

TIIVISTELMÄRAPORTTI

POLARIMETRINEN MITTAAMINEN 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 14, 02150 Espoo, puh. 050 300 2625, janne.lahtinen@harptechnologies.com

Tiivistelmä Tutkimuksen tavoitteena oli testata ja verifioida polarimetrinen mittaamisen käyttökelpoisuutta hajaspektrisygnaalien havainnointiin elektronisen sodankäynnin signaalitiedustelussa. DSSS-tietoliikennesignaaleja, FHSS-tietoliikennesignaaleja ja FHSS-tutkasignaaleja tutkittiin teoreettisesti (simuloimalla) erilaisilla parametriarvoilla. Tuloksia myös verrattiin kurtosis-algoritmin havainnointiherkkyyteen. Kenttäkokeissa mitattiin DSSS-tietoliikennesignaaleja (GPS), FHSS-tietoliikennesignaaleja (LV241 Tadiran) ja FHSS-tutkasignaaleja. Mittaustulokset käsiteltiin jälkikäsitelyssä, ja tulokset vastasivat hyvin teoreettisia (simuloituja) tuloksia. Testattu menetelmä havaittiin erittäin tehokkaaksi hajaspektrisygnaalien havaitsemiseen, erityisesti silloin jos signaalin pulssisuhde on korkea havaitulla taajuuskaistalla. Menetelmällä saavutetaan huomattava, jopa yli 10 dB parannus havaintoherkkyyteen kurtosis-algoritmiin verrattuna, joka itsessään on erittäin herkkä tavanomaiseen amplitudihavainnointiin verrattuna, sekä jopa yli 20 dB parannus tavanomaiseen amplitudihavainnointiin verrattuna (oma arvio). Polarimetrinen mittaaminen vaatii kaksikanavaisen mikroaaltovastaanottimen ja kahden polarisaation mittaamiseen kykenevän antennin, joten se lisää laitteistokustannuksia jonkin verran tavanomaiseen yhden polarisaation mittaamiseen verrattuna.

1. Johdanto

Tutkimuksen kohteena ollut tieteellinen ongelma on vastustajan hajaspektriläheteiden havaitseminen ja tunnistaminen. Erilaisia tutka- ja tietoliikennelähetteitä (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 heikkomat 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 (oma arvio), jotta signaalit saadaan havaittua mielekkäällä virrehavaintotodennäköisyydellä.

Havainnointiherkkyyttä voidaan parantaa jopa yli 10 dB:llä jos käytetään ns. kurtosis-algoritmia, mutta sillä on omat heikkoutensa.

Polarimetrinen mittaaminen on lupaava tekniikka parantaa havainnointiherkkyyttä: ympäristön taustakohina on tyypillisesti polarisoitumatonta kun havaittavat signaalit ovat tyypillisesti joko lineaari-, ympyrä- tai elliptisesti polarisoituneita. Nämä polarisoituneet komponentit on mahdollista mitata ns. polarimetrisellä vastaanottimella.

2. Tutkimuksen tavoite ja suunnitelma

Tutkimuksen tavoitteena oli testata ja verifioida polarimetrisen mittaamisen käyttökelpoisuutta hajaspektrisygnaalien havainnointiin elektronisessa sodankäynnissä. Menetelmiksi valittiin teoreettinen tutkimus (simulaatio) ja laboratoriomittaukset.

Laboratoriomittauksissa mitattaisiin GPS-simulaattorilla, LV241 Tadiran kenttäradiolla sekä kaupallisella signaaligeneraattorilla luotuja signaaleja. Tarkoituksena oli vertailla saatuja tuloksia ja identifioida mahdollisia eroja teoreettisen tutkimuksen ja laboratoriomittausten välillä sekä johtaa vaatimuksia operatiiviselle laitteelle.

3. Aineisto ja menetelmät

Teoreettinen tutkimus

Teoreettinen tutkimus polarimetrisen mittaamisen 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 parametriarvoilla. Määritelty amplitudi määräsi signaalin signaali-kohina -suhteen (SNR) kohinajonoon (taustakohinaan) verrattuna. Tutkimus tehtiin erikseen DSSS-tietoliikennesignaaleille, FHSS-tietoliikennesignaaleille ja FHSS-tutkasignaaleille. Vertailun vuoksi havainnointitulokset generoitiin myös kurtosis-algoritmille.

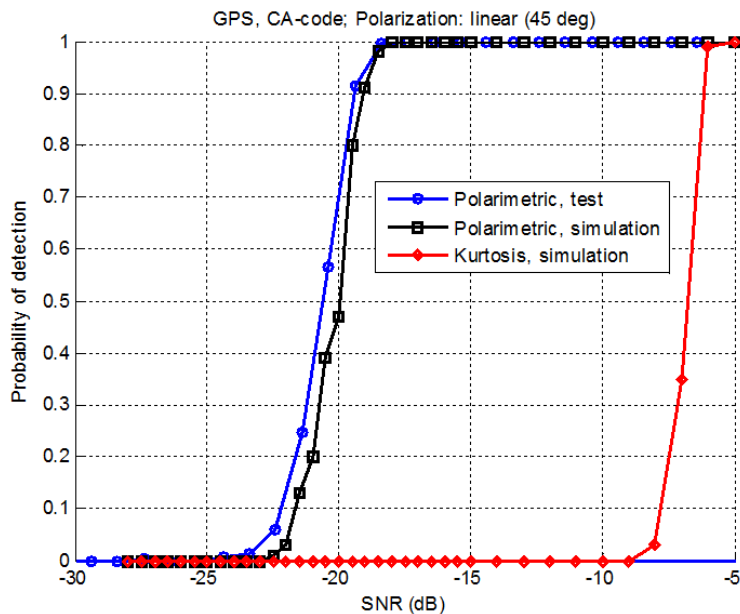
Laboratoriomittaukset

Laboratoriomittaukset suoritettiin PVTT:n tiloissa Riihimäellä. Vaadittava laitteisto signaalien tuottamiseen ja mittaamiseen koottiin komponenteista jotka olivat suurelta osin jo olemassa. Vaadittavat lisäkomponentit määriteltiin ja hankittiin. Mittauksissa luotiin DSSS-tietoliikenne-, FHSS-tietoliikenne- ja FHSS-tutkasignaaleja eri SNR-arvoilla. Saadut tulokset tallennettiin vastaanotinlaitteiston avulla tietokoneen kovalevyille. Valitettavasti FHSS-tutkasignaalien generointiin käytetty signaaligeneraattori ei toiminut oikein, minkä vuoksi mittaustulokset jäivät puutteellisiksi tämän signaalityypin osalta.

4. Tulokset ja pohdinta

Tulokset DSSS-tietoliikennesignaaleille

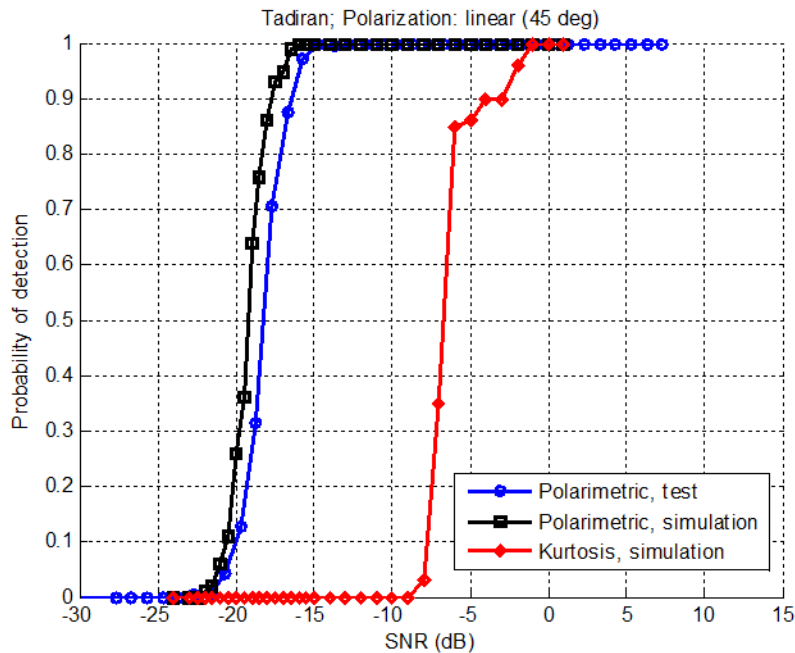
Kuvassa 1 (alla) on esitetty esimerkkituloksia DSSS-tietoliikennesignaalien simuloinneista ja mittauksista. Polarimetrisen mittaamisen saavuttama ilmaisutodennäköisyys on esitetty signaalikohinasuhteen funktiona. Vertailun vuoksi kuvassa on esitetty myös simuloitua tulokset kurtosis-algoritmilla saavutettavasta ilmaisutodennäköisyydestä. Esitettynä on tulos 2 MHz kaistanleveyisen signaalin tapauksessa (GPS C/A -koodi). Käytetty virrehavainnotodennäköisyys (FAR) on 10^{-6} . Tulokset osoittavat, että testatulla algoritmilla saavutettava suorituskykyparannus on merkittävä sekä kurtosis-algoritmiin verrattuna (>10 dB parannus) että erityisesti tavanomaiseen amplitudihavainnointiin verrattuna (24...28 dB parannus), jos amplitudihavainnoinnin havainnointikynnys arvioidaan 6...10 dB:ksi (oma arvio). Ilmaisutodennäköisyys ei normaalitapauksessa riipu signaalin kaistanleveydestä; GPS:n P-koodilla (kaistanleveys 20 MHz) saatiin identtiset tulokset. Tuloksista nähdään myös, että mittaustulokset vastaavat erittäin tarkasti simuloimalla saatuja tuloksia.



Kuva 1. Polarimetrisen mittaamisen havaintotodennäköisyys signaali-kohina- suhteen funktiona DSSS-tietoliikennesignaaleilla: simulointitulokset (musta käyrä) ja mittaustulokset (sininen käyrä). Vertailun vuoksi kurtosis-algoritilla saavutettava havaintotodennäköisyys on myös esitetty (punainen käyrä). Esimerkkisignaalina GPS C/A -koodi (kaistanleveys 2 MHz), virrehavaintotodennäköisyys $FAR = 10^{-6}$.

Tulokset FHSS-tietoliikennesignaaleille

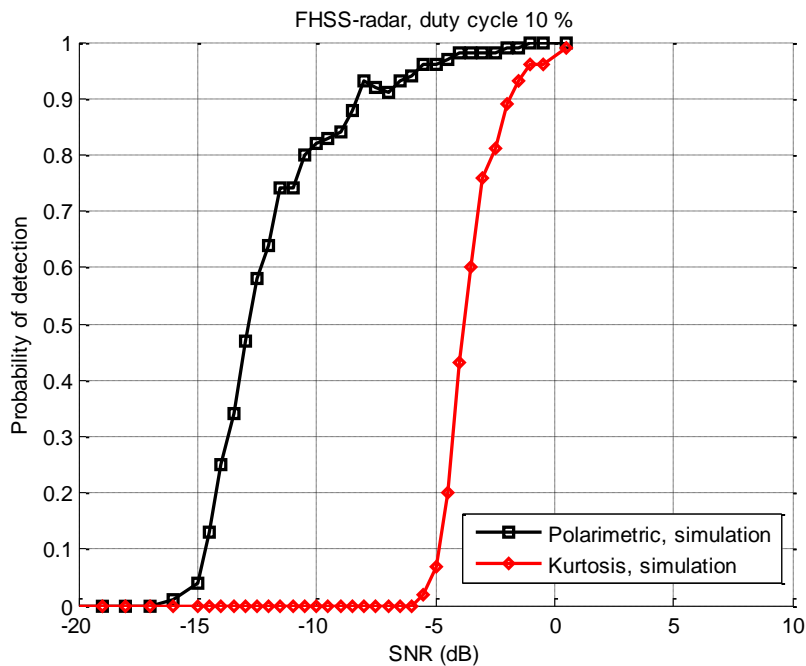
Alla kuvassa 2 on esitetty esimerkkituloksia (ilmaisutodennäköisyys) FHSS-tietoliikennesignaalien simuloinneista. Kuvien formaatti on sama kuin DSSS-tietoliikennesignaalien tapauksessa. Tulokset osoittavat, että testatulla algoritmilla saavutettava suorituskypäparannus on merkittävä sekä kurtosis-algoritmiin verrattuna (n. 10 dB) että erityisesti tavanomaiseen amplitudihavainnointiin verrattuna (n. 20...25 dB), jos havainnointikynnys arvioidaan 6...10 dB:ksi (oma arvio). Tuloksista nähdään myös, että mittaustulokset vastaavat hyvin tarkasti simuloimalla saatuja tuloksia.



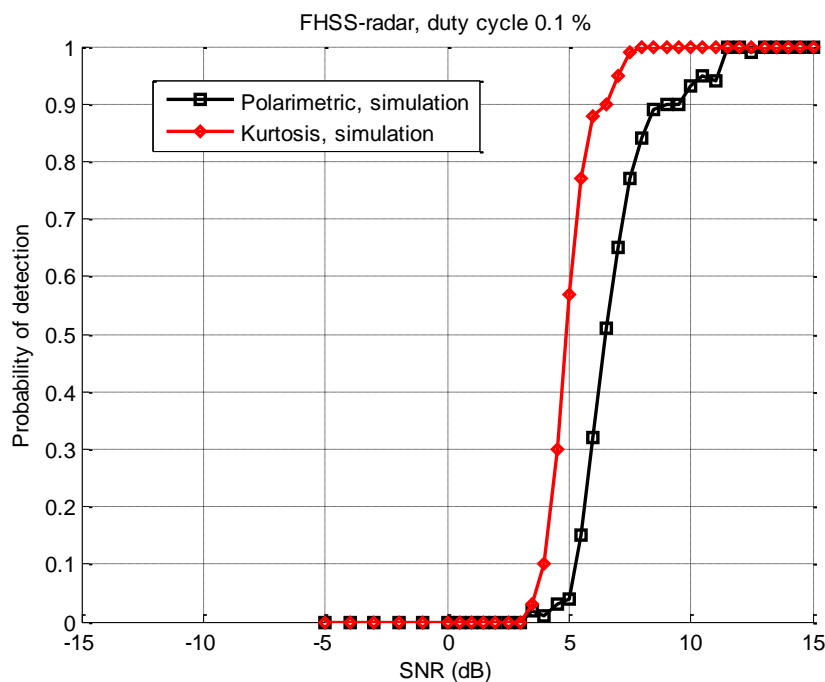
Kuva 2. Polarimetrisen mittaamisen havaintotodennäköisyys signaali-kohina-suhteen funktiona FHSS-tietoliikennesignaaleilla: simulointitulokset (musta käyrä) ja mittaustulokset (sininen käyrä). Vertailun vuoksi kurtosis-algoritmilla saavutettava havaintotodennäköisyys on myös esitetty (punainen käyrä). Esimerkkisignaalina Tadiran, virrehavaintotodennäköisyys $FAR = 10^{-6}$.

Tulokset FHSS-tutkasignaaleille

Alla kuvissa 3 ja 4 on esitetty esimerkituloksia (ilmaisutodennäköisyys) FHSS-tutkasignaaleille 10% ja 0,1% pulssisuhteilla. Kuvien formaatti on sama kuin edellisissä tapauksissa. Valitettavasti käytetty signaaligeneraattori ei toiminut kunnolla, eikä kunnan mittaustuloksia saatu. Tuloksista nähdään, että polarimetrisen mittaamisen herkkyys kurtosis-algoritmiin verrattuna pienenee pulssisuhteen pienentyessä, ja hyvin pienillä pulssisuhteilla kurtosis on jopa herkempi kuin polarimetrinen havainnointi. Polarimetrinen mittaaminen on kuitenkin edelleen herkempi kuin tavanomainen amplitudiin perustuva menetelmä.



Kuva 3. Polarimetrisen mittaamisen havaintotodennäköisyys signaali-kohina- suhteen funktiona FHSS-tutkasignaaleilla (pulssisuhde 10%). Simulointitulokset on esitetty mustalla käyrällä, vertailun vuoksi kurtosis-algoritmissa saavutettava havaintotodennäköisyys on esitetty punaisella käyrällä. Hypintätaajuus on 1 kHz.



Kuva 4. Polarimetrisen mittaamisen havaintotodennäköisyys signaali-kohina- suhteen funktiona FHSS-tutkasignaaleilla (pulssisuhde 0,1%). Simulointitulokset on esitetty mustalla käyrällä, vertailun vuoksi kurtosis-algoritmissa saavutettava havaintotodennäköisyys

on esitetty punaisella käyrällä. Hypintätaajuus on 1 kHz.

5. Loppupäätelmät

Tutkimuksen tavoitteena oli testata ja verifioida polarimetrisen mittaamisen käyttökelpoisuutta hajaspektrisignaalien havaitsemiseen elektronisen sodankäynnin signaalitiedustelussa. Tutkimus tehtiin sekä teoreettisesti (simuloimalla) että laboratoriokokein. Mittaustulokset käsiteltiin jälkikäsitellyssä, ja tulokset vastasivat erittäin hyvin teoreettisia (simuloituja) tuloksia. Testattu menetelmä havaittiin erittäin tehokkaaksi hajaspektrisignaalien havaitsemisessa, erityisesti jos signaalin pulssisuhde on korkea (esim. DSSS- ja FHSS-tietoliikennesignaaleilla). Näillä signaaleilla saavutetaan huomattava, jopa 20-25 dB parannus havaintoherkkyyteen amplitudihavainnointiin verrattuna. Verrattuna kurtosis-algoritmiin, joka itsessään tarjoaa huomattavan herkkyysparannuksen amplitudihavainnointiin verrattuna, polarimetrisen mittaaminen tarjoaa n. 10 dB herkkyysparannuksen. Mikäli signaalin pulssisuhde on matala, esim. FHSS-tutkasignaaleilla, kutistuu saavutettava parannus kurtosis-algoritmiin verrattuna alle 10 dB:iin (10% pulssisuhde) tai havainnointiherkkyys jopa heikkenee kurtosis-algoritmiin verrattuna (0,1% pulssisuhde). Amplitudihavainnointiin verrattuna suorituskykyetu kuitenkin säilyy.

Kurtosis-menetelmään verrattuna polarimetrisen mittaamisen lisäetu on se, että havaintoa ei tarvitse tehdä varsin pitkästä mittausvektorista, vaan havainnointi voidaan tehdä jo hyvin lyhyelle datapisteiden (signaalinäytteiden) joukolle. Näin esimerkiksi pulssintoistotaajuus tai signaalin muoto voidaan määrittää, jolloin myös signaalin tunnistus mahdollistuu. Polarimetrisen mittaamisen etu on myöskin se, että mitattu data on saman muotoista kuin tavanomaisia menetelmiä käytettäessä. Siksi analysointiin voitane käyttää samoja ja olemassaolevia havainnointi- ja tunnistusalgoritmeja sellaisenaan tai pienin muutoksin.

Polarimetrisen mittaamisen huono puoli on vaadittavan vastaanotinlaitteiston kompleksisuuden lisääntyminen tavanomaiseen laitteistoon verrattuna: tarvitaan kaksikanavainen RF-vastaanotin yksikanavaisen sijaan sekä kahden polarisaation vastaanottoon kykenevä antenni. Tämä nostaa hieman kustannuksia. Lisäksi tarvitaan I/Q-demodulaattori ja korrelaattori, mutta ne voidaan sisällyttää muuhun (olemassaolevaan) signaalinkäsittelyyn, jolloin lisäkustannus on pieni.

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

Julkaisuja suunnitella.

7. Hankkeen seuraajan lausunto raportista

(Tutkimuksen hyödyntäjän tai seuranneen tahon esim. jaoston tai puolustushaaran lausunto projektin onnistumisesta ja tulosten hyödynnettävyydestä. Lausunnon pyytämistä vastaa hankkeen johtaja. Vapaaehtoisesti täytettävä kenttä.)

Hankkeessa tutkittiin hajaspektriläheteiden ja hyppivätaajuisten tutkien havaitsemista polarimetrisellä mittausmenetelmällä. Menetelmä osoittautui erittäin tehokkaaksi hajaspektriläheteiden havaitsemiseen ja se parantaa esim. signaalitiedustelun havaitsemisherkkyyttä merkittävästi. Tutkimus antoi myös arvokasta tietoa menetelmän käytännön implementointia koskien. Merivoimat ja PVTT uskovat menetelmän hyödynnettävyyteen Puolustusvoimien järjestelmissä. Hanke eteni sujuvasti ja sille asetetut tavoitteet täyttyivät kiitettävästi.

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. Verkkojulkaisun ISSN numero on 1797-3457.