



## TIIVISTELMÄRAPORTTI (SUMMARY REPORT)

# MATALAN INTENSITEETIN HAJASPEKTRISIGNAALIEN HAVAITSEMINEN JA TUNNISTAMINEN ELEKTRONISISSA SODANKÄYNNISSÄ

**Janne Lahtinen\***, Harp Technologies Oy  
**Josu Uusitalo**, Harp Technologies Oy  
**Teemu Ruokokoski**, Harp Technologies Oy  
**Jukka Ruoskanen**, Puolustusvoimien Tutkimuslaitos

\*Tekniikantie 14, 02150 Espoo, puh. 050-3002625, [janne.lahtinen@harptechnologies.com](mailto:janne.lahtinen@harptechnologies.com)

Tiivistelmä Tutkimuksen tavoitteena oli testata ja verifioida spektraalisen kurtosis (SK) -algoritmin käyttökelpoisuutta elektronisen sodankäynnin elektronisessa tuessa ja signaalitiedustelussa vastaanotettujen radiosignaalien havaitsemiseen ja tunnistamiseen. Tutkimuksessa keskityttiin tiettyihin hajaspektrisyntyytyyppeihin: DSSS-tietoliikennesignaaleihin (*Direct Synthesis Spread Spectrum*), FHSS-tietoliikennesignaaleihin (*Frequency Hopping Spread Spectrum*) ja FHSS-tutkasignaaleihin. Näitä tutkittiin teoreettisesti (simuloimalla) ja mittausdatalla erilaisilla parametriarvoilla. Tuloksia myös verrattiin tavanomaisen kurtosis-algoritmin ja tehospektrialgoritmin (power spectral density - PSD) havainnointiherkkyyteen. Mittaustulokset vastasivat varsin hyvin teoreettisia (simuloituja) tuloksia. Tosin eräissä mittaustilanteissa esiintyi ulkopuolisia häiriöitä; saadut tulokset viittaavat siihen, että SK-algoritmi ei häiriinny yhtä helposti jatkuvista häiriösignaaleista kuin esim. PSD, joka saturoitui häiriöistä. Testattu SK-algoritmi havaittiin tehokkaaksi hajaspektrisyntyytyyppeiden havaitsemisessa erityisesti silloin, kun signaalin pulssisuhte on alhainen havaitulla taajuuskaistalla. Menetelmällä voidaan saavuttaa merkittävä parannus havaintoherkkyyteen PSD-algoritmiin verrattuna alhaisilla pulssisuhteilla ja korkeilla hyppynopeuksilla. Mutta jatkuvilla signaaleilla SK (ja myös tavanomainen kurtosis) ovat PSD-algoritmia epäherkempiä. Spektraalinen kurtosis on tavanomaista kurtosis-algoritmia herkempi useimmilla parametriarvoilla. Tulokset osoittavat, että kullakin algoritmilla (SK, tavanomainen kurtosis, PSD) on omat vahvuutensa ja suhteelliset heikkoutensa, havaittavista signaaleista riippuen, joten algoritmien samanaikainen käyttö tarjoaisi parhaan suorituskyvyn.

## 1. Johdanto

Tutkimuksen kohteena ollut tieteellinen ongelma on vastustajan hajaspektrilähetteen havaitseminen ja tunnistaminen. Erilaisia tutka- ja tietoliikennelähteitä (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 (ELSO) elektronisen tuen (ESM / ES) ja strategisen signaalitiedustelun (SIGINT) kannalta. Mitä heikommat signaalit saadaan havaittua, sitä kauempana sijaitsevia ja/tai vastaanottimen suuntaan vähemmän säteileviä kohteita saadaan havaittua. Lähteitä voidaan havaita joko ihmisvoimin tai automaattisin järjestelmin. Signaalin amplitudiin reagoiva havainnointialgoritmi vaatii vähintään 10 dB signaali-kohinasuhteen (oma arvio), jotta signaalit saadaan havaittua mielekkäällä virrehavaintotodennäköisyydellä. Havainnointiherkkyyttä voidaan parantaa ns.

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	<a href="mailto:matine@defmin.fi">matine@defmin.fi</a>
PL 31	00130 Helsinki		<a href="http://www.defmin.fi/matine">www.defmin.fi/matine</a>
FI-00131 Helsinki	Finland		
Finland			

tavanomaisen kurtosis-algoritmin avulla, mutta sillä on omat heikkoutensa.

Spektraalinen kurtosis (SK) -algoritmissa signaali jaetaan diskreetin Fourier-muunnoksen (DFT) avulla alikanaviin, ja jokaiselle alikanavalle tehdään kurtosis-laskenta erikseen. Alikanavien lukumäärä voi olla huomattavan suuri, mikä on etu. Toisaalta DFT vaatii suurta laskentakapasiteettia tavanomaiseen kurtosis-algoritmiin verrattuna. Koska moderneissa ELSO-järjestelmissä käytettävä tehospektrialgoritmi (PSD) käyttää myös DFT:tä, on näiden kahden algoritmin välillä laskennallista synergiaa. Tämä on etu, koska SK:n vaatima laskennan lisäkapasiteetti ei ole suuri. Kuten tavanomainen kurtosis-algoritmi, SK-algoritmi ei reagoi signaalin amplitudiin vaan tilastollisiin ominaisuuksiin, joten se on immuuni taustakohinan ja järjestelmäkohinan vaihteluille.

## 2. Tutkimuksen tavoite ja suunnitelma

Tutkimuksen tavoitteena oli testata ja verifioida spektraalisen kurtosis-algoritmin käyttökelpoisuutta hajaspektrisygnaalien havainnointiin elektronisessa sodankäynnissä. Menetelmiksi valittiin teoreettinen tutkimus (simulaatio) ja laboratoriomittausdatan käyttö. Mittausdatana käytettäisiin GPS-simulaattorilla, LV241 Tadiran kenttäradiolla sekä kaupallisella signaaligeneraattorilla luotuja signaaleja. Osa tästä mittausdatasta oli jo olemassa ja tarvittaessa täydentävää mittausdataa hankittaisiin laboratoriomittauksin. Tarkoituksena oli vertailla saatuja tuloksia ja identifioida mahdollisia eroja simuloitujen ja mittauksien välillä sekä johtaa vaatimuksia operatiiviselle laitteelle.

## 3. Aineisto ja menetelmät

### Teoreettinen tutkimus

Teoreettinen tutkimus algoritmin suorituskyvystä suoritettiin ohjelmallisesti Monte-Carlo -simulaatioilla käyttäen Matlab-ohjelmistoa. Signaali-kohinasuhteen (SNR) ja hajaspektrisygnaalien muiden ominaisuuksien vaikutusta tutkittiin luomalla kohinajonoja, joihin summattiin hajaspektrisygnaalipulssi vaihtelevilla amplitudi- ja muilla parametriarvoilla. Määritelty amplitudi määräsi signaalin signaali-kohinasuhteen kohinajonoon (systeemikohinaan) verrattuna. Tutkimus tehtiin erikseen DSSS-tietoliikennesignaaleille, FHSS-tietoliikennesignaaleille ja FHSS-tutkasignaaleille. Vertailun vuoksi havainnointitulokset generoitiin myös tavanomaiselle kurtosis-algoritmilta ja tehospektrialgoritmilta. Myös eri algoritmien paremmuutta signaalien tunnistamiseen arvioitiin. Tämä tehtiin vertailemalla niiden havainnointiherkkyyttä aika- ja taajuusresoluution funktiona.

### Laboratoriomittaukset

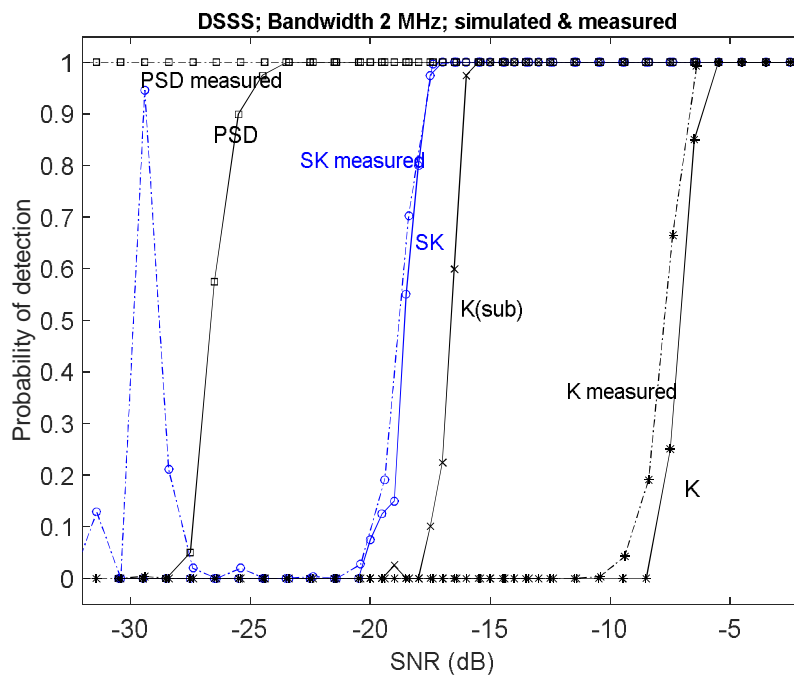
Jotta vertailu aikaisempien hankkeiden tulosten kanssa olisi mahdollista, käytettiin olemassa olevaa laboratoriomittausdataa. Tätä dataa täydennettiin uusilla laboratoriomittauksilla FHSS-tutkasignaaleista. Mittaukset suoritettiin PVTUTKL:n tiloissa Riihimäellä. Vaadittava laitteisto signaalien tuottamiseen ja mittaamiseen koottiin olemassa olevista komponenteista. Mittauksissa luotiin FHSS-tutkasignaaleja eri SNR-arvoilla. Saadut tulokset tallennettiin vastaanotinlaitteiston avulla tietokoneen kovalevylle jatkokäsittelyä varten.

## 4. Tulokset ja pohdinta

### Tulokset DSSS-tietoliikennesignaaleille

Kuvassa 1 (alla) on esitetty esimerkkituloksia suorasekvenssihajaspektri- (*Direct Synthesis Spread Spectrum - DSSS*) tietoliikennesignaalien simuloinneista ja mittauksista. Signaalina oli GPS C/A -koodi, jonka kaistanleveys on 2 MHz. SK-algoritmillä saavutettu ilmaisutodennäköisyys on esitetty signaalikohinasuhteen funktiona. Vertailun vuoksi kuvassa on esitetty myös simuloitua ja mitattua tuloksia käytettäessä tavanomaista kurtosis-algoritmia, suodatinpankin avulla alikanavoitua (20 alikanavaa) tavanomaista kurtosis-

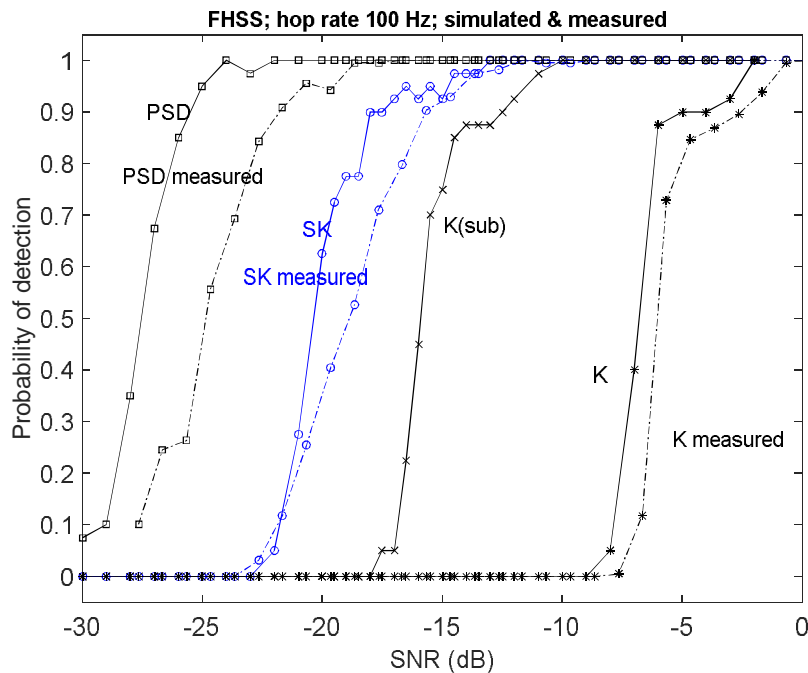
algoritmia ja tehospektrialgoritmia (PSD). Sekä SK- että PSD-algoritmissa on käytetty 127:a alikanavaa. Käytetty virrehavaintotodennäköisyys (FAR) on  $10^{-6}$ . Tulokset osoittavat, että tämän (jatkuvan) signaalin tapauksessa PSD-algoritmi on herkin. Nähdään myös, että vaikka alikanavointi parantaa tavanomaisen kurtosis-algoritmin herkkyyttä, on SK-algoritmi edelleen sitä herkempi näillä parametrivalinnoilla. Mittaustuloksissa näkyy myös kaksi erillistä ulkopuolista häiriötä: jatkuva häiriö joka saturoi PSD-algoritmin (mutta ei vaikuta SK-algoritmiin tai tavanomaiseen kurtosikseen) sekä väliaikainen häiriö (mahdollisesti lyhyt pulssi) -29 dB SNR:än mittauksessa, joka antaa vasteen myös SK-algoritmilta. Tätä anomaliaa lukuunottamatta SK-algoritmin ja tavanomaisen kurtosiksen mittaustulokset vastaavat tarkasti simuloimalla saatuja tuloksia.



Kuva 1. Mitattu ja simuloitu ilmaisutodennäköisyys GPS-signaalille, C/A-koodi (DSSS). Integrointiaika 0,66 ms, Virrehavaintotodennäköisyys FAR =  $1E-6$ . Lyhenteet: 'SK' on spektraalinen kurtosis; 'PSD' on tehospektri; 'K' on kurtosis; 'K(sub)' on alikanavoitu kurtosis (20 kanavaa).

#### Tulokset FHSS-tietoliikennesignaali

Alla kuvassa 2 on esitetty esimerkkituloksia (ilmaisutodennäköisyys) taajuushyppelyhajaspektri- (Frequency Hopping Spread Spectrum - FHSS) tietoliikennesignaalien simuloinneista ja mittauksista. Signaalina oli LV241 Tadiran -kenttäradion signaali, jonka hyppytaajuus on 100 Hz ja pulssisuhde 95%. Kuvien formaatti on sama kuin DSSS-tietoliikennesignaalien tapauksessa. Tuloksista nähdään, että PSD on tälläkin (lähes jatkuvalla) signaalityypillä herkin algoritmi ja spektraalinen kurtosis on herkempi kuin tavanomainen kurtosis. Nähdään myös, että vaikka alikanavointi parantaa merkittävästi tavanomaisen kurtosis-algoritmin herkkyyttä, on SK-algoritmi edelleen sitä herkempi näillä parametrivalinnoilla. Huomaa, että SK-algoritmin herkkyyys lähestyy PSD:n herkkyyttä hyppytaajuuden kasvaessa merkittävästi yli kuvan tapauksen (100 Hz).

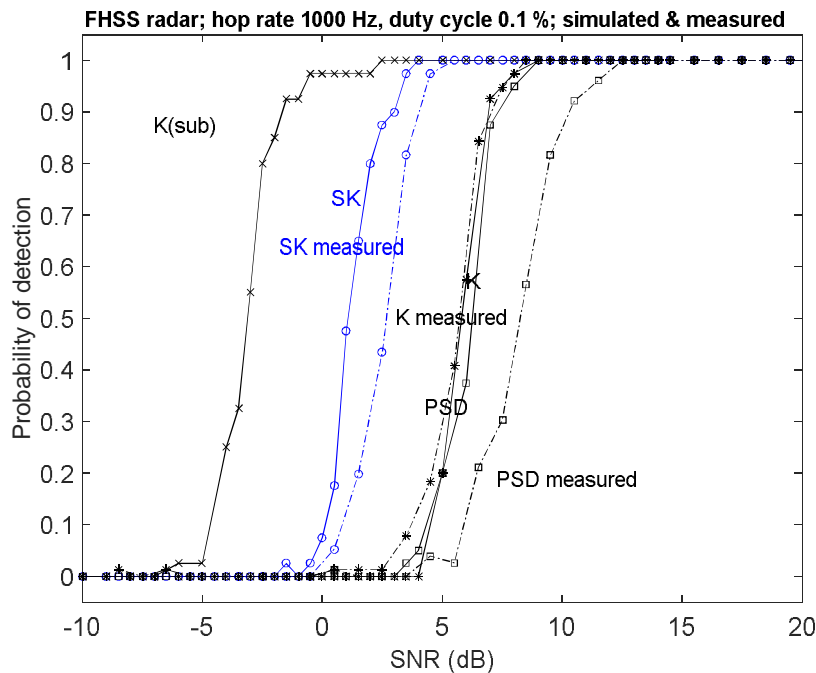


Kuva 2. Mitattu ja simuloitu ilmaisutodennäköisyys FHSS-tietoliikennesignaaliille (Tadiran) hyppytaajuudella 100 Hz. Virhehavaintotodennäköisyys  $FAR = 10^{-6}$ . Lyhenteet: 'SK' on spektraalinen kurtosis; 'PSD' on tehospektri; 'K' on kurtosis; 'K(sub)' on alikanavoitu kurtosis (20 kanavaa).

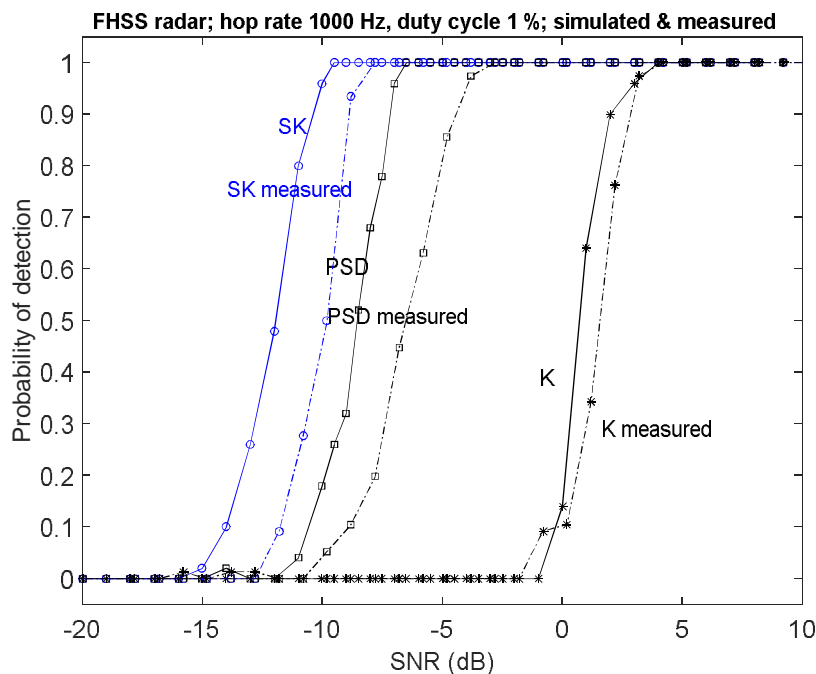
#### Tulokset FHSS-tutkasignaaliille

Alla kuvissa 3 ja 4 on esitetty esimerkkituloksia (ilmaisutodennäköisyys) FHSS-tutkasignaaliille 0,1% ja 1% pulssisuhteilla. Hyppytaajuus molemmissa kuvissa on 1 kHz ja pulssintoistotaajuus (PRF) on 10 kHz. Kuvien formaatti on sama kuin edellisissä tapauksissa. Tuloksista nähdään, että SK-algoritmi on herkempi kuin PSD näillä pienillä pulssisuhteilla (suurilla pulssisuhteilla etu menetetään, mutta SK-algoritmi on suhteellisesti sitä herkempi mitä suurempi on hyppytaajuus). Pienemmällä pulssisuhteella (0,1%) myös tavanomaisen kurtosiksen suhteellinen herkkyys on erittäin hyvä, erityisesti jos käytetään alikanavoitinta.

Esitetyissä PSD- ja SK-tuloksissa mitatut ja simuloitut tulokset eroavat toisistaan useilla desibeleillä. Tavanomaisen kurtosiksen tulokset sen sijaan vastaavat hyvin toisiaan. Mahdollinen syy on se, että mitatut ja simuloitut signaalit eivät ole täsmälleen samoilla taajuuksilla, jolloin ne osuvat hieman eri kohtiin kunkin alikanavan päästökaistan vastetta. Koska hyppytettyjen taajuuksien väli on sekä mitatussa että simuloitussa datassa sama, olisi tämän taajuuseron vaikutus SNR:ään systemaattinen jokaisessa alikanavassa.



Kuva 3. Mitattu ja simuloitu ilmaisutodennäköisyys FHSS-tutkasignaalille; pulssisuhde 0,1 %, PRF 10 kHz, hyppytaajuus 1 kHz. Lyhenteet: 'SK' on spektraalinen kurtosis; 'PSD' on tehospektri; 'K' on kurtosis; 'K(sub)' on alikanavoitu kurtosis (20 kanavaa).



Kuva 4. Mitattu ja simuloitu ilmaisutodennäköisyys FHSS-tutkasignaalille; pulssisuhde 1 %, PRF 10 kHz, hyppytaajuus 1 kHz. Lyhenteet: 'SK' on spektraalinen kurtosis; 'PSD' on tehospektri; 'K' on kurtosis.

## 5. Loppupäätelmät

Tutkimuksen tavoitteena oli tutkia, testata ja verifioida spektraalisen kurtosis (SK) - algoritmin käyttökelpoisuutta elektronisessa sodankäynnissä sekä algoritmin soveltuvuutta matalan intensiteetin hajaspektrisygnaalien havaitsemiseen ja tunnistamiseen. Menetelmän suorituskykyä ja saavutettavaa suorituskykyparannusta piti tutkia ja menetelmän muita etuja ja haittoja arvioida muihin algoritmeihin verrattuna. Saatujen tulosten perusteella piti määrittää rajoituksia ja vaatimuksia mahdolliselle operatiiviselle (reaaliaikaiselle) laitteelle. Nämä tavoitteet saavutettiin.

SK-algoritmi on muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta herkempi kuin tavanomainen kurtosis, erityisesti silloin jos alikanavointia ei käytetä tavanomaisen kurtosisin yhteydessä. Tehospektrialgoritmi (PSD) osoittautui herkimmäksi suurimmalle osalle testattuja signaaleja ja käytettyjä signaaliparametreja. Mutta spektraalinen kurtosis on aina herkin ilmaisimien pienillä pulssisuhteilla (0.1%) ja herkkyysetu säilyy sitä suuremmilla pulssisuhteilla (jopa  $\gg 1\%$ ) mitä korkeampi on signaalin hyppynopeus. Hyvin suurilla pulssisuhteilla PSD sen sijaan on aina herkin. Toisaalta sekä PSD:n että SK:n absoluuttinen havainnointiherkkyys heikkenee hyppyaajuuden kasvaessa, joten tavanomainen kurtosis tulee suhteellisesti paremmaksi (koska se on immuuni hyppyaajuudelle niin kauan kuin hyppivä signaali pysyy havainnoitavalla kokonaistaajuuskaistalla). Näin alikanavoidusta tavanomaisesta kurtosiksesta tulee herkin algoritmi tietyillä signaaliparametreilla. Nämä johtopäätökset pätevät myös eri algoritmien keskinäiseen paremmuuteen signaalien tunnistamisessa: vertailtaessa ilmaisimien herkkyyttä aika- ja taajuusresoluution funktiona, on PSD herkin suurimmalle osalle testattuja signaaleja ja käytettyjä signaaliparametreja, mutta spektraalinen kurtosis on herkempi pienillä pulssisuhteilla, erityisesti kun se yhdistyy korkeaan hyppynopeuteen. SK- ja kurtosis-ilmaisimien kyky havaita lyhyitä pulsseja merkittävästi paremmin kuin jatkuvia signaaleja on etu tilanteissa, joissa halutaan havaita lyhyitä pulsseja ruuhkaisessa signaaliympäristössä. Tämä tuli käytännössä ilmi myös DSSS-mittauksessa, jossa ulkopuolinen häiriö käytännössä saturoi PSD-algoritmin mutta ei SK- tai tavanomaista kurtosis –algoritmeja.

Huomaa että edellä esitetyt tulokset ovat PSD:n osalta jossain määrin optimistisia. Tämä siksi että käytännössä kohinatason ajalliset epästabiilisuudet vaikeuttavat PSD-algoritmin toimintaa. Epästabiilisuuksien syynä voivat olla esimerkiksi vastaanottimen vahvistuksen ja oman kohinan vaihtelut tai taustakohinan vaihtelut esim. keilaavan antennin takia. Tässä tutkimuksessa saatuja PSD-arvoja on verrattu paikalliseen keskiarvoon, joka suodattaa pois hitaita vaihteluita sekä eri taajuuskanavien päästökaistan välisiä eroja. Nopeat epästabiilisuudet vaativat käytännössä hälytysrajojen nostamista, mikä heikentää herkkyyttä (suunnilleen yhtä paljon kuin kyseinen epästabiilisuus on desibeleinä). SK-algoritmin ja tavanomaisen kurtosisin eräänä etuna PSD-ilmaisimeen verrattuna onkin niiden reagoimattomuus kohinatason vaihtelulle ajan funktiona. Ne reagoivat signaalin jakaumaan (todennäköisyysfunktioon) eivätkä amplitudiin, joten SK-arvon keskiarvo pysyy samana mahdollisesta taustakohinan vaihtelusta huolimatta (kohinan ollessa normaalijakautunutta). Tämä parantaa SK-ilmaisimen sietoa muita, gaussisesti jakautuneita signaaleja vastaan.

Johtopäätöksensä voidaan todeta, että mikään tutkittavista algoritmeista ei osoittautunut ylivoimaiseksi kaikissa tutkituissa tapauksissa, vaan kaikilla on omat etunsa ja suhteelliset heikkoutensa. Siksi suorituskyvyn kannalta olisikin parasta jos kaikki kolme algoritmia (SK, PSD, tavanomainen kurtosis) voitaisiin yhdistää samaan järjestelmään. Tämä olisi mielenkiintoinen mahdollinen jatkotutkimuksen kohde.

## 6. Tutkimuksen tuottamat tieteelliset julkaisut ja muut mahdolliset raportit

Julkaisuja suunnitteilla.



---

## 7. Hankkeen seuraajan lausunto raportista

Hankkeessa tutkittiin hajaspektriläheteiden ja hyppivätaajuisten tutkien havaitsemista spektraalisella kurtosis-algoritmilla. Menetelmä osoittautui tehokkaaksi erityisesti pienten pulssisuhteiden ja nopeasti hyppivien signaalien havaitsemiseen, jossa sen havainnointiherkkyys on jopa parempi kuin tehospektrimenetelmällä. Tutkittua menetelmää käyttäen on mahdollista parantaa esim. signaalitiedustelun havaitsemisherkkyttä tietyntyyppisillä signaaleilla. Tutkimus antoi myös arvokasta tietoa menetelmän käytännön implementointia koskien. Merivoimat ja PVTUTKL uskovat menetelmän hyödynnettävyyteen Puolustusvoimien järjestelmissä. Hanke eteni sujuvasti ja sille asetetut tavoitteet täyttyivät kiittävästi.