

TIIVISTELMÄRAPORTTI (SUMMARY REPORT)

Maastossa olevien kohteiden havainnointi uusilla SAR-tutkatekniikoilla

Martti Hallikainen, Jaan Praks, Daniel Hurtado

Radiotieteen ja –tekniikan laitos, Sähkötekniikan korkeakoulu, Aalto-yliopisto

Oleg Antropov

VTT

Tiivistelmä

Tässä tutkimuksessa on selvitetty millaisia mahdollisuuksia ja uhkia maanpuolustuksen kannalta avaa SAR-tutkatekniikan nopea kehitys ja yleistyminen kaukokartoituksessa. Eri-tyisesti on selvitetty uusien koherenttien kuvausmenetelmien kuten interferometrian, interferometrisen muutostulkinnan ja tomografian kykyä kuvata kohteita maastossa ja metsässä. Tutkimusprojektissa on tehty laaja kirjallisuustutkimus uusista menetelmistä sekä sovellettu valikoituja menetelmiä myös L- ja X-kaistan E-SAR-tutkan interferometrisille kuville Kirkkonummelta vuodelta 2003. Tutkimuksessa oli tarkoitus soveltaa samoja menetelmiä myös saksalaisen TanDEM-X satelliitin tutkakuville, mutta kuvausajan myöhästymisen johdosta kuva-aineisto ei ehtinyt tutkimusryhmälle tämän projektin puitteissa. Aineisto on kuitenkin tarkoitus analysoida ja raportoida myös yhteistyökumppaneille puolustusvoimissa kun se on saatavissa.

Työn tuloksissa todetaan, että tutkakuvaus liikkuu selvästi 3D-kuvaustekniikoiden suuntaan. Nopeasti ovat yleistyneet kahta tai useampaa kuvaa yhdistelevät menetelmät kuten interferometria ja pysyvien sirottajien interferometria. Tomografiatekniikat ovat kehittyneet kuitenkin odotettua hitaammin. Yksinkertaisemmat interferometriatekniikat kuitenkin ovat laajalti käytössä ja yhä kasvava koherentti kuva-aineisto mahdollistaa jatkuvasti tarkentuvia korkeusmittauksia ja muutosseurantaa. Kertyvän kuva-aineiston kaikkia mahdollisuuksia ei pystytä vielä hyödyntämään, mutta tulevat menetelmät hyödyntävät varmasti jossain määrin myös historiallista aineistoa.

Tutkimuksen kokeellinen osa perustui pääosin saksalaisella E-SAR-tutkalla vuonna 2003 tehtyihin mittauksiin, mutta siinä käytettiin myös TerraSAR-X- ja ALOS PALSAR-kuvia. Käytössä ollut E-SAR-aineisto ei soveltunut kovin hyvin muutostulkintaan, koska kuvausaikojen väli (minuuteista kymmeneen minuutteihin) oli kuvien resoluutioon nähden liian pieni. Koherenssitomografian käyttö onnistui kuville ja metsäkerroksen sirontaprofiilia onnistuttiin kartoittamaan, mutta jäi kuitenkin epäselväksi voidaanko tekniikkaa käyttää kohteiden havaitsemiseksi metsässä. Tutkimuksissa, joissa verrattiin L-kaistan ja X-kaistan kuvia tulva-alueista, kävi ilmi että X-kaistan tutka näkee syvemmälle metsäkerroksen sisälle kuin aikaisemmin yleisesti on otaksuttu; tätä vahvisti myös E-SAR-aineistolla tehty yksityiskohmainen tutkimus, jossa selvitettiin interferometrisen sirontapisteen paikkaa metsäkerroksen sisällä. Tutkimuksen perusteella voidaan sanoa, että X-kaistan tutka näkee karkeasti ottaen metsäkerroksen ylempään neljänneksen rajalle ja L-kaistan tutka ainakin puoleen väliin. Joissakin tapauksissa kuitenkin myös X-kaistan tutka voi nähdä maan pinnalle asti.

Postiosoite	MATINE Puolustusministeriö PL 31 00131 HELSINKI
Käyntiosoite	Eteläinen Makasiinikatu 8 00130 HELSINKI
Puhelinvaihe	(09) 16001
Pääsihteeri	(09) 160 88310
Suunnittelusihteeri	(09) 160 88314
Toimistos sihteeri	050 5555 837
Faksi kirjaamo	(09) 160 88244

Sähköposti	matine@defmin.fi
WWW-sivut	www.defmin.fi/matine
Y-tunnus	F101460105
OVT tunnus /verkkolaskuosoite	003701460105
Itellan operaattorivälittäjä tunnus	003710948874
Verkkolaskuoperaattori	Itella Information Oy
Yhteyshenkilö/Itella	helpdesk@itella.net

1 Johdanto

SAR-tutka on nopeasti kehittyvä kaukokartoituslaite, joka pystyy kuvaamaan avaruudesta maanpintaa hyvällä resoluutiolla sääolosuhteista riippumatta. SAR-tutka näkee myös sellaisia kohteita, joita optiset laitteet eivät paljasta. Uuden tekniikan laaja saatavuus avaa uusia mahdollisuuksia tiedustelulle ja samalla nostaa myös uusia uhkia maanpuolustukselle. Laadukkaat laajasti saatavilla olevat tutkakuvat yhdistettyinä uusiin mittausmenetelmiin mahdollistavat tiedon hankinnan tasolla, joka vielä kymmenen vuotta sitten oli mahdollista vain suurvaltojen tiedustelusatelliiteille. Euroopan suuret valtiot kuten Saksa ja Italia ovat viime aikoina panostaneet vahvasti SAR-tekniikan kehitykseen ja laukaissut avaruuteen SAR Lupe- ja Cosmo SkyMed- tutkajärjestelmät. Myös Suomelle on tärkeää kehittää asiantuntemusta tällä alalla ja tutkia uusien menetelmien toimivuutta paikallisessa ympäristössä, jotta uhka-arviot pysyisivät ajan tasalla.

Parhaat yleisesti saatavilla olevat SAR-tutkat (TerraSAR-X) pystyvät kuvaamaan jo 1 m resoluutiolla. Nopeasti ovat kehittyneet myös kuvakäsittely ja kuvaustekniikat. Koherenttia tutkasignaalia (signaalin vaihe ja taajuus tunnetaan tarkasti) hyödyntävät tekniikat kuten interferometria, polarimetria ja tomografia mahdollistavat monien kuvien yhdistämisen, mikä puolestaan mahdollistaa tarkkojen korkeusmallien laskemisen, tarkan muutostulkinnan ja jopa metsäkerroksen sisälle tunkeutuvan 3D-kuvauksen. Koherenssiin perustuva muutostulkinta pystyy havaitsemaan maastossa muutoksia, jotka muille instrumenteille ovat näkymättömiä, kuten esimerkiksi ajoneuvojen jäljet maastossa tai tuoreen kävelypolun ruohikossa.

SAR-kuvia voidaan yhdistää eri radoilta, eri ajankohdilta ja jopa eri mittalaitteista. Tämä tarkoittaa myös, että historialliset aineistot voivat antaa uudessa käsittelyssä uusia ja tarkempia tuloksia. Edistyneet menetelmät pystyvät yhdistämään monia kuvia, jolloin mittausta voidaan verrata laser-holografiaan, jossa koherentin signaalin avulla voidaan kartoittaa kohde kolmeulotteisesti. SAR-tomografiaa demonstroi lentokoneesta ensimmäisen kerran saksalaisen DLR-instituutin tutkimusryhmä vuonna 2000.

Toistaiseksi metsä on tarjonnut hyvän suojan, mutta uusien menetelmien kykyä havaita kohteita metsäkerroksen sisällä ei vielä tarkasti tunneta.

2 Tutkimuksen tavoite ja suunnitelma

Tässä tutkimuksessa selvitettiin kirjallisuuskartoituksella, millaiset ovat suuntaukset tutkakuvien analysoinnissa sekä arvioitiin nykyisten menetelmien kykyä kartoittaa maastossa sellaisia kohteita, joita aikaisemmin ei voitu nähdä.

Tämän tutkimuksen toisena päämääränä oli kartoittaa miten hyvin SAR-tutkalla nähdään metsäkerroksen sisälle uusilla kuvien analyysitekniikoilla, interferometrialla ja koherenssitomografialla. Tutkimuksessa käytettiin E-SAR-lentokonetutkan kuvia sekä ALOS-PALSAR- sekä TerraSAR-X-satelliittitutkien kuvia.

Kolmantena päämääränä oli soveltaa koherentteja muutostulkintamenetelmiä olemassa olevaan SAR-aineistoon ja arvioida menetelmän käytettävyyttä ja kykyä havaita muutoksia maastossa ja metsissä.

Tutkimuksen aiheista viimeisteltiin tutkimusprojektin aikana yksi lehtijuttu.

3 Aineisto ja menetelmät

3.1 Tutkatomografian nykytilanne

Tutkatomografia pyrkii tutkimaan kuvattavan kohteen sironnan rakennetta vertikaalisuunnassa. Tutkatomografia mahdollista kolmeulotteisen sironnakartan luomisen kohteesta siten, että se kattaa sekä sirottajien spatiaalisen että vertikaalisen rakenteen. Menetelmät ovat suoraa jatkoa edistyneistä interferometrisistä ja polarimetrisistä menetelmistä. Kuvaukseen tarvitaan kaksi tai useampia tutkakuvia, jotka on mitattu tietyssä suhteessa toisiinsa. Useiden kuvien käyttö mahdollistaa paremman erotuskyvyn pystysuunnassa, mutta itse menetelmissä voi olla rajoituksia kuvien enimmäismäärästä. Tällä hetkellä on käytössä kaksi erilaista lähestymistapaa.

Tutkatomografia (SAR Tomography) on lähellä tavallisia tomografiatekniikoita ja pyrkii mittaamaan kohteen sironnarakennetta rakentamalla synteettisen apertuurin ei ainoastaan pituussuunnassa mutta myös pystysuunnassa. Tämä edellyttää tavallisesti monia mittauksia eri radoilta tai mittausta mittalaiteteknologiaa. Menetelmän käyttö avaruudesta edellyttää käytännössä satelliittien konstellaatiota, koska ratakorkeuden muuttaminen säännöllisesti vaatii paljon energiaa. Kaikki tiedossa olevat mittaukset on toistaiseksi tehty lentokoneella.

Toinen menetelmä käyttää hyväksi *a-priori* -tietoa kohteen oletetusta rakenteesta. Jos sironnan jakautumiselle voidaan olettaa yleinen matemaattinen malli, mallin parametrit on mahdollista sovittaa pienemmän mittausaineiston perusteella kuin mitä vaadittaisiin mallin selvittämiseen. Lupaavinta menetelmää tässä luokassa kutsutaan polarimetriseksi koherenssitomografiaksi (Polarimetric Coherence Tomography: PCT). Menetelmä käyttää polarimetristä mittausta ja tavallisesti sitä käytetään metsäkerroksen sironnan tutkimisessa. Seuraavaksi annetaan lyhyt yhteenveto molempien menetelmien viimeaikaisesta kehityksestä. Tässä esitetään vain yhteenveto; varsinainen raportti on saatavissa tutkimusryhmältä englanniksi.

3.2 Tutkatomografian viimeaikainen kehitys

Tutkatomografiassa rakennetaan erotuskyky korkeussuunnassa rakentamalla synteettinen apertuuri, käytännössä mittaamalla kuvia säännöllisesti eri korkeuksilta. Näin rakennetussa kuvauksessa täytyy ratkaista kaksi perustavaa laatua olevaa ongelmaa:

- a) Mittauksia korkeussuunnassa saadaan yleensä paljon vähemmän kuin maanpinnan tason suunnassa; lisäksi mittauspisteiden geometria on harvoin muuttumaton.
- b) Erotuskykyä korkeussuunnassa rajoittaa kuvan maanpinnan tason resoluutio, joka riippuu sekä tutkan kaistanleveydestä sekä korkeussuuntaisesta apertuurista.

Näiden ongelmien ratkaisemiseksi käytetään yleensä digitaalisesta signaalinkäsittelystä tuttuja spektrin estimointimenetelmiä, kuten ESPRIT, MUSIC ja Capon's beamforming. MUSIC antaa yleensä hyvän tuloksen mutta ei mahdollista heijastuskertoimien määrittelyä, siihen käytetään usein Caponin filttteriä. Menetelmillä on kuitenkin useita rajoituksia ja ne vaativat paljon mittauksia.

Hiljattain on kehitetty uusi menetelmä nimeltään Compressive Sensing. Menetelmä tekee oletuksen, että kohteessa on vertikaalisuunnassa ainoastaan vähän heijastavia kohteita ja keskittyy näiden harvojen kohteiden korkeuden määrittelyyn. Tämä menetelmä on mahdollistanut huiman parannuksen esimerkiksi kaupunkialueiden tomografiakuvaukses-



sa, missä tehty oletus pitää hyvin paikkaansa.

Koska mittausten lisääminen tomografiassa on hankalaa, pyritään jatkossakin menetelmien toimivuutta parantamaan tekemällä oletuksia kohteen rakenteesta.

Tomografisilla menetelmillä on demonstroitu esimerkiksi ajoneuvon löytämistä metsäkerroksen sisältä ja rakennusten ääriviivojen kartoittamista.

3.3 Polarimetrisen koherenssitomografian kehitys

Polarimetrinen koherenssitomografia olettaa kohteelle rakenteen, joka on kuvattavissa jollain yleisellä matemaattisella tasolla. Menetelmä keskittyy oletetun funktion parametriin määrittämiseen. Koherenssitomografia käyttää interferometrasta koherenssia oikean sirontafunktion löytämiseksi. Tulokseksi saadaan yleensä funktion tarkempi muoto, mutta tarkkoja sironta-arvoja ei voida mitata. Menetelmää voidaan tarkentaa lisämittauksilla tai lisätiedolla kohteesta. Yleensä sirontafunktio oletetaan määritettävissä olevaksi Legendre-polynomiksi. Mitä enemmän on mittauksia, sitä tarkemmin polynomi voidaan määrittää.

Menetelmää on käytetty metsän ja peltokasvien sirontaprofiilin tutkimiseen, mutta tutkimus on viime aikoina jokseenkin hiipunut. Menetelmä on matemaattisesti suhteellisen hyvin määritetty ja selkeä, mutta valitettavasti herkkä alkuarvoille.

3.4 Tutkasignaalin tunkeutumissyvyys metsässä

Tomografiamenetelmät pystyvät havaitsemaan kuitenkin vain kohteita, joista tulee kaiku takaisin tutkaan. Tutkasignaali tunkeutuu jonkin verran metsäkerroksen sisälle riippuen signaalin aallonpituudesta ja kuvausgeometriasta. X-kaistan tutkan aallonpituus on muutamia senttimetrejä ja signaali heijastuu suurelta osin jo metsän ylimmästä kerroksesta. L-kaistan aallonpituus on yli kaksikymmentä senttimetriä, joten signaali tunkeutuu metsäkerrokseen paljon syvemmälle. Jotta voitaisiin arvioida koherenssitomografian kykyä nähdä metsän suojassa olevia kohteita, selvitettiin miltä korkeudelta metsäkerroksen sisältä heijastus näyttää tulevan. Siihen käytettiin tutkainterferometriaa ja laserkeilauksella mitattuja tarkkoja korkeusmalleja metsästä ja maastosta.

3.5 Tutkakohereenssiin perustuva muutostulkinta

Interferometriseen koherenssin perustuvalla muutostulkinnalla on saatu hyvin korkean erotuskyvyn tutkilla hämmästyttäviä tuloksia. Menetelmällä on demonstroitu esimerkiksi ajoneuvon jälkien löytyminen aavikolta ja jalanjälkien löytyminen nurmikolta. Havaitseminen edellyttää, että muutos kohteessa tapahtuu kahden kuvauksen välisenä aikana ja että tausta pysyy jokseenkin muuttumattomana sinä aikana. Menetelmä on demonstroitu ensimmäisen kerran jo yli kymmenen vuotta sitten sotilaskäyttöön rakennetuilla korkean taajuuden ja korkean erotuskyvyn (muutamia senttimetrejä) tutkilla. Interferometrasta koherenssia käytetään usein myös luokittelutehtävissä tavallisessa kaukokartoituksessa, mutta siviilikäytössä olevien tutkien resoluutio ei ole niin korkea että yksittäisen ajoneuvon liikkeitä voitaisiin havaita. Menetelmän ongelmana ovat myös taustan muutokset. Suuri osa luonnollisista taustoista muuttuu ajallisesti eri tavalla ja lisäksi tilavuussironta aiheuttaa dekorrelaatiota ja häiritsee tulkintaa. Operatiiviseen seurantaan tarvittaisiin satelliittikonstellaatio, joka mittaa kohteen säännöllisin väliajoin.

3.6 E-SAR-mittaukset

Aalto-yliopistolla on käytettävissään PvTT:n kanssa yhteistyössä saksalaisella E-SAR - tutkalla mitattua interferometrasta monikanta-aineistoa FINSAR-kampanjasta. Aineisto koostuu E-SAR-tutkalla hyvin lyhyellä aikavälillä kuvatuista viidestä L-kaistan POLINSAR-kuvasta, kahdesta X-kaistan tutkakuvasta sekä profiloivan sirontamittarin (HUTSCAT) mittausrakenteista. Geodeettinen laitos on mitannut samalta alueelta myös hyvin tarkan korkeusmallin laserilla. Erittäin monipuolinen aineisto soveltuu polarimetrian, interferometrian ja koherenssitomografian tutkimiseen.

3.7 TerraSAR-X TanDEM-X -aineisto

Projektin alkupuolella tilattiin AO-projektin puitteissa 10 interferometrasta kuvaparia samalta alueelta kuin edellä mainitut E-SAR-mittaukset. Kuvat tilattiin kattamaan aikaväli heinäkuusta marraskuuhun 2011. Valitettavasti AO-projektien ilmaisten kuvien toimitus on tärkeysjärjestyksessä hyvin alhainen, joten tutkimusryhmä ei onnistunut saamaan kuvia projektin aikana. Korvikkeena on käytetty kuvia muista projekteista eri alueilta, mutta kaavailtua menetelmien soveltamista satelliittikuville ei voitu toteuttaa.

4 Tulokset ja pohdinta

4.1 Koherenssitomografia

Tässä työssä sovellettiin koherenssitomografiaa E-SAR-aineistolle ja selvitettiin voidaanko havaita metsässä olevia kulmaheijastimia. Tutkimuksessa käytettiin L-kaistan kuvia ja sekä yhtä että kahta interferometrasta kuvaparia yhtä aikaa. Kulmaheijastimien paikat olivat ennestään tiedossa. Yhden kuvaparin avulla tehdyssä koherenssitomografiassa ei voitu varmuudella tunnistaa kulmaheijastimia. Yhden kuvaparin tapauksessa korkeusresoluutio on erittäin huono ja koska kulmaheijastin oli maan pinnalla, siitä heijastunut signaali oli hyvin samankaltainen maan pinnalta tai kalliosta tullen heijastuksen kanssa. Kahdella kuvaparilla tehty koherenssitomografia osoittautui niin herkäksi alkuarvoille, että hyviä tomogrammeja ei saatu aikaiseksi.

Suurimmaksi ongelmaksi heijastimien löytämisessä osoittautui metsän valtava monimuotoisuus. Vaikka kulmaheijastin näkyisikin kuvassa tai tomogrammissa, sen tunnistaminen on hyvin vaikeata tai mahdotonta koska sitä ei voida erottaa ympäröivästä hälystä. Erityisen haastavaksi tekee tehtävän kalliainen maasto, josta tulevat hyvin voimakkaat heijastukset näyttävät samanlaisilta kuin kulmaheijastimen tuottamat heijastukset.

Sama ongelma vaivaa myös muita tomografiamenetelmiä. Vaikka esineitä on saatu näkyviin tomografialla metsäkerroksen sisältäkin, niiden tunnistamiseen on vielä pitkä matka. Yhtenä ratkaisuna tähän voi olla alueen pidempiaikainen seuranta, jolla voidaan vähentää satunnaisen kohinan määrää ratkaisevasti ja havaita poikkeamat varmemmin. Tilattu TanDEM-X -aikasarjaa ei ehditty saada ennen projektin loppua.

4.2 Tutkasignaalin tunkeutuminen metsäkerrokseen

Tutkasignaalin tunkeutumissyvyyttä metsään tutkittiin vertaamalla sekä X-kaistan että L-

kaistan interferometrialla tuotettuja korkeusmalleja laserkeilaimella mitattuun korkeusmalliin. Todettiin, että X-kaistan sirontapiste on keskimäärin noin 75% korkeudessa puuston korkeuteen verrattuna ja L-kaistan sirontapiste noin 50% korkeudessa puuston korkeuteen verrattuna. Työssä osoitettiin myös, että joissakin tapauksissa ainakin osa X-kaistan tutkaheijastuksesta tulee myös maan pinnalta. Tämä oli yllättävä tulos, koska aikaisemmin on oletettu että X-kaistan lyhyt aallonpituus ei tunkeudu oleellisesti metsäkerroksen sisälle, vaan heijastuu kokonaan metsän ylimmistä kerroksista. Ilmiön syynä voi olla myös suhteellisen harva metsä; muut tutkimukset on tehty pääosin Suomea etelämpänä. Tätä tulosta vahvistaa tulos ryhmän toisesta tutkimuksesta, jossa havaittiin että X-kaistan tutkakuvista voidaan tunnistaa tulvivat metsäalueet lähes yhtä luotettavasti kuin L-kaistan kuvista, vaikka veden taso olisi vain vähän maanpinnan yläpuolella.

Tämän tuloksen valossa voidaan sanoa, että myös X-kaistan tutkakuvilla voidaan tehdä metsien kaukokartoitusta ainakin pohjoisella havumetsävyöhykkeellä, missä puusto on harvaa. Metsän sisältä ei kuitenkaan näin lyhyellä aallonpituudella kovin paljoa tietoa saada. L-kaista sitä vastoin soveltuu hyvin metsien kartoitukseen ja sillä nähdään myös riittävästi metsäkerroksen sisälle, jotta voitaisiin soveltaa tomografiamenetelmiä. Metsän satunnaisuus kuitenkin haittaa merkittävästi tulosten tulkintaa.

4.3 Koherentti muutostulkinta

Kahden L-kaistan polarimetrinen tutkakuvan välistä muutostulkintaa sovellettiin E-SAR-tutkakuville. E-SAR-aineiston interferometrinen kuvasto oli muodostettu viidestä noin 5 minuutin välein lennetyistä mittauksesta, joiden väliltä etsittiin muutoksia sekä amplitudikuvista että koherenssikuvista. Työn tuloksena todettiin, että muutokset kuvien välillä olivat erittäin vähäisiä eikä muutoksia voitu tunnistaa pelkkien koherenssikuvien perusteella. Suurimmaksi esteeksi siihen oli kuvien huono resoluutio (noin 5 m), jota koherenssilaskenta entisestään huononsi, sekä metsien luontainen tilavuusdekorrelaation suuri dynamiikka.

Pieniä muutoksia voitiin kuitenkin löytää kahden amplitudikuvan välillä. Muutokset olivat todennäköisesti ajoneuvojen aiheuttamia heijastuksia, jotka havaittiin vain toisesta kuvasta. Muutostulkinnassa kannattaisikin ottaa huomioon sekä amplitudin muutostulkinta että kuvien välinen koherenssi. Molempien muutosten tulkinta yhdessä voi antaa parhaan tuloksen.

5 Loppupäätelmät

Tässä työssä kartoitettiin modernin siviilikäytössä olevan SAR-tutkan uusimpia kuvaus- ja analysointimenetelmiä ja niiden kykyä tehdä havaintoja metsäkerroksen sisällä olevista kohteista. Työssä tehtiin laaja kirjallisuustutkimus sekä sovellettiin valikoituja menetelmiä E-SAR-lentokonetutkalla kerättyyn aineistoon.

Työn tulosten valossa voidaan sanoa, että uudet menetelmät ovat toistaiseksi vielä hyvin kokeellisia. Menetelmien soveltaminen edellyttää usein järjestelyjä, jotka vaativat hyvin laajaa kokemusta ja kalliita toimia. Kolmeulotteiseen kuvaamiseen tähtäävät tomografiamenetelmät ovat kehittyneet hitaammin kuin olisi voinut olettaa. Tomografiamenetelmillä on kuitenkin demonstroitu esimerkiksi ajoneuvojen havaittavuus metsästä. SAR-tomografiaan tarvittavan mittauksen toteuttaminen avaruudesta vaatisi satelliittikonstel-



laation.

Myöskään yksinkertaisemman koherenssitomografian kehitys ei ole ollut kovin nopeaa. Menetelmä on matemaattisesti hyvin määritelty, mutta suhteellisen herkkä alkuoletuksille. Ryhmän tutkimuksissa on osoitettu aikaisemmin, että maanpinnan tarkan korkeuden tietäminen parantaa merkittävästi menetelmän toimivuutta. Kohteiden havaitsemiseen metsäkerroksen sisällä menetelmä sopii huomattavasti paremmin kuin varsinainen tomografia.

Tomografiamenetelmien kykyä nähdä metsäkerroksen sisälle arvioitiin myös tutkimalla tutkasignaalin tunkeutumissyvyyttä metsäkerroksen sisälle. Yhdistämällä laserkeilausella tuotettu tarkka maasto- ja puustomalli tutkainterferometrikan kanssa arvioitiin X- ja L-kaistan tutkan heijastuspisteen korkeutta metsäkerroksen sisällä. Osoittautui, että L-kaistan heijastuspiste sijaitsee noin puuston korkeuden puolella välillä ja X-kaistan heijastuspiste keskimäärin ylimmässä neljänneksen kohdalla puuston korkeudesta. Harvan puuston tapauksessa kuitenkin myös X-kaistan tutka saattaa nähdä jopa maanpinnalta tulleen heijastuksen.

Työssä kokeiltiin myös muutosten havaitsemista interferometrisellä koherenssilla. Tutkittiin L-kaistan tutkan koherenssikuvia kuvapareille, jotka oli kuvattu noin kymmenen minuutin välein. Todettiin, että menetelmä ei sovellu kovin hyvin muutosten havaitsemiseen ja tunnistamiseen käytössä olleelle aineistolle. Muutokset kuvien välillä olivat pienet ja liittyivät pääosin kuvausgeometrikan muutoksiin sekä tilavuussirontaan liittyviin muutoksiin metsissä. Kuvien erotuskyky oli myös liian karkea pienien muutosten havaitsemiseen. Muutoksia löydettiin paremmin tutkimalla alkuperäisten intensiteettikuvien muutoksia.

Loppupäätelmänä voidaan sanoa, että toistaiseksi uudet menetelmät eivät vielä tarjoa merkittävää lisäarvoa saatavilla oleville SAR-satelliittikuville. Kuitenkin täytyy pitää mielessä, että yksinkertaisetkin menetelmät kuten differentiaalinen interferometria ja pysyvien sirontajien seuranta pystyvät yhdistämään koherentteja SAR-kuvia pitkienkin aikavälien yli ja seuraamaan millimetriluokan muutoksia. Nyt avaruudesta kerätty SAR-aineisto voi osoittautua käyttökelpoiseksi tulevaisuudessakin, kun menetelmät paranevat.

6 Tutkimuksen tuottamat tieteelliset julkaisut

Jaan Praks, Oleg Antropov, Martti Hallikainen, "LIDAR Aided SAR Interferometry Studies in Boreal Forest: Scattering Phase Center and Extinction Coefficient at X- and L-band" Hyväksytty julkaistavaksi IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing-lehdessä.

Työ sisältää yksityiskohtaisen tutkimuksen tutkan interferometrisen sirontapisteen sijainnista Suomelle tyypillisessä metsässä. Tutkimuksessa osoitetaan, että X-kaistan sirontapiste on noin 75% korkeudella ja L-kaistan noin 50% korkeudella metsän korkeudesta. Työssä ehdotetaan myös menetelmää metsän korkeuden laskemiseksi interferometrisestä tutkakuvasta mikäli maaston korkeusmalli on tiedossa.



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.)

MATINE-hankkeen loppulaskutuksen edellytyksenä on loppuraportointi, joka koostuu tälle pohjalle laaditusta Tiivistelmäraportista sekä erillisestä vapaamuotoisesta Kustannusselvityksestä. (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 oma-toimiseen 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.