

TIIVISTELMÄRAPORTTI

HAJASPEKTRISIGNAALIEN HAVAITSEMINEN ELEKTRONISESSA SODANKÄYNNISSÄ

Janne Lahtinen*, Harp Technologies Oy
Josu Uusitalo, Harp Technologies Oy
Teemu Ruokokoski, Harp Technologies Oy

Jukka Ruoskanen, Puolustusvoimien Teknillinen Tutkimuslaitos, Elektroniikka- ja informaatiotekniikkaosasto

*Tekniikantie 21, 02150 Espoo, puh. 050-3002625, janne.lahtinen@harptechnologies.com

Tiivistelmä Tutkimuksen tavoitteena oli testata ja verifioida alunperin muuhun tarkoitukseen kehitetyn signaalinkäsittelyalgoritmin käyttökelpoisuutta hajaspektrisignaalien havainnointiin elektronisen sodankäynnin signaalitiedustelussa. DSSS-tietoliikennesignaaleja, FHSS-tietoliikennesignaaleja ja FH-tutkasignaaleja tutkittiin teoreettisesti (simuloimalla) erilaisilla parametriarvoilla. Tuloksia myös verrattiin amplitudin raja-arvoon perustuvaan signaalien havainnointiin. Kenttäkokeissa mitattiin DSSS-tietoliikennesignaaleja (GPS) ja FHSS-tietoliikennesignaaleja (LV241 Tadiran); teoreettisessa tarkastelussa havaittiin FH-tutkasignaalien vastaavan edellisessä MATINE-projektissa tehtyä tapausta, joten näitä mittauksia ei toistettu. Mittaustulokset käsiteltiin jälkikäsitelyssä, ja tulokset vastasivat erittäin hyvin teoreettisia (simuloituja) tuloksia. Testattu menetelmä havaittiin erittäin tehokkaaksi hajaspektrisignaalien havaitsemiseen: sillä saavutetaan huomattava, jopa 13 dB parannus havaintoherkkyyteen amplitudihavainnointiin verrattuna. Tiettyyn rajaan asti myös havainnointikaistan alikanavointi parantaa havaintoherkkyyttä; tällöin signaalinkäsittelyalgoritmia käytetään kullakin alikanavalla erikseen. Tutkimuksessa havaittiin myös, että laitteisto ja käytetyt laskennan parametrivalinnat saattavat aiheuttaa rajoituksia havainnointiin.

1. Johdanto / Introduction

Tutkimuksen kohteena ollut tieteellinen ongelma on vastustajan hajaspektriläheteiden havaitseminen ja tunnistaminen. Erilaisia tutka- ja tietoliikenneläheteitä (eli signaaleja) mitataan mikroaaltovastaanottimilla. Vastaanottimen antennin kautta vastaanottimeen kytkeytyy myös ympäristön kohinaa ja itse vastaanottimessa syntyy kohinaa. Mikäli signaalin taso (amplitudi) on liian matala tähän kohinaan verrattuna (eli signaali-kohina –suhde on liian alhainen), jää signaali havaitsematta. Hajaspektrimenetelmät vaikeuttavat signaalien havaitsemista entisestään. Tämä on relevantti ongelma erityisesti elektronisen sodankäynnin (elektroninen tuki – ESM / ES) ja strategisen signaalitiedustelun (SIGINT) kannalta. Mitä heikommat signaalit saadaan havaittua, sitä kauempana sijaitsevia ja/tai vastaanottimen suuntaan vähemmän säteileviä kohteita saadaan havaittua. Läheteitä voidaan havaita joko ihmisvoimin tai automaattisin järjestelmin. Signaalin amplitudiin reagoiva havainnointialgoritmi vaatii 6...10 dB signaali-kohinasuhteen, jotta signaalit saadaan havaittua mielekkäällä virrehavaintotodennäköisyydellä.

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 Itellan operaattorivälittäjäätunnus	003701460105 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 / Research objectives and accomplishment plan

Tutkimuksen tavoitteena oli testata ja verifioida aiemmin muuhun tarkoitukseen kehitetyn signaalinkäsittelyalgoritmin käyttökelpoisuutta hajaspektrisygnaalien havainnointiin elektronisessa sodankäynnissä. Menetelmiksi valittiin teoreettinen tutkimus (simulaatio) ja kenttämittaukset. Kenttämittauksissa mitattaisiin GPS-simulaattorilla ja LV241 Tadiran kenttäradiolla luotuja signaaleja. Tarkoituksena oli vertailla saatuja tuloksia, ja identifioida mahdollisia eroja teoreettisen tutkimuksen ja kenttämittausten välillä, sekä johtaa vaatimuksia operatiiviselle laitteelle.

3. Aineisto ja menetelmät / Materials and methods

Teoreettinen tutkimus

Teoreettinen tutkimus algoritmin suorituskyvystä suoritettiin ohjelmallisesti Monte-Carlo –simulaatioilla käyttäen Matlab-ohjelmistoa. Signaalikohinasuhteen (SNR) ja hajaspektrisygnaalien muiden ominaisuuksien vaikutusta tutkittiin luomalla kohinajonoja, joihin summattiin hajaspektrisygnaalipulssi vaihtelevilla amplitudi- ja muilla parametrialivoilla. Määritelty amplitudi määräsi signaalin signaali-kohina –suhteen (SNR) kohinajonoon (taustakohinaan) verrattuna. Tutkimus tehtiin erikseen DSSS-tietoliikennesignaaleille, FHSS-tietoliikennesignaaleille ja FH-tutkasignaaleille, ja se tehtiin myös käyttäen erilaisia alikanavamääriä, jolloin myös tämän parametrin vaikutus saatiin selville. FH-tutkasignaalien havaittiin teoreettisessa tarkastelussa vastaavan edellisessä MATINE-projektissa tehtyä tapausta.

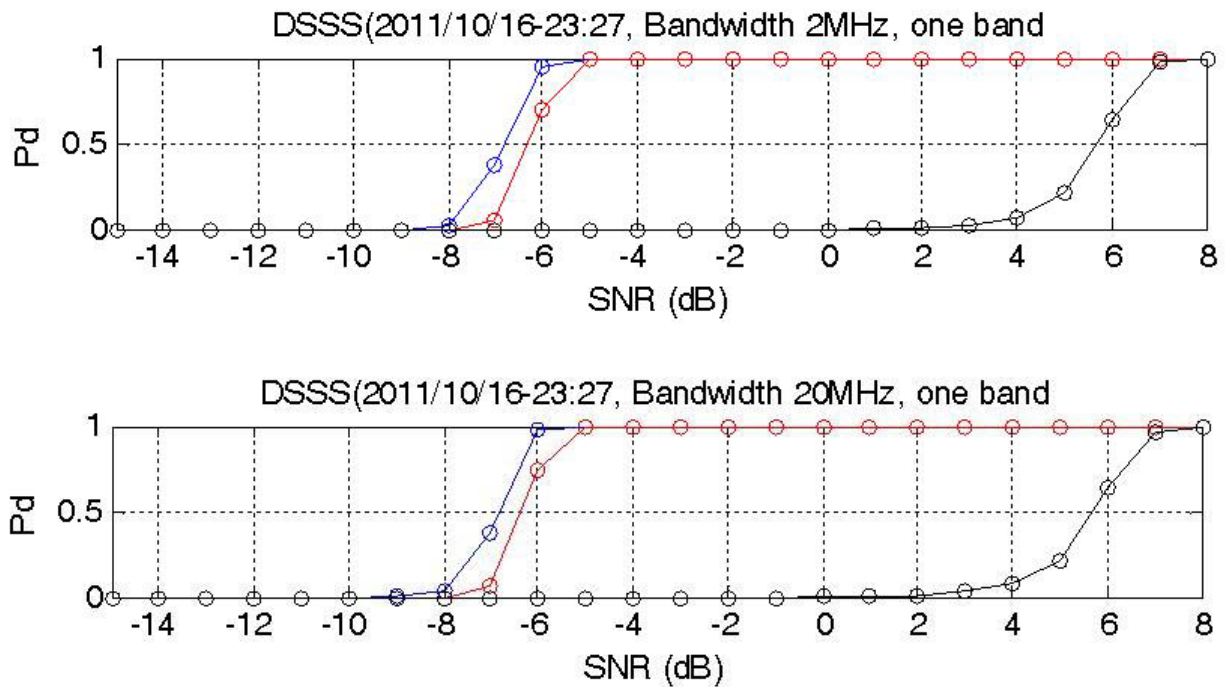
Kenttämittaukset

Kenttämittaukset suoritettiin PVTT:n tiloissa Riihimäellä. Vaadittava laitteisto signaalien tuottamiseen ja mittaamiseen olivat jo olemassa. Mittauksissa luotiin DSSS-tietoliikenne- ja FHSS-tietoliikennesignaaleja eri SNR-arvoilla. Saadut tulokset tallennettiin vastaanotinlaitteiston avulla tietokoneen kovalevyille. Tallenteiden onnistuminen todennettiin kentällä kenttämittauksia varten aikaisemmin kehitetyn tietokoneohjelman avulla, ja varsinainen analyysi tehtiin jälkikäteen. Koska teoreettisessa tarkastelussa oli havaittu FH-tutkasignaalien vastaavan edellisessä MATINE-projektissa tehtyä tapausta, joten näitä mittauksia ei toistettu, vaan muiden mittausten lukumäärää kasvatettiin.

4. Tulokset ja pohdinta / Results and discussion

Simulaatiotulokset DSSS-tietoliikennesignaaleille

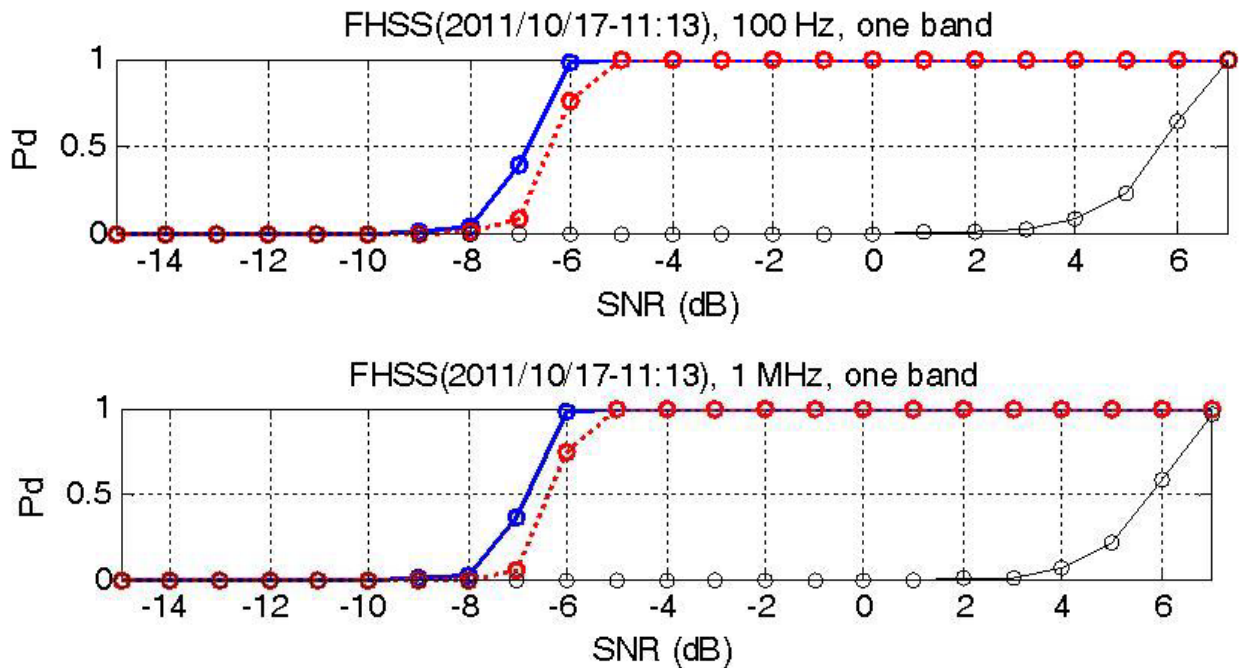
Kuvassa 1 (alla) on esitetty esimerkkituloksia DSSS-tietoliikennesignaalien simuloinneista. Testatun algoritmin saavuttama ilmaisutodennäköisyys on esitetty signaalikohinasuhteen funktiona. Esitettynä on tapaukset joissa signaalin kaistanleveys on 2 MHz ja 20 MHz. Ilmaisutodennäköisyys on esitetty kahdella eri virrehavaintotodennäköisyydellä (FAR): FAR = 10^{-6} (sininen käyrä) ja FAR = 10^{-9} (punainen käyrä). Lisäksi kuvissa on esitetty vertailun vuoksi havaintotodennäköisyys amplitudi-ilmaisinta käytettäessä. Tulokset osoittavat, että testatulla algoritmillla saavutettava suorituskykyparannus on merkittävä. Tuloksista nähdään myös että ilmaisutodennäköisyys ei normaalitapauksessa riipu signaalin kaistanleveydestä. Toisaalta alikanavoinnin ilmaisutodennäköisyyttä parantava vaikutus saturoituu, kun signaalin kaistanleveys ylittää yhden alikanavan kaistanleveyden, ja alkaa jopa heiketä.



Kuva 1. Havaintitodennäköisyys testatulla algoritmilla signaali-kohina- suhteen funktiona DSSS-tietoliikennesignaaleilla: virrehavaintotodennäköisyys $FAR = 10^{-6}$ (sininen käyrä) ja $FAR = 10^{-9}$ (punainen käyrä). Kaksi eri tapausta: taajuuskaista on 2 MHz (ylempi kuva) ja 20 MHz (alempi kuva). Amplitudi-ilmaisimen havaintotodennäköisyys on myös esitetty vertailun vuoksi (musta käyrä).

Simulaatiotulokset FHSS-tietoliikennesignaaleille

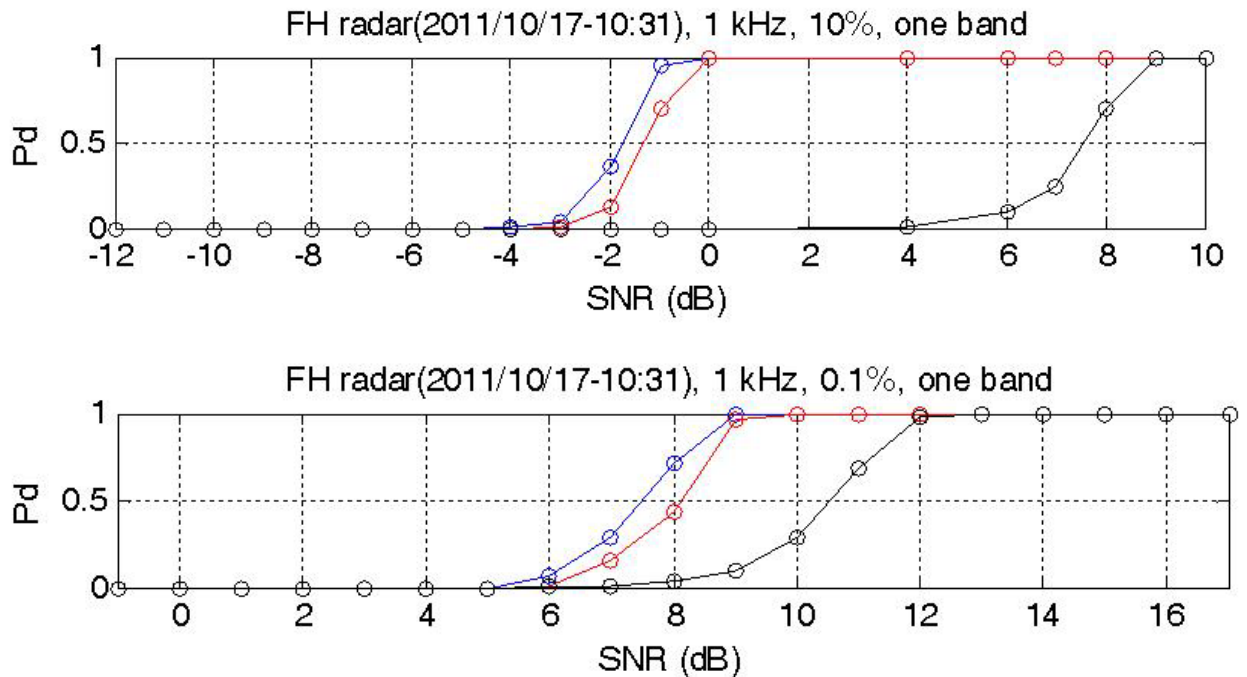
Alla kuvassa 2 on esitetty esimerkituloksia (ilmaisutodennäköisyys) FHSS-tietoliikennesignaalien simuloinneista. Nähdään että normaalitapauksessa hypintätaajuus ei vaikuta ilmaisutodennäköisyyteen.



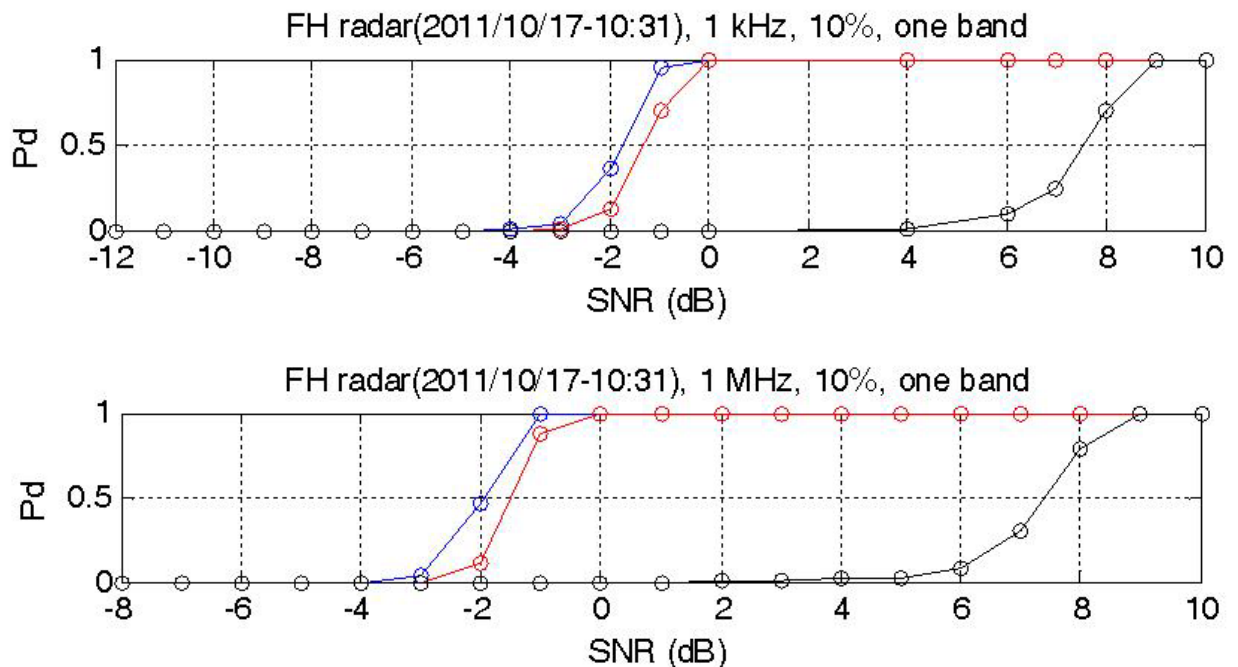
Kuva 2. Havaintotodennäköisyys testatulla algoritmilla signaali-kohina-suhteen funktiona FHSS-tietoliikennesignaaleilla: virrehavaintotodennäköisyys $FAR = 10^{-6}$ (sininen käyrä) ja $FAR = 10^{-9}$ (punainen käyrä). Kaksi eri tapausta: hypintätaajuus 100 Hz (ylempi kuva) ja 1 MHz (alempi kuva). Amplitudi-ilmaisimen havaintotodennäköisyys on myös esitetty vertailun vuoksi (musta käyrä).

Simulaatiotulokset FH-tutkasignaaleille

Alla kuvassa 3 ja 4 on esitetty esimerkkituloksia (ilmaisutodennäköisyys) FH-tutkasignaaleille eri hypintätaajuuksilla ja pulssisuhteilla. Kuvien formaatti on sama kuin edellisissä tapauksessa. Tulokset osoittavat, että havaintotodennäköisyys riippuu tutkan pulssisuhteesta, mutta ei normaalisti hypintätaajuudesta. Simulaatiot osoittavat myös, että taajuushyppälevän (FH) tutkan tapaus palautuu tutkitun algoritmin kannalta samaksi kuin kiinteätaajuisen tutkan tapaus. Koska kiinteätaajuisen tutkan tapaus tutkittiin kattavin mittauksin jo edellisessä MATINE-hankkeessa, päätettiin mittaukset taajuushyppälevän tutkan tapauksesta jättää pois. Projektin johtoryhmä kannatti tätä muutosta.



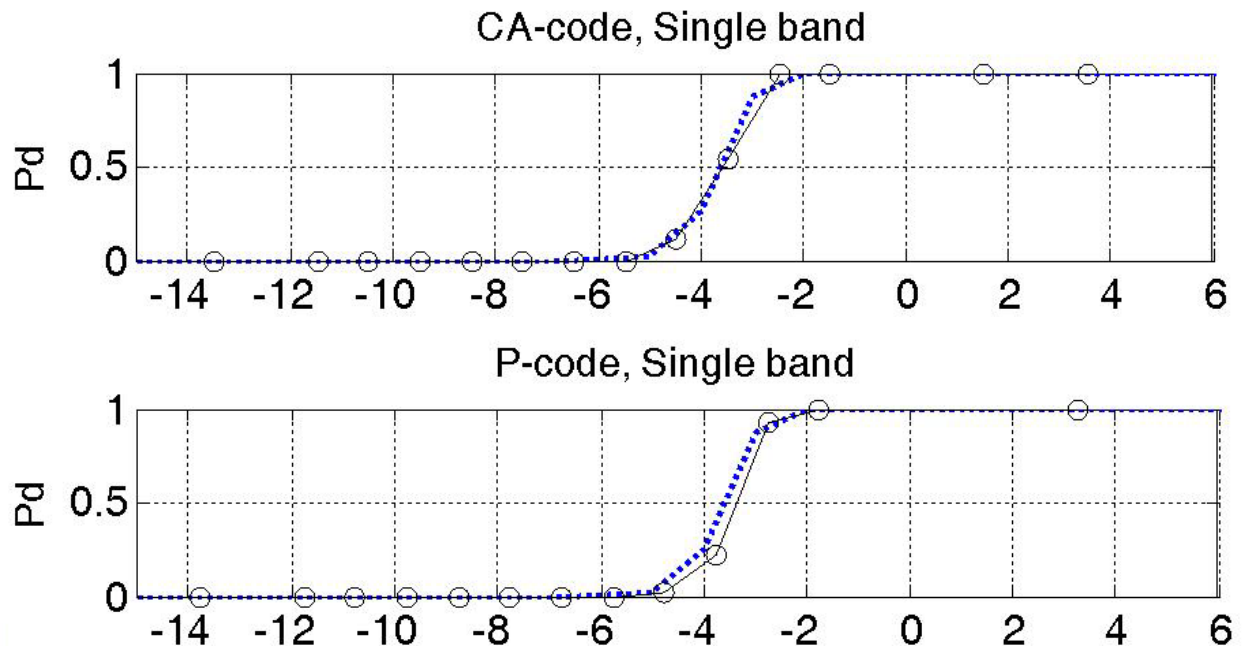
Kuva 3. Havaintotodennäköisyys testatulla algoritmilla signaali-kohina -suhteen funktiona FHSS-tietoliikennesignaaleilla: virrehavaintotodennäköisyys $FAR = 10^{-6}$ (sininen käyrä) ja $FAR = 10^{-9}$ (punainen käyrä). Kaksi eri tapausta: pulssisuhde 10% (ylempi kuva) ja 0,1% (alempi kuva). Hypintätaajuus on molemmissa kuvissa sama, 1 kHz. Amplitudi-ilmaisimen havaintotodennäköisyys on myös esitetty vertailun vuoksi (musta käyrä).



Kuva 4. Havaintotodennäköisyys testatulla algoritmilla signaali-kohina -suhteen funktiona FHSS-tietoliikennesignaaleilla: virrehavaintotodennäköisyys $FAR = 10^{-6}$ (sininen käyrä) ja $FAR = 10^{-9}$ (punainen käyrä). Kaksi eri tapausta: hypintätaajuus 1 kHz (ylempi kuva) ja 1 MHz (alempi kuva). Pulssisuhde on molemmissa kuvissa sama, 10%. Amplitudi-ilmaisimen havaintotodennäköisyys on myös esitetty vertailun vuoksi (musta käyrä).

DSSS-tietoliikennesignaalit, mittaustulokset

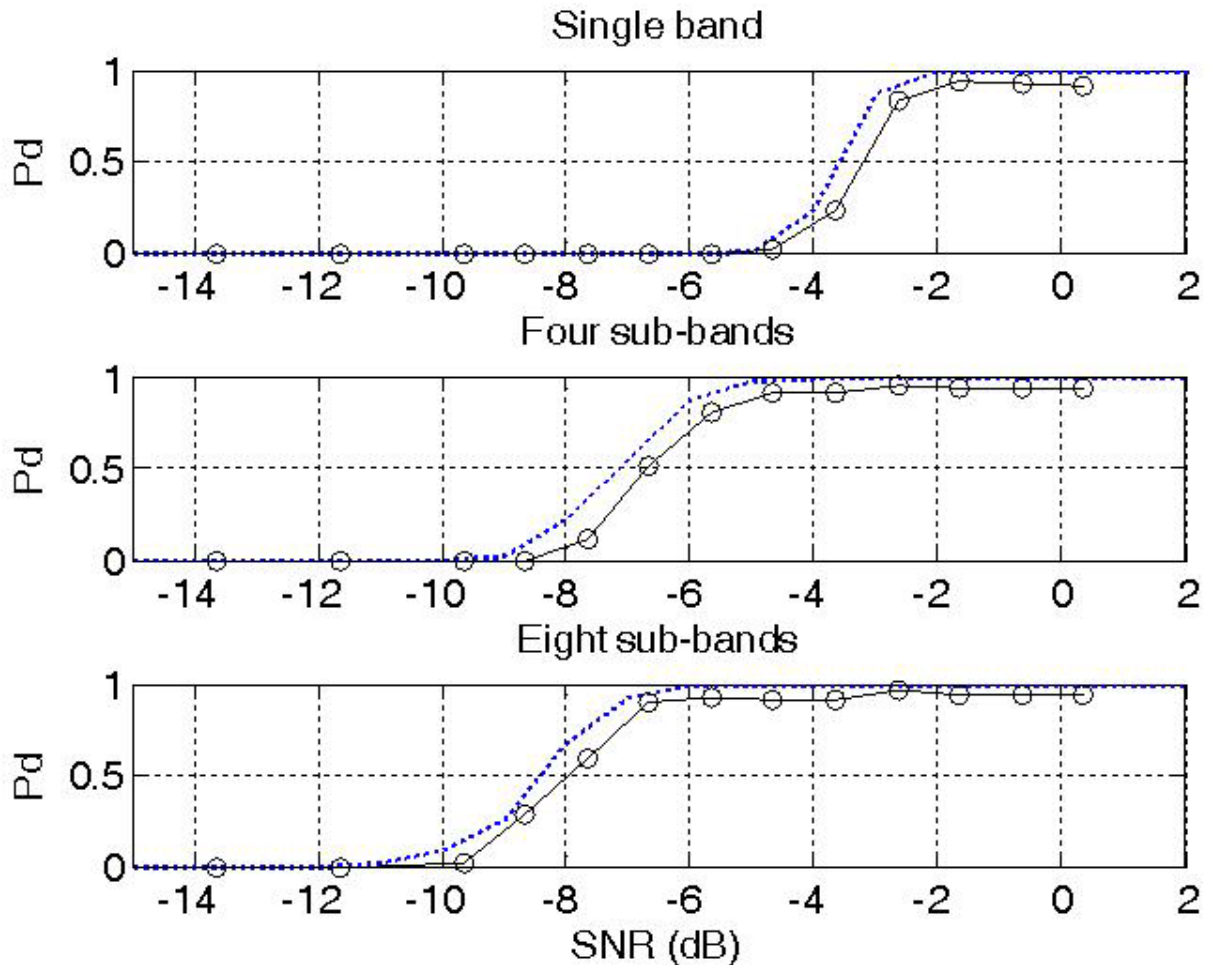
Kuvassa 5 on esitetty esimerkki DSSS-tyyppisen signaalin mittaustuloksista (ilmaisutodennäköisyys) signaalikohinasuhteen funktiona ja verrattu niitä vastaaviin simulointituloksiin. Kuvista nähdään, että mittaustulokset vastaavat erittäin hyvin simuloimalla saatuja tuloksia.



Kuva 5. Mittautulosten (sininen käyrä) ja teoreettisten tulosten (musta käyrä) vertailu. Havaintotodennäköisyys testatulla algoritmilla signaali-kohina -suhteen funktiona DSSS-tietoliikennesignaaleilla. Kaksi eri tapausta: taajuuskaista 2 MHz (GPS:n C/A koodi, ylempi kuva) ja 20 MHz (GPS:n P-koodi, alempi kuva).

FHSS-tietoliikennesignaalit, mittaustulokset

Allaolevassa kuvassa 6 on esitetty FHSS-tyyppisen signaalin mittaustulokset (ilmaisutodennäköisyys) signaalikohinasuhteen funktiona ja verrattu niitä vastaaviin simulointituloksiin. Kuvista nähdään, että mittaustulokset vastaavat erittäin hyvin simuloimalla saatuja tuloksia; pieni, vajaan desibelin ero saattaa johtua mittauksen kalibrointivirheistä, simulointien puuttuvasta signaalin kvantisoinnista tai eroista simuloitujen ja todellisen kohinan spektrin tai hyppäparametrien välillä. Kuvassa on esitetty myös alkanavoinnin vaikutusta: nähdään että alkanavointi parantaa havaintotodennäköisyyttä varsin merkittävästi (useita desibelejä).



Kuva 6. Mittautulosten (sininen käyrä) ja teoreettisten tulosten (musta käyrä) vertailu. Havaintotodennäköisyys testatulla algoritmilla signaali-kohina -suhteen funktiona FHSS-tietoliikennesignaaleilla. Kolme eri tapausta: ei taajuusalueen alikanavointia (ylin kuva), taajuusalue on jaettu neljään alikanavaan jotka testataan erikseen (keskimmäinen kuva) ja taajuusalue on jaettu kahdeksaan alikanavaan jotka testataan erikseen (alin kuva).

5. Loppupäätelmät / Conclusions

Tutkimuksen tavoitteena oli testata ja verifioida muuhun tarkoitukseen kehitetyn algoritmin käyttökelpoisuutta hajaspektrisygnaalien havaitsemiseen elektronisen sodankäynnin signaalitiedustelussa. Tutkimus tehtiin sekä teoreettisesti (simuloimalla) että kenttäkokein. Mittaustulokset käsiteltiin jälkikäsitellyssä, ja tulokset vastasivat erittäin hyvin teoreettisia (simuloituja) tuloksia. Testattu algoritmi havaittiin erittäin tehokkaaksi hajaspektrisygnaalien havaitsemisessa, ja sillä saavutetaan huomattava, jopa 13 dB parannus havaintoherkkyyteen amplitudihavainnointiin verrattuna. Tiettyyn rajaan asti myös havainnointikaistan alikanavointi parantaa havaintoherkkyyttä; algoritmia voidaan käyttää kullekin alikanavalle erikseen.

Tutkimuksessa havaittiin myös, että laitteisto ja käytetyt laskennan parametrivalinnat saattavat aiheuttaa rajoituksia havainnointiin. Esimerkiksi DSSS-signaaleilla alikanavoinnin havaintoherkkyyttä parantava vaikutus saturoituu kun yhden alikanavan kaistanleveys kapenee alle mitattavan signaalin kaistanleveyden. Käytännön laitteiston suorituskyky,



erityisesti FHSS-tietoliikenne- ja FH-tutkasignaaleilla, voidaan optimoida mahdollisimman nopealla digitoinnilla ja suurella alikanavien määrällä.

6. Tutkimuksen tuottamat tieteelliset julkaisut ja muut mahdolliset raportit / Scientific publishing and other reports produced by the research project

Tieteellisiä julkaisuja suunnitteilla.

7. Hankkeen seuraajan lausunto raportista

Hankkeessa tutkittiin hajaspektriläheteiden ja hyppivätaajuisten tutkien havaitsemista samalla signaalinkäsittelymenetelmällä, jota edellisessä projektissa menestyksellä sovellettiin pulssimuotoisten läheteiden havaitsemiseen. Menetelmä osoittautui erittäin tehokkaaksi hajaspektriläheteiden havaitsemiseen ja parantaa esim. signaalitiedustelun havaitsemisherkkyttä merkittävästi. Tutkimus antoi myös arvokasta tietoa menetelmän käytännön implementointia koskien. Merivoimat ja PVTT uskovat algoritmin hyödynnettävyyteen Puolustusvoimien järjestelmissä. Hanke eteni sujuvasti ja sille asetetut tavoitteet täyttyivät kiittävästi.

MATINE-hankkeen loppulaskutuksen edellytyksenä on loppuraportointi, joka koostuu tälle pohjalle laaditusta Tiivistelmäraportista sekä erillisestä vapaamuotoisesta Kustannus selvityksestä. (Tiivistelmäraportti korvaa aiemmin vaaditut Loppuraportin ja Tiivistelmän).

Tiivistelmäraportti keskittyy hankkeen tieteellisiin aikaansaannoksiin tiedon käytettävyyttä ja sovellettavuutta korostaen. Tutkimustulosten osalta MATINE kannustaa avoimeen tieteelliseen kansainväliseen tai kansalliseen julkaisutapaan ja/tai muuhun aktiiviseen omatoimiseen julkaisemiseen (esim. tutkimuslaitoksen omissa sarjoissa); näissä julkaisuissa tulee MATINE mainita rahoittajana.

Tiivistelmäraportin tulee olla itsenäinen esitys MATINEn rahoittaman tutkimushankkeen tavoitteista, sisällöstä, toteutuksesta ja tuloksista. **Tiivistelmäraportti on pituudeltaan 6-10 sivua ja se julkaistaan sellaisenaan MATINEn verkkosivuilla.** Tiivistelmäraportti kirjoitetaan Word-tiedostoon joko suomeksi tai englanniksi. Poikkeustapauksissa jolloin hankkeessa käsitellään tai hankkeessa on syntynyt maanpuolustuksellisista syistä salassa pidettävää tietoa, tulee tiivistelmäraportin laadinnassa rajoittua julkiselle tasolle.

Kirjoita teksti harmaalle alueelle pohjaan tehdyn jaottelun mukaisesti otsakkeen alle (poista otsikosta tarpeeton engl. / suomenkielinen vaihtoehto). Fontti Verdana 10. Omia väliotsakkeita saa käyttää jäsentelyn tueksi. Käytä otsakkeissa ja tekstissä pohjan tyylejä. Kohtaan Tiivistelmä/Abstract on tarkoitus tehdä koko tutkimusta lyhyesti kuvaava teksti, jonka lukemalla saa käsityksen tutkimuksen sisällöstä.

Tutkimuksen johtaja voi halutessaan pyytää asiantuntijalausunnon hanketta seuranneelta jaostolta tai hallinnonalan edustajalta hankkeen tulosten sovellettavuudesta ja relevanssista toimialalla.

MATINEn sihteeristö pyytää MPKK:n kirjastosta julkaisulle sähköisen ISBN tunnuksen (PDF), jolloin tiivistelmäraporttiin voidaan viitata julkaisuna. Verkkajulkaisun ISSN numero on 1797-3457.