi maksimiviive sekä (root mean square) rms-viivehaje, jota usein käytetään kanavakorjainsuunnittelun lähtökohtana. Nämä keskiarvoistettiin taajuuslohkon sisällä.

Lisäksi laskettiin kuinka monta rinnakkaista kanavaa oli yksitiekanavia ja käytettävissä olevia kanavia riippumatta sen laadusta.

4. Tulokset ja pohdinta

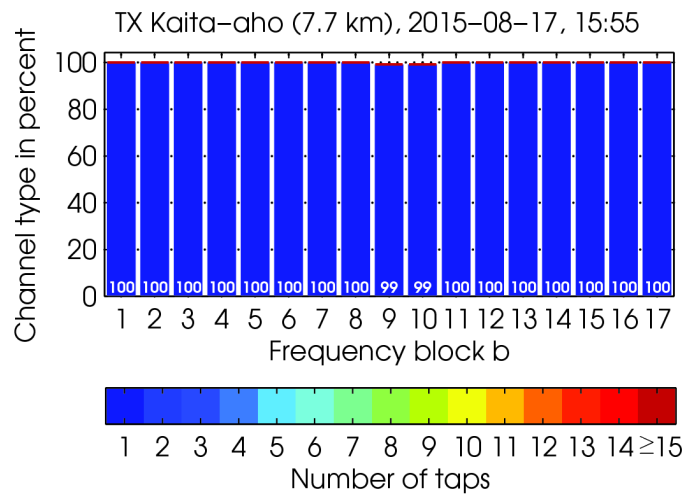
Tuloksista tässä esitetään vain muutama tyyppiesimerkki; enemmän tuloksia on toimitetussa liitteessä.

Ennen tuloksia esitetään esimerkkejä havaituista impulssivasteista yksi- ja monitietapauksissa kuvassa *Kuva 2*. Kanavan laatu ja muut parametrit laskettiin tällaisista mittauksista.

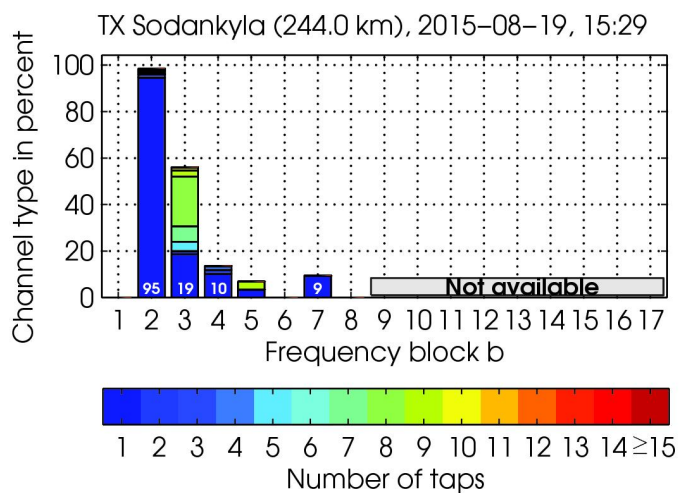


Kuva 2: Mitattuja impulssivasteita. Yllä yksitiekanava alla monitiekanava. Correlation tag tarkoittaa laskentapistettä (sidoksissa viiveeseen).

Ensiksi tuloksista analysoitiin taajuuslohkokohtaisesti millainen kanava oli kyseessä: yksi-, kaksi, kolmitie jne. Samalla mitattiin kuinka monella taajuudella (taajuuslohkoa kohti) tapahtui onnistunut lähetys eli mitattiin saatavuutta *usealla taajuudella*, ei vain yhdellä, kuten usein tapahtuu. Esimerkkitulokset pinta-aalto- ja NVIS-tapauksista on esitetty kuvissa *Kuva 3* ja *Kuva 4*.

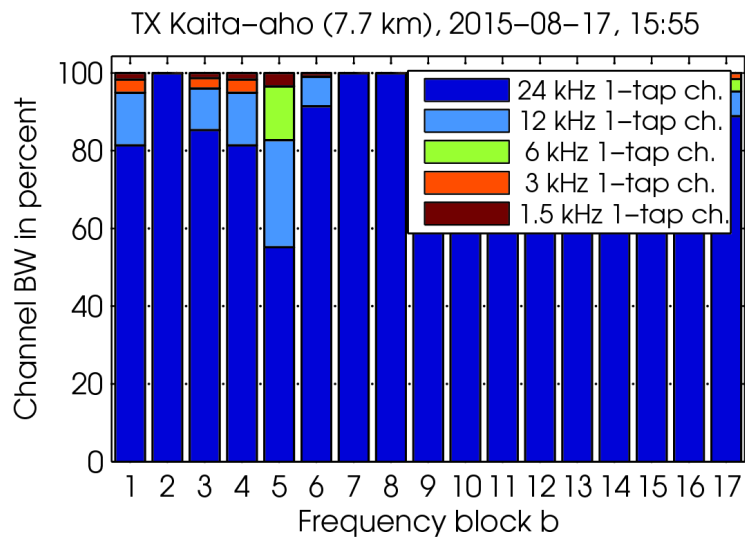


Kuva 3: Kanavien laatu eri taajuuslohkoissa pinta-aaltotapauksessa; 100 % yksitiekanavia ja saatavuus liki 100 %. Yläosan punainen on pylvään pää.

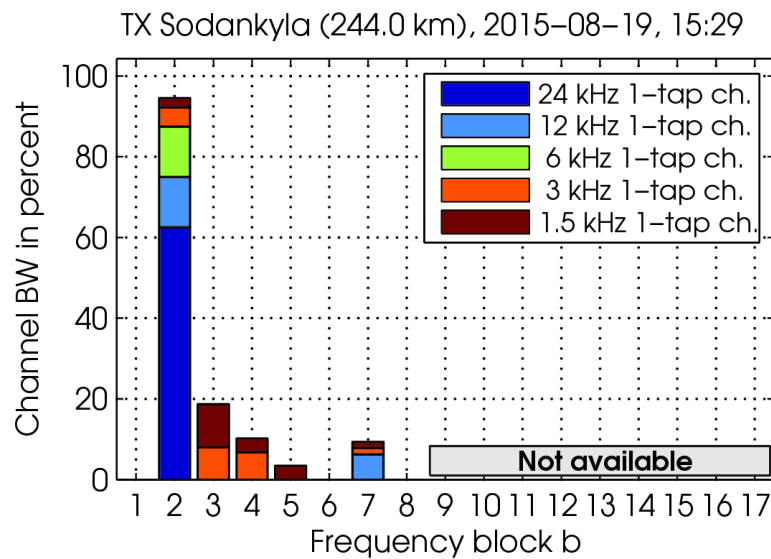


Kuva 4: Kanavien laatu eri taajuuslohkoissa NVIS-tapauksessa. Yksitiekanavien määrä riippuu taajuudesta. Saatavuus riippuu taajuudesta eikä enää ole 100 %.

Seuraavaksi analysoitiin kuinka leveä havaittu yksitiekanava olisi eli kuinka monta rinnakkaista taajuutta on yksitiekanavia. Tulokset edellisen esimerkin tapauksille on esitetty kuvissa Kuva 5 ja Kuva 6.



Kuva 5: Havaitut yksitiekaistanleveydet eri taajuuslohkoissa pinta-aaltotapauksessa. Löytyy useita 24 kHz kanavia.



Kuva 6: Havaitut yksitiekaistanleveydet eri taajuuslohkoissa pinta-aaltotapauksessa. Leveitä kanavia löytyy harvemmin, nyt pääosin vain yhdessä taajuuslohkossa.

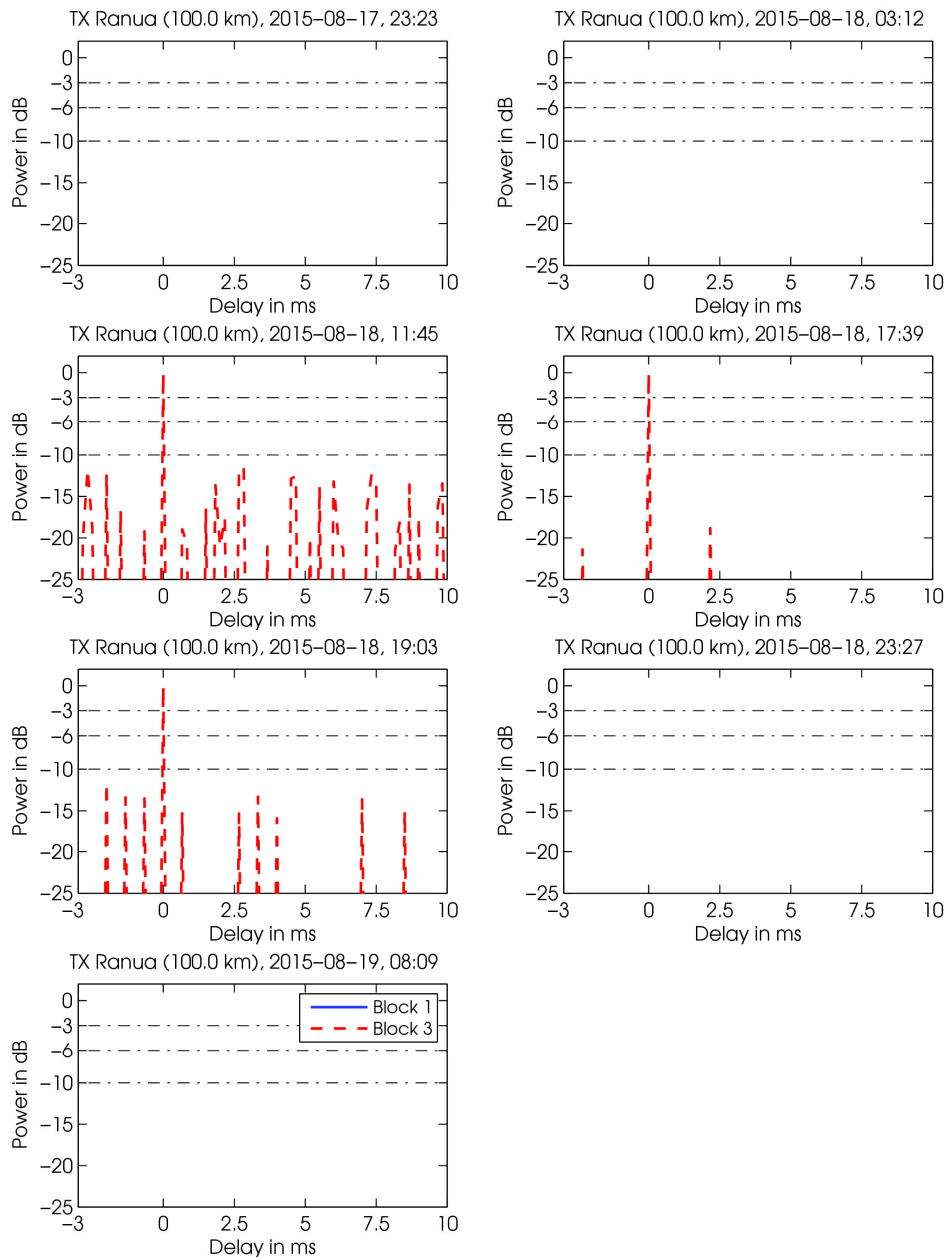
Seuraavaksi analysoitiin havaituista monitiekanavista maksimiviive ja rms-viivehaje eri kynnyksien mukaan. Nämä keskiarvoistettiin taajuuslohkoittain. Tulokset taulukoitiin ja esimerkki on esitetty taulukossa *Taulukko 1*. Jos taulukossa ei ole lukuarvoja, se tarkoittaa, että kanava ei ole saatavilla tai saatavilla oli vain yksitiekanavia. Graafisesti laskettiin keskimääräinen viiveprofiili muutamalle taajuudelle taajuuslohkoa kohti. Näissä voimakkain komponentti asetettiin nolllavii-veelle. Esimerkki tästä on kuvassa *Kuva 7*.



Taulukko 1: Maksimiviive ja rms-viivehaje eri taajuuslohkoille monitiekanavissa keskiarvoistettuna taajuuslohkon yli.

Taulukko 8: Monitiekanavien viiveet (TX Ranua, 17:39, 18.08.2015)

Taajuuslohko	-3 dB:n kynnysteho			-6 dB:n kynnysteho			-10 dB:n kynnysteho		
	Maksimi viive	rms-viivehaje	Tappien lkm	Maksimi viive	rms-viivehaje	Tappien lkm	Maksimi viive	rms-viivehaje	Tappien lkm
01	-	-	-	-	-	-	-	-	-
02	6.417 ms	2.274 ms	4.8	6.133 ms	2.058 ms	6.8	3.864 ms	1.276 ms	4.5
03	2.250 ms	1.098 ms	2.0	2.250 ms	1.098 ms	2.0	2.056 ms	0.796 ms	2.2
04	0.750 ms	0.363 ms	2.0	0.833 ms	0.384 ms	2.0	1.152 ms	0.363 ms	2.4
05	6.167 ms	2.929 ms	2.0	6.167 ms	2.929 ms	2.0	8.833 ms	2.959 ms	5.0
06	-	-	-	-	-	-	-	-	-
07	-	-	-	-	-	-	-	-	-
08	-	-	-	-	-	-	-	-	-



Kuva 7: Esimerkkejä taajuuslohkoittain keskiarvoistetuista viiveprofileista eri ajanhetkinä.

JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä osassa esitetään johtopäätöksiä havaituista tuloksista sekä pohditaan mitä seurauksia niillä on/voi olla käytännön HF-järjestelmille.

Havaittu tulos 1: Pinta-aaltotapaus oli lähes aina yksitiekanava ja saatavilla oli usein 24 kHz kaistanleveys. Saatavuus oli joka taajuuslohkossa liki 100 %. Mittaukset tosin suoritettiin vain keski- ja iltapäivällä, joka rajoittaa mittausten yleispuutteita koskemaan esim. yöaika.



Seuraus i: Laajakaistaisen HF-tietoliikenteen käyttö on mahdollista datanopeuden kasvattamiseksi pinta-aaltoyhteyksillä.

Seuraus ii: Myös usean yhtäaikaisen kanavan käyttö datanopeuden kasvattamiseksi on mahdollista.

Havaittu tulos 2: NVIS-tapauksessa yksitiekkanavia löytyi liki aina, mutta niiden määrä vaihteli vuorokaudenajan, taajuuden ja paikan mukaan yhdestä liki 100 %. Joskus havaittiin 24 kHz kanavia, mutta useimmiten maksimissaan 6 kHz. Saatavuus vaihteli ajanhetken ja paikan mukaan muutamasta liki sataan prosenttiin.

Pitkillä etäisyyksillä yli 10 MHz taajuudet eivät juuri toimineet, mikä oli odotettavaa, sillä NVIS-etenemisen on todettu toimivan noin 1,8 - 8 MHz taajuusvälillä. Myös saatavuuden ajallinen vaihtelu on tunnettu ilmiö HF-tietoliikenteessä.

Seuraus i: Yhdessä tuloksen 1 kanssa yksitiekkanavien esiintyvyys tarkoittaa, että näitä suuria datanopeuksia mahdollistavia kanavia kannattaisi etsiä. *Jatkoseuraus i:* Kanavien etsintä kannattaa laajentaa satoihin kanaviin, jopa koko HF-alueen kattavaksi. Tämä tarkoittaisi yhteydenmuodostusprosessin muuttamista eli vanha menetelmä on tainnut tulla tiensä päähän.

Seuraus ii: Se, että melkein joka mittauksessa löytyi käytettävissä oleva kanava puoltaa myös em. jatkoseurausta. Perinteinen etsintä ei välttämättä löydä näitä kanavia.

Seuraus iii: Yksitiekkanavassa riittää korjain, joka kykenee huomioimaan kantoaaltotaajuuseron (CFO carrier frequency offset), kun taas monitiekorjaimen käyttö yksitiekkanavassa aiheuttaa jopa yli 10 dB herkkyys häviön. Vastaanottimen kannattaisi luotettavasti tunnistaa onko kyseessä yksivai monitiekkanava ja säätää korjainta vastaavasti. Tämä on varmasti yksi tulevaisuuden kehitys/tutkimuskohde.

Seuraus iv: Laajakaistaisen HF-tietoliikenteen käyttö on mahdollista, mutta kaikkina aikoina ei kovin todennäköistä. Usean taajuuden yhtäaikainen käyttö sitä vastoin on useimmiten mahdollista.

Havaittu tulos 3: HF-kanavamalli pinta-aalto- ja NVIS-tapauksille (Suomessa). Pinta-aaltotapauksessa kanava on yksitiekkana. NVIS-tapauksessa se on a) yksitiekkanava X % ajasta, b) monitiekkanava Y % ajasta ja c) saavuttamattomissa Z % ajasta. Edelliset prosenttiosuudet riippuvat vuorokauden (ja muusta) ajanhetkestä sekä paikasta ja yhteystyypistä.

Monitiekkanavassa viivetappien määrä on muuttuja vaihteluvälin ollessa 2-12 välillä, mutta tyypillisesti painottuen välille 1-5. Minne tappeja sitten tulisi sijoittaa? Mittauksiin pohjautuvassa monitiekkanavamallissa oli 2 tappia välillä -2,5 ms ja -1,0 ms (tai likellä näitä) tehotasolla -8 dB ja vaihteluvälillä ± 5 dB; tappi 0 ms tehotasolla 0 dB eikä vaihtelua; kolme tappia välillä 1,0 ms - 4,5 ms tehotasolla -6 dB vaihteluvälillä ± 5 dB; kolme tappia välillä 6 ms - 9 ms tehotasolla -8 dB ja vaihteluvälillä ± 5 dB. Joka kanavarealisaatiolle arvotaan tappien määrän lisäksi oma amplitudi vaihteluvälin sisällä keskiarvoisen tuloksen saamiseksi simulaatioissa/laboratoriotesteissä.

Seuraus i: Yleensä HF-vastaanottimen toiminta varmennetaan a) ja b) tapauksille. Kohta c) voi tarkoittaa joko sitä, että häiriötaso on liian suuri ja/tai että kanavan viiveprofiili on sellainen, että korjain ei pysty kumoamaan sen vaikutusta. Tapaukselle b) voi käyttää ITU:n kuvaamia referenssimalleja, mutta mittaamamme monitiekkanava poikkesi niistä.

Havaittu tulos 4: Useimmissa mittauksessa löytyi aina vähintään muutamia taajuuslohkoja ja niiden sisältä muutamia toimivia taajuuksia, mutta joskus vain 1,5 Hz kanavasymbolinopeudelle, ei edes tavanomaiselle 3 kHz symbolinopeudelle. Myös pidemmillä mittausväleillä löytyi huonoina hetkinä enemmän näitä vain 1,5 kHz yhteyksiä.

Seuraus i: Kanavanhakuprosessi ja tiedonsiirto saattaisi olla järkevä toteuttaa myös 1,5 kHz signaalilla, jotta nämä kapeat toimivat taajuudet löytyisivät ja niitä voisi hyötykäyttää. Niitä näyttää



olevan tarjolla eritoten kun yhteyksiä on vähän.

5. Loppupäätelmät

Tutkimushanke saavutti kaikki tavoitteensa. Itse asiassa olimme positiivisesti yllättyneitä siitä, että yksitiekkanavia oli liki aina saatavilla, myös NVIS-kanavissa. Tämä tarkoittaa, kuten osassa 4 kerrottiin, että HF-järjestelmien yhteydenmuodostusprosessia kannattaisi muuttaa suuntaan, jossa aktiivisesti etsitään yksitiekkanavia, jotka mahdollistavat "suuret" (HF maailmassa) datanopeudet.

Toinen huomionarvoinen seikka on, että käytettävissä olevia kanavia löytyi liki kaikkina mittausajankohtina. Näitä ei kuitenkaan välttämättä löydetä perinteisellä yhteydenmuodostusprosessilla, vaan olisi käytettävä nykytekniikan mukaisia HF-taajuuksia laajasti skannaavia prosesseja.

Kolmas havainto oli, että pinta-aaltoyhteyksillä löytyy tyypillisesti useita rinnakkaisia kanavia aina 24 kHz asti mahdollistaen "laajakaistaisen" HF-taajuuskäytön. Lisäksi nämä ovat pääsääntöisesti yksitiekkanavia. NVIS-yhteyksillä rinnakkaisuutta ei esiintynyt usein ja esiintyessäänkin se oli usein vain 6 kHz asti.

Toteuttamalla tuloksia vastaavat muutokset HF-radioihin niiden yhteyksien laatua voidaan huomattavasti parantaa.

Mittausjärjestely ei mahdollistanut kaikkien seikkojen mittaamista. Seuraavassa on esitetty asioita joita kannattaisi mitata paremman kokonaiskuvan saamiseksi. On huomattava, että näillä mittauksilla voidaan samalla toistaa tämän työn mittaukset, joten niihin saadaan lisävarmuutta.

Mitattavia asioita:

- Doppler-efektiä/hajetta eli kanavan muutosnopeutta ei mitattu -Vaatisi muutoksia mittaussignaalin rakenteeseen
- Leveäkaistaisilla signaaleilla on parempi aikaresoluutio joten ne saattavat nähdä useampia etenemisteitä -Tulosten perusteella kanavia olisi saatavilla varsin hyvin eli voisi olettaa että myös leveämpiä taajuuspalasia kuin 3 kHz löytyisi, -Vaatisi erilliset taajuusluvut
- Kuinka pitkään HF-kanava on (keskimäärin) käytettävissä eli kuinka pitkään yhtä taajuutta voi käyttää ennen kuin yhteys katkeaa, -Vaatisi pitkiä automatisoituja mittauksia

Kehitettäviä asioita HF-järjestelmiin:

- Uusi yhteydenmuodostusmenetelmä huomioiden mm. sen, että kun huonoissa olosuhteissa joku toimiva kanava löytyy, niin tyypillisesti toimivia kanavia löytyy ko. taajuuden läheisyydestä (nyt taajuuslohkosta). Sama pätee yksitiekkanavien suhteen; ne tuppaaavat löytymään samasta taajuuslohkosta.
- Luotettava yksitiekkanavan tunnistusmenettely. Tämä voi koostua monesta seikasta eikä vain kanavan impulssivasteeseen perustuvasta laskennasta.

6. Tutkimuksen tuottamat tieteelliset julkaisut ja muut mahdolliset raportit

Tuloksia, mittauksia ja käytetyt taajuudet on esitetty tarkemmin MATINE:lle toimitetussa tämän tiivistelmäraportin liitteessä. Tulosten perusteella laadimme 1-2 käsikirjoitusta tieteellisiin konferensseihin riippuen siitä, missä laajuudessa tulokset voidaan esittää 1. konferenssissa. Lisäksi tuloksia voidaan esitellä erilaisissa työpajoissa (NATO, HFIA). Ajatellut konfe-



renssit: 1) ICMCIS-konferenssi, jonne määräaika on 18.12.2015; 2) NORDIC HF-konferenssi, määräaika helmikuu 2016.