

TIIVISTELMÄRAPORTTI

SYKLOSTATIONAARINEN ILMAISU JA TUNNISTUS MONISENSORIJÄRJESTELMISSÄ

Jarmo Lundén ja Etienne Thuillier
Aalto-yliopisto, Sähkötekniikan korkeakoulu, Signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitos,
jarmo.lunden@aalto.fi

Tiivistelmä

Tässä tutkimuksessa on kehitetty syklostationaarisyyteen pohjautuvia signaalin ilmaisu- ja tunnistusalgoritmeja. Tällaisille algoritmeille on käyttöä sotilaallisissa maanpuolustussovelluksissa, radiotaajuuksien viranomaisvalvonnassa sekä tulevaisuuden langattomissa tietoliikennejärjestelmissä. Tässä työssä on keskitytty erityisesti tilastollisesti vankkojen ilmaisualgoritmien kehitykseen, jotka toimivat luotettavasti alhaisella signaali-kohinasuhteella haastavissa kohina- ja etenemisympäristöissä. Työssä on kehitetty lokaaliin optimaalisuuteen pohjautuvia heikon syklostationaarisen signaalin ilmaisimia sekä parametrittomia syklostationaarisia ilmaisimia. Työssä on myös tutkittu navigaatiojärjestelmissä käytettävien binaaristen offset kantaalto (binary offset carrier, BOC)-moduloitujen signaalien tunnistamista syklostationaarisyyteen pohjautuen. Tutkimuksessa kehitettyjen algoritmien suorituskykyä on tutkittu simulaatioiden avulla erilaisissa kohina- ja etenemisympäristöissä.

1. Johdanto

Signaalin ilmaisu- ja tunnistusmenetelmillä on suuri merkitys sotilaallisessa maanpuolustuksessa. Tilannekuvan muodostaminen vallitsevasta signaaliympäristöstä on keskeisessä osassa tulevaisuuden sotilaallisen maanpuolustuksen päätöksenteossa sekä kokonaisturvallisuuden ylläpidossa. Automaattisten ilmaisu- ja tunnistusjärjestelmien tuottamaa tietoa voidaan käyttää sekä sotilaallisten uhkien arviointiin että radiotaajuuksien viranomaisvalvontaan. Signaalin ilmaisu- ja tunnistusmenetelmillä on käyttöä myös tulevaisuuden langattomissa tietoliikennejärjestelmissä. Radiotaajuuksien tehokas hyödyntäminen edellyttää tarkan tilannekuvan muodostamista vallitsevasta radioympäristöstä.

Tässä työssä on esitelty ja kehitetty syklostationaarisyyteen pohjautuvia signaalin ilmaisu- ja tunnistusmenetelmiä monisensorijärjestelmissä. Syklostationaaristen signaalien tilastolliset ominaisuudet, kuten odotusarvo ja varianssi, ovat jaksollisia ajan funktiona. Monet tietoliikenne- ja tutkasignaalit ovat syklostationaarisia yhdellä tai useammalla sykklisellä taajuudella. Näiden signaalien syklostationaarisuus johtuu tyypillisesti käytetyistä modulaatio- ja koodausmenetelmistä ja ilmenee esimerkiksi symbolitaajuuksien sekä kantaallon taajuuden monikertoina. Syklostationaarisyyden etuna yleisesti käytettyyn energiailmaisimeen verrattuna on sen tarjoama mahdollisuus erotella signaaleja toisistaan niiden syklostationaaristen ominaisuuksien perusteella. Ilmaisua ja erottelua helpottaa myös, että kohina ei yleisesti ottaen ole syklostationaarista. Signaalien syklostationaarisuuteen pohjautuvat ilmaisu- ja tunnistusjärjestelmät mahdollistavatkin hyvin heikkojen signaalien ilmaisun ja tunnistuksen.

2. Tutkimuksen tavoite ja suunnitelma

Tässä työssä on kehitetty ja tutkittu syklostationaarisyyteen pohjautuvia tilastollisesti vankkoja ilmaisu- ja tunnistusalgoritmeja sotilaallisiin maanpuolustussovelluksiin, muihin viranomaissovelluksiin sekä kaupallisiin sovelluksiin. Tällaiset algoritmit ovat erityisen tehokkaita ja luotettavia vaikeissa signaali- ja kohinaympäristöissä. Sotilaallisissa maanpuolustussovelluksissa ilmaistavat ja tunnistettavat signaalit ovat tyypillisesti suunniteltu vaikeasti havaittaviksi (low probability of intercept (LPI)). Tämä vaikeuttaa merkittävästi signaalien ilmaisua ja tunnistamista sekä signaalilähteiden paikallistamista. Erityisesti hajaspektrisignaalien ilmaiseminen ja tunnistaminen alhaisella signaalikohinasuhteella vaikeassa etenemisympäristössä vaatii käytettäviltä ilmaisu- ja tunnistusalgoritmeilta äärimmäisen luotettavaa suorituskykyä. Tällaisissa sovelluksissa ilmaisu- ja tunnistusalgoritmit pyritään suunnittelemaan hyvin toimiviksi erityisesti alhaisella signaalikohinasuhteella. Tällaisia ilmaisimia nimitetään heikon signaalin ilmaisimiksi (weak signal detector). Alhaisella signaalikohinasuhteella optimaalisesti toimivia ilmaisimia kutsutaan myös lokaalisti optimaaliseksi [1,2].

Tässä työssä suunnitelluista syklostationaarisyyteen pohjautuvista ilmaisu- ja tunnistusalgoritmeista pyrittiin saamaan mahdollisimman vankkoja tilastollisesti. Tilastollisesti vankkojen ilmaisu- ja tunnistusalgoritmien suorituskyky pysyy hyvänä myös, kun kohina- tai etenemisympäristö poikkeaa oletetuista olosuhteista. Signaalin ilmaisussa ja tunnistuksessa usein oletettava normaalijakautunut kohinamalli ei useinkaan vastaa käytännön olosuhteita. Kohinan jakauma on monissa sovelluksissa huomattavasti pitkähäntäisempi kuin normaalijakaumamalli antaa odottaa, sillä merkittävä osa ihmisen tuottamasta häiriöstä/kohinasta on luonteeltaan impulsiivista [3-6]. Tyypillisiä impulsiivisia häiriölähteitä ovat ulkona sähkönsiirrossa käytettävät voimajohdot, virtakytkimet sekä käynnistyvät auton moottorit. Sisätiloissa impulsiivisia häiriölähteitä ovat esimerkiksi loistevalaisimet, hissit, kopiokoneet, mikroaaltouunit ja esimerkiksi tietokoneissa LCD pikselikellot. Tilastollisesti vankat ilmaisu- ja tunnistusalgoritmit voivat pohjautua esimerkiksi pitkähäntäisen jakauman käyttöön algoritmin suunnittelussa. Tässä työssä tavoitteena oli edelleen kehittää lähteessä [7] alustavasti johdettua lokaalisti optimaalista ilmaisinta kompleksiarvoisille syklostationaarisille signaaleille. Johdettu ilmaisinta voidaan kohinan tiheysfunktion avulla sovittaa haluttua kohinamallia vastaavaksi. Lisäksi tässä työssä pyrittiin kehittämään parametrittomia syklostationaarisia ilmaisimia pohjautuen spatiaaliseen etumerkkiin (spatial sign) ja magnitudien järjestykseen (magnitude rank). Tällaiset menetelmät ovat tyypillisesti tilastollisesti hyvin vankkoja. Lisäksi niiden etuna on, että parametrittomuudesta johtuen kohinan jakauman parametreja ei tarvitse ennalta spesifioida tai estimoida. Vaikka syklostationaarisyyteen pohjautuvia ilmaisumenetelmiä on tutkittu jo pitkään [8,9], tilastollisesti vankkojen ja parametrittomien syklostationaaristen ilmaisu- ja tunnistusalgoritmien kehitys on jäänyt pienelle huomiolle huolimatta niiden tarpeellisuudesta käytännön olosuhteissa. Ensimmäisiä tilastollisesti vankkoja syklostationaarisyyteen pohjautuvia ilmaisu- ja tunnistusalgoritmeja on kehitetty esimerkiksi lähteissä [10,11] ja [12]. Tässä työssä pyrittiin laajentamaan näitä ilmaisimia kompleksiarvoisten syklostationaaristen signaalien tapaukseen sekä hyödyntämään tietoa ilmaistavan signaalin syklistä autokorrelaatiosta ilmaisimen testistatistiikassa suorituskyvyn parantamiseksi.

Tässä työssä on myös tutkittu binaaristen offset kantoaaltomodulaatioiden (binary offset carrier, BOC) tunnistamista syklostationaarisyyteen pohjautuen. Tällaisille menetelmille on käyttöä aikaisemmin mainittujen sovellusten lisäksi myös esimerkiksi navigaatiojärjestelmissä pienentämään vastaanottimen kompleksisuutta ja energiankulutusta [13]. Ideana on pyrkiä tunnistamaan voimakkain signaaliluokka tai jopa yksittäinen navigaatio-signaali. Tämä rajaa navigaatiovastaanottimen läpikäytävien vaihtoehtoisten signaalien etsintäavaruutta varsinaisen sijainnin selvittämisessä. BOC-modulaatiota käytetään erityisesti uuden sukupolven navigaatiojärjestelmissä, kuten GPS, Galileo ja BeiDou.

3. Aineisto ja menetelmät

Tässä tutkimuksessa on kehitetty spatiaaliseen etumerkkiin ja magnitudien järjestyslukuihin pohjautuvia parametrittomia syklostationaarisia ilmaisimia. Spatiaalinen etumerkki projisoi vastaanotetun kompleksiarvoisen signaalin yksikköympyrälle. Tämä operaatio parantaa merkittävästi menetelmän tilastollista vankkuutta, mutta samalla poistaa amplitudi-informaatiota. Amplitudi-informaatiota sisältävä tilastollisesti vankka suure saadaan korvaamalla signaalinäytteiden magnitudit niiden järjestyslukuilla. Toisin sanoen magnitudin järjestysluvut korvaavat signaalien amplitudit. Johdetut parametrittomat ilmaisimet käyttävät hyväksi ilmaistavan signaalin tunnetuksi oletettua syklistä autokorrelaatiota yhdellä syklistä taajuudella. Nämä ilmaisimet ovat parametrittomia siinä mielessä, että kohinan jakauman parametreja ei tarvitse tuntea tai estimoida. Tutkimuksessa johdettiin myös analyttisesti kehitettyjen parametrittomien syklisten ilmaisimien testistatistiikkojen asymptoottiset jakaumat näytemäärän kasvaessa nollahypoteesin alla, kun vastaanotettu signaali sisältää vain riippumatonta samoin jakautunutta sirkulaarisesti symmetristä kohinaa. Sekä spatiaaliseen etumerkkiin että spatiaaliseen etumerkkiin ja magnitudien järjestyslukuihin pohjautuvien testistatistiikkojen asymptoottinen jakauma on khii toiseen-jakauma yhdellä kompleksisella vapausasteella. Johdettujen asymptoottisten jakaumien avulla ilmaisimien kynnysarvot voidaan asettaa vastaamaan haluttua väärän hälytyksen todennäköisyyttä.

Tässä tutkimuksessa on myös edelleen kehitetty lokaalisti optimaalista kompleksiarvoisten syklostationaaristen signaalien ilmaisinta, joka esiteltiin alustavasti lähteessä [7]. Tässä työssä on johdettu tämän ilmaisimen testistatistiikan asymptoottinen jakauma nollahypoteesin alla, kun vastaanotettu signaali sisältää vain riippumatonta samoin jakautunutta sirkulaarisesti symmetristä kohinaa. Lokaalisti optimaalisen ilmaisimen testistatistiikan asymptoottinen jakauma nollahypoteesin alla on khii toiseen-jakauma yhdellä vapausasteella. Tämä ilmaisin käyttää ilmaistavan signaalin kaikkia syklistä taajuuksia ja vaatii tästä johtuen tarkan aikasykronoinnin. Käyttämällä ainoastaan yhtä syklistä taajuutta tarkan aikasykronoinnin vaatimus saadaan poistettua. Tämä vaikuttaa kuitenkin suorituskykyyn. Lokaalisti optimaalinen ilmaisin käyttää myös hyväksi ilmaistavan signaalien tunnetuksi oletettua syklistä autokorrelaatiota. Lisäksi ilmaisin vaatii kohinan tiheysfunktion valitsemisen sekä kohinan skaalaparametrin (variassi, jos olemassa) estimoinnin.

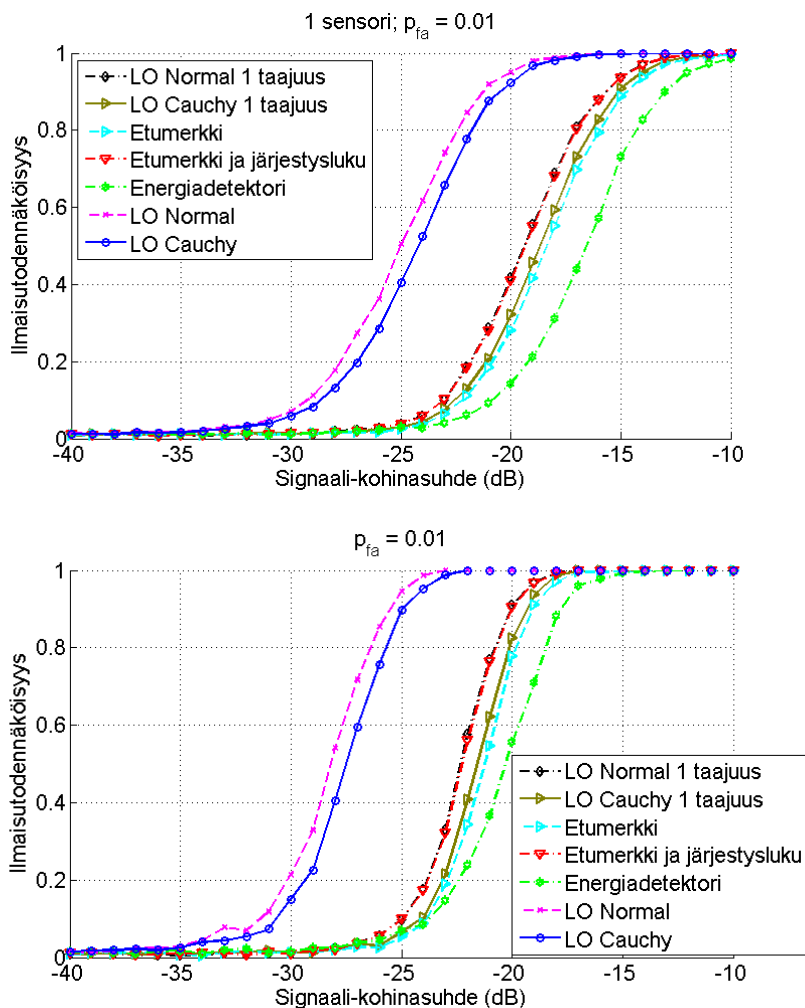
Erityisesti vaikeissa etenemisympäristöissä usean sensorin yhteistyö mahdollistaa häipyvän vaikutuksen pienentämisen ja täten ilmaisun luotettavuuden parantamisen. Tämä suorituskyvyn paraneminen pohjautuu spatiaalisen diversiteetin hyödyntämiseen. Usean spatiaalisesti hajautetun sensorin aistiessa samaa signaalia todennäköisyys, että jokainen niistä olisi huonossa kanavassa signaalilähteeseen nähden, on pienempi. Tässä työssä johdetut ilmaisimet mahdollistavat usean sensorin rinnakkaisen järjestelmän, jossa yksittäisten sensorien lokaalit testistatistiikat lähetetään fuusiokeskukseen, jossa testistatistiikat lasketaan yhteen ja saatua tulosta verrataan kynnysarvoon.

BOC-moduloidun signaalin syklinen autokorrelaatio saavuttaa maksimin kaksinkertaisella alikantoaaltoaajuudella. Tässä työssä tätä piirrettä on käytetty hyväksi luokittelemaan vastaanotettuja BOC-moduloituja signaaleja eri luokkiin. Käytetty tunnistin etsii syklistä autokorrelaation maksimin kandidaattiluokkien piirteiden joukossa ja luokittelee ilmaistun signaalin luokkaan, joka vastaa havaittua maksimipistettä.

Tutkimuksessa kehitettyjen syklostationaaristen ilmaisumenetelmien toimivuutta on tutkittu simulaatioiden avulla erilaisissa kohina- ja etenemisympäristöissä.

4. Tulokset ja pohdinta

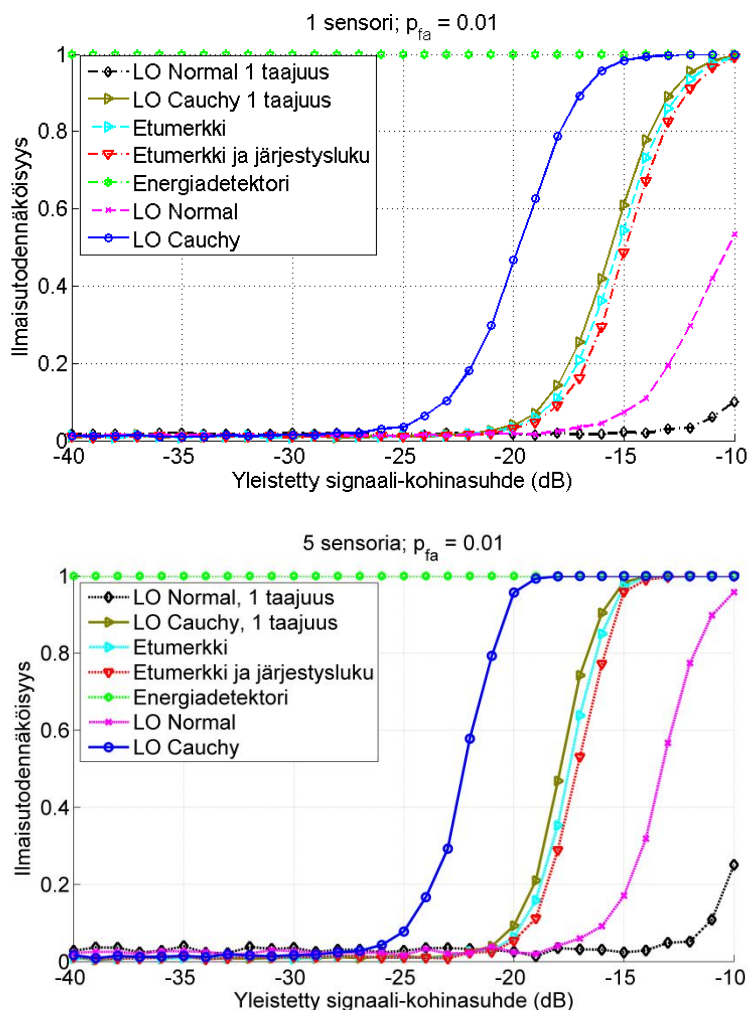
Kuva 2 näyttää eri ilmaisimien ilmaisutodennäköisyyden suorasekvenssihajaspektrisygnaalille häipyvässä Rayleigh-kanavassa normaalijakautuneessa kohinassa yhden ja viiden sensorin tapauksissa. Signaali on neljä kertaa ylinäytteistetty sirutaajuuteen nähden ja näytteiden kokonaislukumäärä on 12400. Väärän hälytyksen todennäköisyys on 0.01. Vertailussa mukana olevat ilmaisimet ovat: lokaalisti optimaalinen syklinen ilmaisimien normaali- ja Cauchy-jakaumaoletuksilla yhden (LO Normal 1 taajuus ja LO Cauchy 1 taajuus) ja useamman syklisen taajuuden tapauksessa (LO Normal ja LO Cauchy), spatiaaliseen etumerkkiin sekä spatiaaliseen etumerkkiin ja magnitudien järjestyslukuihin pohjautuvat ilmaisimet sekä energiadetektorin. Paras suorituskyky on useampaa syklistä taajuutta käyttävillä normaali- ja Cauchy-jakaumaoletukseen pohjautuvilla lokaalisti optimaalisilla ilmaisimilla. Nämä ilmaisimet vaativat kuitenkin tarkan aikasykronoinnin, joka on tässä tapauksessa oletettu aikaansaatuksi. Yhtä syklistä taajuutta käyttävät lokaaliin optimaalisuuteen pohjautuvat ilmaisimet sekä parametrittomat ilmaisimet ovat suorituskyvyltään seuraavaksi parhaita ja hyvin lähellä toisiaan. Energiadetektorin suorituskyky on syklostationaarisia ilmaisimia huonompi, vaikka energiadetektorin kohdalla on oletettu kohinan varianssi tunnetuksi. Lokaaliin optimaalisuuteen pohjautuvien ilmaisimien kohdalla kohinan varianssi on estimoitu vastaanotetuista näytteistä.



Kuva 1 Ilmaisutodennäköisyys suorasekvenssihajaspektrisygnaalille häipyvässä Rayleigh-kanavassa normaalijakautuneessa kohinassa 1 ja 5 sensorin tapauksissa.

Kuva 1 näyttää myös, että useamman riippumattoman sensorin yhteistyö parantaa ilmaisutodennäköisyyttä. Ilmaisutodennäköisyyden käyrän kulmakerroin kasvaa johtuen spatiaalisen diversiteetin tuomasta hyödyistä. Todennäköisyys, että kaikki sensorit olisivat vaikeassa häilyssä, on pienempi usean sensorin tapauksessa.

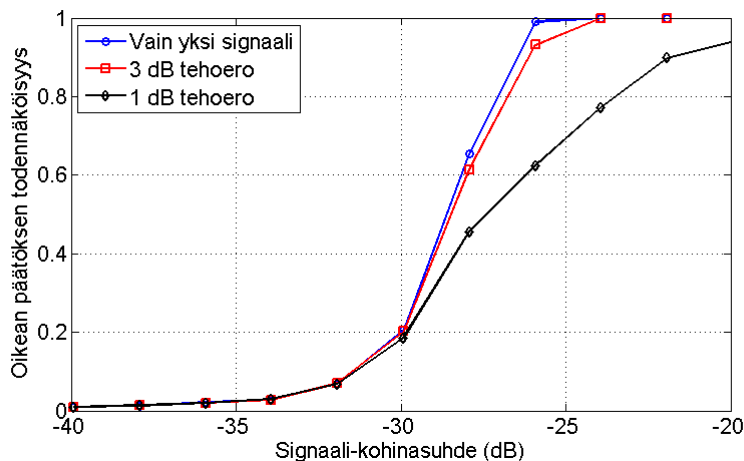
Kuva 2 näyttää ilmaisutodennäköisyyden vastaavassa skenaariossa kuin Kuva 1, mutta Cauchy-jakautuneen kohinan tapauksessa. Paras suorituskyky on useampaa syklistä taajuutta käyttävällä Cauchy-jakaumaoletukseen pohjautuvalla lokaalisti optimaalisella ilmaisimella. Tämä ilmaisimien vaatii tarkan aikasykronoinnin, joka tässä on oletettu aikaansaaduksi. Yhtä syklistä taajuutta käyttävä Cauchy-jakaumaoletukseen pohjautuva lokaalisti optimaalinen ilmaisimien sekä parametrittomat ilmaisimet ovat suorituskyvyltään seuraavaksi parhaita ja hyvin lähellä toisiaan. Energiadetektorin hajoo Cauchy-jakautuneen kohinan tapauksessa. Sen väärän häilytyksen todennäköisyys on yksi. Myös normaalijakaumaoletukseen pohjautuvien lokaalisti optimaalisten ilmaisimien suorituskyky on heikko. Tilastollisesti vankka lokaalisti optimaalisuuteen pohjautuva ilmaisimien vaatii, että ilmaisimissa käytetyksi kohinan jakaumaksi valitaan riittävän pitkähäntäinen jakauma. Useamman riippumattoman sensorin yhteistyö parantaa ilmaisutodennäköisyyttä merkittävästi myös Cauchy-kohinan tapauksessa.



Kuva 2 Ilmaisutodennäköisyys suorasekvenssihajaspektrisygnalille häilyvässä Rayleigh-kanavassa Cauchy-jakautuneessa kohinassa 1 ja 5 sensorin tapauksissa.

Kuva 1 ja Kuva 2 havainnollistavat myös, että johdetut asymptoottiset jakaumat approksimoivat tarkasti testistatistiikan jakaumaa, sillä alhaisella signaali-kohinasuhteella ilmaisutodennäköisyys lähestyy haluttua väärän hälytyksen todennäköisyyttä. Lokaalisti optimaalisen ilmaisimen asymptoottisen jakauman tarkkuus heikkenee hieman Cauchy-jakautuneen kohinan ja normaalijakaumaoletukseen pohjautuvan ilmaisimen tapauksessa, koska normaalijakaumaoletuksen tapauksessa yksittäisillä signaalinäytteillä on rajoittamaton painoarvo testistatistiikassa.

Seuraavaksi tarkastellaan BOC-moduloitujen suorasekvenssihajaspektrisygnaalien ilmaisua ja luokittelua. Ilmais- ja luokittelujärjestelmä vastaanottaa kolmen signaalin sekoituksen, jossa signaalit ovat esimerkkejä GPS-, Galileo- ja Beidou-navigaatiojärjestelmissä käytetyistä signaaleista: $\sin\text{BOC}(10,5)$, $\sin\text{BOC}(15,2.5)$ ja $\sin\text{BOC}(14,2)$. $\sin\text{BOC}(m,n)$ tarkoittaa $\sin\text{BOC}$ -moduloitua signaalia alikantaosallon taajuudella $m * f_{ref}$ ja sirutaajuudella $n * f_{ref}$, missä f_{ref} on referenssitaajuus 1.023 MHz. Tavoitteena on löytää voimakkain vastaanotetuista kolmesta signaalista. Kuva 3 näyttää oikean luokittelun todennäköisyyden signaali-kohinasuhteen funktiona erilaisilla signaalien suhteellisilla voimakkuuksilla summautuvassa valkoisessa normaalijakautuneessa kohinassa. Tulokset sisältävät myös signaalin ilmaisun. Toisin sanoen päätös voimakkaimmasta signaalista tehdään vain, jos signaali ensin havaitaan. Vastaanotetun signaalin pituus on 42.7 ms ja väärän ilmaisun todennäköisyys on 0.05. Kuvasta nähdään, että yhden signaalin tapauksessa ja signaalien välisten keskinäisten tehoerojen ollessa 3 dB ilmaisun ja oikean luokittelun todennäköisyys saavuttaa 100 % signaali-kohinasuhteella -24 dB. Signaalien välisten keskinäisten tehoerojen ollessa vain 1 dB tarvitaan korkeampi signaali-kohinasuhde. Johtuen pienestä tehoerosta väärän päätöksen seuraukset eivät kuitenkaan tässä tapauksessa ole todennäköisesti erityisen merkittäviä lopullisen sijaintiestimaatin tarkkuuden suhteen.



Kuva 3 Oikean päätöksen todennäköisyys signaali-kohinasuhteen funktiona. Sinisen käyrän (ympyrä merkki) tapauksessa vastaanotetaan vain yksi signaali. Kahdessa muussa tapauksessa vastaanotetaan kolmen signaalin sekoitus, missä signaalien tehoerot ovat 3 dB (punainen käyrä, neliö) ja 1 dB (musta käyrä, timantti).

Taulukko 1 näyttää tunnistuksen sekaannusmatriisiin signaali-kohinasuhteella -26 dB, kun signaalien välinen tehoero on 3 dB. Voimakkain signaali tunnistetaan oikein yli 90 % todennäköisyydellä.

Taulukko 1 Sekaannusmatriisi signaali-kohinasuhteella -26 dB vastaanotettaessa kolmen signaalin sekoitus, missä signaalien välinen tehoero on 3 dB.

Luokka	BOC(10,5)	BOC(15,2.5)	BOC(14,2)	Ei havaittu
BOC(10,5)	0.933	0.037	0.024	0.006
BOC(15,2.5)	0.062	0.898	0.023	0.017
BOC(14,2)	0.019	0.006	0.969	0.006

5. Loppupäätelmät

Tässä tutkimuksessa on kehitetty syklostationaarisyyteen pohjautuvia signaalin ilmaisu- ja tunnistusalgoritmeja. Tutkimuksessa on kehitetty lokaalisti optimaalisia kompleksiarvoisten syklostationaaristen signaalien ilmaisualgoritmeja sekä parametrittomia syklostationaarisia ilmaisimia pohjautuen spatiaaliseen etumerkkiin ja magnitudien järjestyslukuihin. Tässä työssä on johdettu ilmaisimien testistatistiikkojen asymptoottiset jakaumat nollahypoteesin alla vastaanotettaessa vain riippumattomia sirkulaarisesti symmetristä kohinaa. Johdetut jakaumat mahdollistavat tarkan väärän hälytyksen todennäköisyyden hallinnan. Kehitetyt algoritmit toimivat luotettavasti alhaisella signaali-kohinasuhteella haastavissa kohina- ja etenemisympäristöissä, joita karakterisoivat vaikeat häipymäprosessit ja impulsiiviset kohinaprosessit. Tällaisille algoritmeille on käyttöä sotilaallisissa maanpuolustussovelluksissa, radio- ja taajuuksien viranomaisvalvonnassa sekä tulevaisuuden langattomissa tietoliikennejärjestelmissä.

Tässä tutkimuksessa on myös tarkasteltu navigaatiojärjestelmissä käytettävien BOC-moduloitujen signaalien tunnistamista syklostationaarisyyteen pohjautuen. Automaattinen BOC-moduloitujen signaalien tunnistusjärjestelmä mahdollistaa tulevaisuuden navigaatiovastaanottimen kompleksisuuden pienentämisen. Kehitetty tunnistusjärjestelmä pystyy erottelmaan BOC-moduloidut signaalit luokkiin niiden alikantaallon taajuuden avulla. Järjestelmä ei kuitenkaan pysty erottelmaan sinBOC- ja cosBOC-modulaatioita toisistaan. Tämä vaatii lisätyötä tulevaisuudessa sopivan erottelevan piirteen löytämiseksi.

6. Tutkimuksen tuottamat tieteelliset julkaisut ja muut mahdolliset raportit

J. Lundén, V. Koivunen, "Spatial sign and rank cyclic detectors," *IEEE Signal Processing Letters*, 21(5), s. 595-599, toukokuu 2014.

Tässä julkaisussa esitellään spatiaaliseen etumerkkiin ja magnitudien järjestyslukuihin pohjautuvia syklostationaarisia parametrittomia ilmaisimia.

Hankkeessa tuotettujen lokaaliin optimaaliseen kompleksiarvoisten syklostationaaristen signaalien ilmaisuun ja BOC-modulaation tunnistukseen liittyvät tulokset pyritään julkaisemaan lähitulevaisuudessa.

7. Lähdeluettelo

[1] S. A. Kassam, *Signal Detection in Non-Gaussian Noise*, New-York: Springer-Verlag, 1988.

[2] I. Song, J. Bae, S. Y. Kim, *Advanced Theory of Signal Detection: Weak Signal Detection in Generalized Observations*, Berlin: Springer-Verlag, 2002.

[3] D. Middleton, "Non-Gaussian noise models in signal processing for telecommunications: New methods and results for Class A and Class B noise models," *IEEE Transactions on Information Theory*, 45(4), s. 1129-1149, toukokuu 1999.

- [4] K. L. Blackard, T. S. Rappaport, C. W. Bostian, "Measurements and Models of Radio Frequency Impulsive Noise for Indoor Wireless Communications," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 11(7), s. 991-1001, syyskuu 1993.
- [5] M. G. Sánchez, L. de Haro, M. Calvo, A. Mansilla, C. Montero, D. Oliver, "Impulsive Noise Measurements and Characterization in a UHF Digital TV Channel," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 41(2), s. 124-136, May 1999.
- [6] J. Shi, A. Bettner, G. Chinn, K. Slattery, X. Dong, "A study of platform EMI from LCD panels: Impact on wireless, root causes and mitigation methods," in *Proc. IEEE Int. Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 3, Portland, OR, USA, elokuu 14-18, 2006, s. 626-631.
- [7] J. Lundén, V. Koivunen, "Locally optimum and suboptimum detection of complex-valued cyclostationary signals," in *Proc. 46th Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS 2012)*, Princeton, NJ, USA, maaliskuu 21-23, 2012.
- [8] W. A. Gardner, A. Napolitano, L. Paura, "Cyclostationarity: Half a century of research," *Signal Processing*, 86, pp. 639-697, 2006.
- [9] E. Serpedin, F. Panduru, I. Sari, G. B. Giannakis, "Bibliography on cyclostationarity," *Signal Processing*, 85, pp. 2233-2303, 2005.
- [10] L. Izzo, L. Paura, M. Tanda, "Signal interception in non-Gaussian noise," *IEEE Transactions on Communications*, 40(6), s. 1030-1037, kesäkuu 1992.
- [11] J. Lundén, S. A. Kassam, V. Koivunen, "Robust nonparametric cyclic correlation based spectrum sensing for cognitive radio," *IEEE Transactions on Signal Processing*, 58(1), s. 38-52, tammikuu 2010.
- [12] J. Renard, L. Lampe, F. Horlin, "Nonparametric cyclic polyspectrum-based spectrum sensing," *IEEE Wireless Communications Letters*, 2(1), s. 98-101, helmikuu 2013.
- [13] S. Lohan, J. Lundén, G. Seco-Granados, J. A. López-Salcedo, V. Koivunen, "Cyclic frequencies of BOC-modulated GNSS signals and their potential within a cognitive positioning framework," *Navigation*, 61(2), s. 95-114, kesä 2014.