

TIIVISTELMÄRAPORTTI

Liikkuvan maalin ilmaisu ja tunnistaminen SAR-tutkalla Osahanke A

Juha Jylhä (juha.jylha@tut.fi, +358 41 468 8632)
Risto Vehmas, Minna Väilä, Marja Ruotsalainen, Henna Perälä
Tampereen teknillinen yliopisto (TTY)
Signaalinkäsittelyn laboratorio
Korkeakoulunkatu 1, 33720 Tampere

Tiivistelmä

Synteettisen apertuurin tutka (synthetic aperture radar, SAR) kuvaa maastoa tai meren pintaa ilmakehässä tai avaruudessa liikkuvan lavetin kyydissä. SAR-järjestelmällä on kuvantamisen lisäksi mahdollista ilmaista maastossa tai meren pinnalla liikkuvia kohteita (moving target indication, MTI), jotka paljastuvat tutkan mittaamasta datasta niiden liikkeestä aiheutuvan dopplerin perusteella. SAR-järjestelmän tuottaman kuvan laatuun ja korkeaan erottelukyvyyneen eivät vaikuta kuvausetaisyys tai sääolosuhteet. Viiston kuvausgeometrian ansiosta SAR-järjestelmää ei tarvitse lennättää kuvattavan alueen yli, mikä on sotilaskäytössä mielekäästä. Tässä hankkeessa kehitettiin ja demonstroitiin kyky ilmaista ja kuvantaa maastossa liikkuva maali. Maalin kuvantaminen toteutettiin käänteisellä SAR-käsittelyllä (inverse SAR, ISAR). SAR-järjestelmä tuottaa hyvin suuren määrän tietoa lyhyessäkin ajassa. Kuvien ja kohteiden analysointi vaatii ihmisoperaattorilta paljon työtä. Tässä hankkeessa kehitettiin operaattorin toimia helpottamaan automaattisen kohteen tunnistamisen (automatic target recognition, ATR) menetelmiä. TTY keskittyi yhteishankkeessa järjestelmäkehitykseen yleisesti sekä ohjelmisto- ja algoritmi-kehitykseen ja DA-Design Oy laitteistokehitykseen. Yhteishankkeessa saavutetut laaja-alaiset tulokset osoittavat alustavasti koko menetelmäketjun (SAR, MTI, ISAR, ATR) käyttökelpoisuuden ja puoltavat jatkoa kohti SAR-suorituskyvyn kehittämistä.

1. Johdanto

Tämä kaksivuotinen tutkimus aloitettiin vuonna 2017. Ensimmäisen vuoden aikana tarkastelimme SAR-järjestelmän kykyä tuottaa maastosta muodostetun kuvan lisäksi tietoa maastossa liikkuvista kohteista, aina niiden tunnistamiseen saakka. Ensimmäisenä vuonna suoritettussa menetelmäkehityksessä käytettävissämme oli suppea mittaustietä ja tulokset olivat hyvin alustavia mutta lupaavia. Työ, joka painottui algoritmikehitykseen, on kuvattu tiivistelmäraportissa [4].

Vuonna 2018 tutkimus laajennettiin yhteishankkeeksi. Osahankkeen A suoritti TTY keskittyen SAR-järjestelmäkehitykseen ja SAR-ohjelmistossa käytettävien algoritmien tutkimukseen. Osahankkeen B suoritti DA-Design Oy keskittyen SAR-laitteistokehitykseen. Yhteishankkeessa suoritettu tutkimus suunnattiin yhdessä Puolustusvoimien asiantuntijoiden kanssa erityisesti lyhyen kantaman SAR-järjestelmään soveltuviin menetelmiin ja laitteistoihin. Verrattuna 2017 aloitettuun työhön, vuonna 2018 menetelmäkehitys osahankkeessa A perustui merkittävästi suurempaan ja käytännönläheisempään aineistoon ja algoritmien lisäksi tarkastelu laajennettiin SAR-kokonaisjärjestelmään huomioiden laitteiston määrittely ja kehitystarpeet.

Liikkuvien maalien ilmaisukyvyllä varustettu SAR-järjestelmä mahdollistaa suuren alueen tiedustelun ja valvonnan haastavissakin sääolosuhteissa. Mitatulla alueella liikkuvia maaleja pystytään havaitsemisen lisäksi seuraamaan ja jopa tunnistamaan. Tutkan kohteen tunnistamisen perusongelma on tutkavasteen ja myös SAR-kuvan voimakas riippuvuus suunnasta, josta kohde nähdään. Koska yhteistyökyvyttömän kohteen asentoa ei ennalta tunneta, asento täytyy estimoida perustuen tarjolla oleviin tietolähteisiin, tyypillisesti perustuen tutkan mittaamaan dataan. Tavanomaisen mitattuun opetusdataan ja koneoppimiseen perustuvan hahmontunnistusperiaatteen hyödyntäminen menestyksekkäästi ATR:ssa vaatii hyvin suuren nimiöidyn kuva-aineiston, mikä tekee ratkaisumallista ennemminkin akateemisen kuin käytännössä soveliaan. Sellaisia koneoppimisen opetusaineistoja, joissa kaikki oleelliset kohteet on mitattu kaikista oleellisista suunnista, ei tyypillisesti ole käytettävissä. Tästä syystä on kehitetty mallipohjaisia tai osittain mallipohjaisia ratkaisuja. Mallipohjaisessa ratkaisussa on mahdollista opettaa tunnistusjärjestelmälle kaikki oleelliset valaisugeometriat. Tutkitut menetelmät soveltuvat sekä maassa, merellä että ilmassa olevien kohteiden havaitsemiseen ja tunnistamiseen. Nykyistä laskentatehokkaampia ja luotettavampia algoritmeja tarvitaan, sillä erottelukyvyn jatkuva paraneminen tutkatekniikan kehittyessä ja laskentatehon kasvaessa tuo algoritmeille uudenlaisia vaatimuksia ja mahdollistaa uudenlaisen suorituskyvyn aiempaa merkittävästi pienemmin kustannuksin.

2. Tutkimuksen tavoite ja suunnitelma

Yhteishankkeessa hyödynnettiin TTY:n vuoden 2018 alkupuolella hankkimaa¹ monikanavaista tutkalaitteistoa. Laitteisto ei itsessään ole SAR-tutka, mutta se tarjoaa mittauskyvyn, joka mahdollistaa SAR-kuvantamisen toteuttamisen. Toteutus vaatii oheislaitteita, tutkan liikuttamista SAR-kuvantamisen vaatimalla tavalla ja SAR-ohjelmiston kehittämisen. Tutkimuksen suunnitelmana oli demonstroida SAR-kuvantaminen, liikkuvan maalin ilmaisu ja liikkuvan maalin kuvantaminen uudella tutkalaitteistolla. Työ vaatii tutkan soveltamisen SAR-järjestelmäksi ja algoritmikehitystä menetelmäketjun (SAR, MTI, ISAR) eri vaiheisiin. Lisäksi suunnitelmana oli toteuttaa mallipohjainen ATR-testi. Se edellytti mallipohjaisen kohdekirjaston toteuttamisen ja ATR-menetelmäkehitystä. Mallipohjaisen kirjaston päädyimme luomaan aiemmin kehittämällämme SPURT-ohjelmistolla [8]. Sen syötteenä on kohteiden 3D-mallit (kolmioverkkomallit), joista SPURT laskee kohteen tutkapoikkipinta-alan (radar cross section, RCS) tutkakuvantamisen vaatimalla tavalla [8], laajalla kaistalla ja kaikkiin keskeisiin suuntiin.

Yhteishankkeen tavoitteena oli tutkia ja ratkaista keskeisimpiä ongelmakohtia SAR-suorituskyvyn kehittämiseksi ja luoda pohjaa mahdolliselle kotimaiselle SAR-tuotekehitykselle. Hyvin tärkeää tavoitteen saavuttamiseksi oli kyetä demonstroimaan menetelmät käytännön datalla. Tuloksia voi hyödyntää mahdollisen tuotekehityksen lisäksi järjestelmähankinnoissa sekä SAR-datan hankinnassa ja käsittelyssä.

3. Aineisto ja menetelmät

Tämän raportin kuvaama SAR-järjestelmä- ja menetelmäkehitys perustui tutkamittausaineistoon. Lisäksi ATR-testeissä hyödynsimme tutkan kohteiden simulointia mallipohjaisen kohdekirjaston luonnissa. Kenttäkokeet ja aineisto olivat sen luonteisia, että niillä ei pyritty vielä täysin realistisiin olosuhteisiin. Esimerkiksi kuvattu maasto oli asfalttikenttä, jossa oli autoja ja SAR-kuvaan pistemäisen voimakkaan tutkavasteen tuottavia soppiheijastimia. Samaisella kuvausalueella teimme myös liikkuvien maalien testit. ATR-testit puolestaan perustuivat PVTUTKL:n kääntöpöydällä mitattuihin kohteisiin. Näillä yksinkertaistetuilla kuvaustilanteilla pyrimme siihen, että kykenimme paremmin hallitsemaan kuvaustilanteen menetelmäkehitystä ajatellen. Näkemysemme mukaan teknologian valmiustason (technology readiness level, TRL) näkökulmasta tämä vastaa tason 2–3 mukaisia tarkasteluja, eli MTI-, ISAR- ja ATR-menetelmät ovat vielä perustutkimus-

¹ Tutkalaitteisto hankittiin TTY:n investointirahoituksella; MATINE-rahoitusta ei käytetty laitteistohankintoihin.



lisessä vaiheessa. SAR-kuvantamisen menetelmien kehitys on jonkin verran näitä menetelmiä edellä ja täten TRL:n puolesta korkeammalla tasolla 4–5. Seuraavaksi esitellään tarkemmin testit, aineistot ja menetelmät.

SAR-, MTI-, ISAR-testit

TTY:n keväällä 2018 hankkima laitteisto on 24–26 GHz taajuusalueella toimiva, monikanavainen, ohjelmoitava tutka. Tutka on suoraan kaupan hyllyltä löytyvä edullinen laite (commercial off-the-shelf, COTS). Ohjelmoitavuus viittaa tutkan aaltomuodon ja näytteistyksen ohjaamiseen tutkaan kytketyn tietokoneen avulla, jolloin aaltomuotoa ja sen parametrinta on mahdollista vaihtaa jatkuvasti. Tutkan ohjausohjelmisto taltioi tutkan mittaaman ja tietokoneelle lähettämän datan ohjaustietokoneen kovalevyille. SAR-käytössä oleellisin aaltomuototyyppi on taajuusmoduloitu jatkuva aalto (frequency-modulated continuous wave, FMCW). Stretch-prosessointia hyödyntävä FMCW on hyvin kustannustehokas mittausperiaate, kun tarkoituksena on tuottaa korkea etäisyyserottelukyky edullisella tutkalla. Tällainen tutka mittaa taajuuspyyhkäisyllä jopa 2 GHz:n laajuisen taajuuskaistan täysin koherentisti, mutta käyttää hetkellistä kaistanleveyttä vain 10 MHz. Tämä saavutetaan käyttämällä vastaanotettavan signaalin miksaamisessa tutkan senhetkistä lähetystaajuutta ja ilmaisemalla vain 10 MHz kyseisen taajuuden ympäristöä. Lähetys- ja vastaanottotaajuutta muutetaan lineaarisen taajuuspyyhkäisyn mukaisesti läpi koko 2 GHz:n kaistan. Tutka tuottaa näytteitä maltillisella nopeudella, mikä rajoittaa taajuuspyyhkäisyjen toistotaajuuden matalaksi. Tästä syystä tällainen edullinen tutka kelpaa hyvin tutkimuksellisiin tarkasteluihin ja menetelmäkehitykseen, mutta ei nopeasti liikkuvaan SAR-järjestelmään tai nopeasti liikkuvien kohteiden mittaamiseen. Suurimmat mahdolliset liikenopeudet ovat 10 m/s suuruusluokassa. FMCW-tutka on mahdollista toteuttaa myös huomattavasti nopeammalla näytteistyksellä, mutta emme löytäneet sellaisia COTS-laitteiden valikoimasta tutkahankintaa suunnitellessamme. Tarkastelimme FMCW-tutkan hyödyntämistä ja vaatimuksia lyhyen kantaman SAR-käytössä raportissa [3], joka julkaistiin suppealla jakelulla huhtikuussa 2017.

Vaikka käyttämämme tutkan lähetysteho on vain 20 mW, jatkuvasti lähetävä koherentti tutka kykenee kuvantamistutkimuksen kannalta käyttökelpoiseen kantamaan. Tutkassa on yksi lähetinkanava sekä neljä vastaanottokanavaa. Monikanavainen vastaanotto mahdollistaa muun muassa liikkuvan maalin ilmaisun ja kuvantamisen [4]. Tässä raportissa esitetyissä testeissä ja tuloksissa lähetin- ja vastaanottokanaviin oli kytketty torviantennit, joissa on n. 16° asteen 3dB-keilanleveys ja maksimivahvistuksena n. 20 dBi. Järjestelmää kehitettiin useiden testien avulla tämän tutkimuksen aikana. Tässä raportissa käsitellään ainoastaan viimeisintä testiä ja sen tuloksia.

Testasimme SAR-kuvantamisen sekä liikkuvan maalin ilmaisun ja kuvantamisen tekniikoita Forsassa DA-Design Oy:llä suoritetuissa kenttäkokeissa. Mittauksissa käytössä olivat tutkan kaikki neljä vastaanottokanavaa. Mittauksia varten tutka antennineen kiinnitettiin henkilönostimeen, jota ajettiin teollisuushallin piha-alueella synteettisen apertuurin muodostamiseksi. Henkilönostimen avulla tutka saatiin nostettua n. 10 metrin korkeuteen todenomaisen SAR-geometrian muodostamiseksi, eli tutka katsoo kuvattavaa aluetta yläviistosta. Kuvattavan alueen koko etäisyyssuunnassa oli n. 30 metriä ja henkilönostin liikkui mittauksen aikana n. 40 metrin matkan n. 0.5 m/s nopeudella tutkan kuvatessa nostimen ja hallin välissä olevaa aluetta. Henkilönostimen kyytiin oli asennettuna myös videokamera, inertiamittausyksikkö ja laserosoitin antennien suuntaamisen helpottamiseksi. Tutkaa ohjattiin nostimen kyydissä olleella tietokoneella, johon myös mitattu tutkadata tallennettiin. Kuvattavalle alueelle oli sijoitettuna erikokoisia soppiheijastimia sekä henkilöautoja. Alueella olevat objektit olivat joko paikallaan tai yksittäistä henkilöautoa ajettiin (liikkuva maali) tutkan liikkuesssa. Yksi käytetyistä mittausasetelmista näkyy kuvassa 1.



Kuva 1. Forssassa DA Design Oy:llä suoritettujen kenttäkokeiden mittausjärjestely ja kuvattu alue. Vasemmassa kuvassa esitetään tutkan ja oheislaitteiden asennus lavettina toimineeseen henkilönostimeen. Oikeassa kuvassa on kuvausalue ja tutkan lavetti näkyvissä. Henkilönostinta liikutettiin teollisuushallin seinän suuntaisesti, joka mahdollisti SAR-kuvan muodostamisen hallin ja nostimen välisestä alueesta. Tutkan elevaatio suunnan keilan valaisema alue on hahmoteltu kuvaan keltaisilla viivoilla.

Testeissä käytetty COTS-tason FMCW-tutka ei sisällä mitään signaalinkäsittely- ja SAR-ohjelmistoa. Tutkan ohjelmisto tallentaa kompleksisen raakadatan tietokoneen kovalevylle ja kaikki tämän jälkeinen datan käsittely – esikäsitteilyt, kalibroinnit, etäisyyskompressio ja kuvantaminen – on toteutettu itse. SAR-kuvantamiseen ja liikkuvan maalin ilmaisuun hyödynsimme aiemmin tutkimiamme ja kehittämiamme menetelmiä perustuen aika-alueen kuvanmuodostukseen sekä adaptiivisesti aika- ja spatiaalista ulottuvuutta hyödyntävään menetelmään (space-time adaptive processing, STAP). ISAR-kuvanmuodostuksessa hyödynsimme kehittämäämme laskentatehokasta useassa eri vaiheessa suoritettavaa algoritmikonaisuutta [5]. Hankkeessa kehitimme myös suoraviivaisempaa ISAR-algoritmia, joka perustuu kuvan laadun optimointiin aika-alueen takaisinprojektiomenetelmää hyödyntäen [7], [9]. Implementoimme algoritmit ja suoritimme numeeriset tarkastelut MATLAB-ohjelmointiympäristössä.

ATR-testit

ATR-tutkimuksessa hyödynsimme PVTUTKL:n kääntöpöydällä tehtyjä automittauksia sekä SPURT-simulointijärjestelmää. Automittaukset on toteutettu ulkoilmassa kääntöpöydällä taajuutta askeltavalla tutkalla vaakapolarisaatiolla 0–10 asteen elevaatiokulmissa ja tiheällä atsimuuttinäytteistyksellä S-taajuusalueella. SPURT on TTY:lla kehitetty RCS-simulointimenetelmä, jossa kohteet mallinnetaan pistejoukkoina. Yksittäisellä pistejoukolla voidaan laskea kohteen RCS nopeasti mielivaltaiselle määrälle vastaanottimia ja taajuuksia tiettyyn maksimi-kantoaaltoaajuuteen asti. Varsinkin monostaattisen RCS:n simulointi on menetelmällä erittäin nopeaa [8].

Tarkastellussa ATR-kirjastossa oli kuvassa 2 esitetyt viisi kulkuneuvoa, joista neljästä oli käytössä myös vastaava 3D-malli RCS:n simulointiin. Muodostimme sekä mitatun että mallinnetun referenssiaineiston eli ATR-kirjaston tallentaen kullekin kulkuneuvolle kaikista suunnista asteen välein lasketut ISAR-kuvat. Käytimme molempia kirjastoja neljäntoista kirjallisuudessa esitetyn SAR-tunnistuspiirteiden laskentaan. Hyödynsimme laskennassa aiemmin kehittämäämme menetelmää [1] kohteen asentoestimaatin epävarmuuden huomiointiin ja muodostimme jokaisesta tunnustuspiirteestä jakauman atsimuuttisuunnan funktiona käyttäen niin kutsutulle asentoepävarmuuden keskihajonnalle arvoa 5° . Tämä tarkoittaa, että kohteen estimoidun asennon oletetaan poikkeavan todellisesta tyypillisesti noin 5° . Piirreperustainen tunnistaminen perustui piirrejakaumien posteriorin laskentaan ja eri piirteiden posteriorien yli laskimme keskiarvon. Luokitus päätöksen teimme suurimman posteriorikeskiarvon perusteella. Menetelmän hyötynä on se, että mitatun kohteen piirrettä ei tulkita mitattuna täsmälleen asentoestimaatin kertomasta suunnasta, vaan mukaan on mallinnettu estimoinnin virhe.



Kuva 2. Viisi PVTUTKL:n tutkalla mitattua kulkuneuvoa: Corolla, Focus, Golf, Transporter ja Valmet. Mitattuja tutkavasteita käytettiin tunnistustarkastelussa.

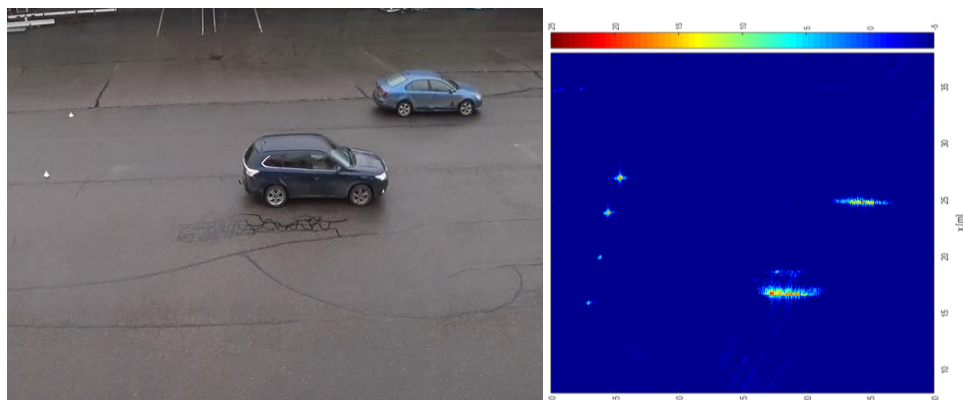
Piirrepohjaisen luokituksen lisäksi tarkastelimme kohteen luokittamista raakadatan perusteella. Laskimme kullekin asteen välein mitatulle SAR-apertuurille RCS-histogrammin taajuuden ja atsimuutin funktiona. Histogrammien laskenta perustuu aiemmin kehittämäämme menetelmään [1], käyttäen asentoepävarmuuden keskihajontana arvoa 5° . Tarkastelimme viiden kulkuneuvon luokitusta käyttäen etäisyysmittana kohteiden histogrammiesityksien yli lasketun maansiirtoetäisyyden (Earth mover's distance, EMD) keskiarvoa. Luokitus määräytyy pienimmän EMD-etäisyyden mukaan.

4. Tulokset ja pohdinta

Seuraavaksi esitellään tulokset ja pohditaan niiden merkitystä.

SAR-kuvantaminen FMCW-tutkalla

Kuvassa 3 on yhdessä testissä mittauksen tuloksena saatu SAR-kuva mitatusta alueesta. Kuva on muodostettu käyttäen 1 GHz:n taajuuspyyhkäisyä, joka mahdollistaa n. 15 cm etäisyysresoluution. SAR-kuvat on laskettu aika-alueen takaisinprojektiomenetelmällä. Sivuttaiserottelukyvyn muodostamiseksi liikerata on jaettu noin kahden metrin mittaisiin apertuureihin, jotka mahdollistavat noin 10 cm:n sivuttaisresoluution. Kukin apertuuri on fokusoitu erikseen vaihegradienttimenetelmää [2] hyödyntäen, ja lopulliseen kuvaan on epäkoherentisti summattu kaikkien apertuurien tulos; kuvantaminen on siis suoritettu niin kutsutulla stripmap-periaatteella.



Kuva 3. Vasemmalla kamerakuva kuvattavasta alueesta tutkan näkökulmasta (henkilönostimesta) kuvattuna. Oikealla SAR-kuva samasta alueesta, josta selkeästi erottuvat soppiheijastimet sekä autojen kyljet; kuvassa on pystyakselilla tutkan etäisyysuunta (range) ja vaaka-akselilla sivusuunta (cross-range). Väri on tutkavasteen intensiteetti logaritmisella asteikolla.

Liikkuvan maalin ilmaisu FMCW-tutkalla

Liikkuvan maalin ilmaisun testaamiseksi suoritimme mittauksen, jossa toinen henkilöautoista liikkui kuvatulla alueella mittauksen aikana. Testissä henkilöauton katolle laitettiin soppiheijastin liikkuvasta maalista tulevan tutkavasteen vahvistamiseksi. Ilmaisun suoritettiin hyödyntämällä STAP-tekniikassa käytettyä sovitettua suodatusta ja monikanavaista vastaanottoa. Ilmaisun tuloksena saadaan estimoitua auton kulmasuunta (sivusuunta tutkaan nähden), etäisyys ja nopeus,

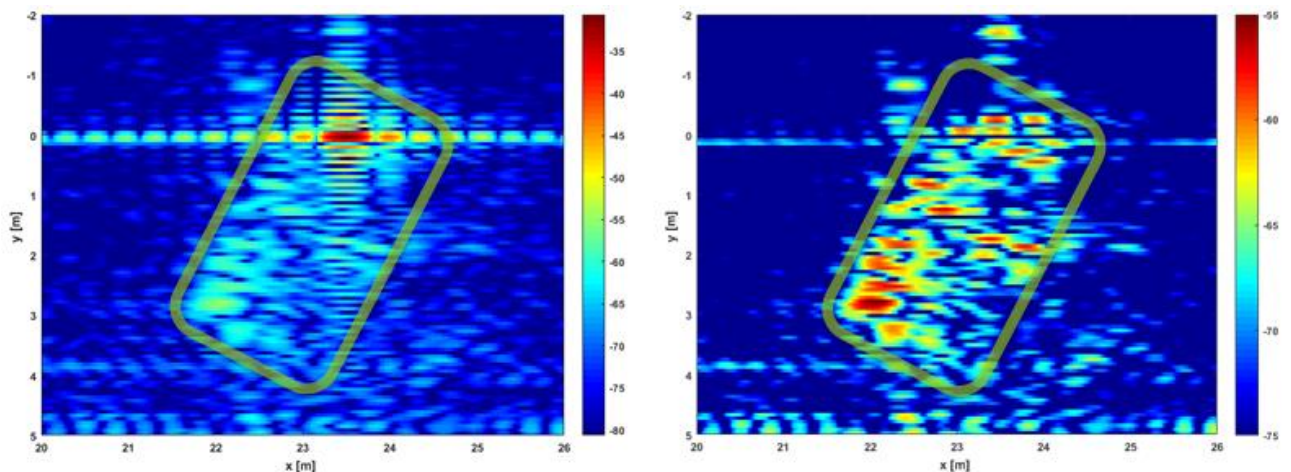
joiden avulla voidaan esittää auton liikerata kuva-alueella. Kuvassa 4 nähdään yhdessä testissä ilmaisuuden tuloksena saadut liikeradan pisteet alueesta muodostetun SAR-kuvan päälle piirrettyinä.



Kuva 4. Vasemmalla valokuva mittausjärjestelystä, jossa tumma henkilöauto on liikkeessä mittauksen aikana. Tutkalavetti näkyy kuvassa taustalla mittaamassa kohti valokuvan ottajaa. Oikealla on tilanteesta muodostettu SAR-kuva ja liikkuvan maalin ilmaisusta saadun liikeradan pisteet (punaiset ympyrät); kuvassa on pystyakselilla tutkan etäisyysuunta (range) ja vaak akselilla sivusuunta (cross-range). SAR-kuvassa nähdään soppiheijastin sekä henkilöauton kylki. Väri on tutkavasteen intensiteettiä logaritmisella asteikolla.

Liikkuvan kohteen kuvantaminen FMCW-tutkalla

Liikkuvasta kohteesta voidaan myös laskea kuva ISAR-käsittelyllä [5]. SAR-kuvan laskentaan erona on haastavampi kohteen tuntemattoman liikkeen kompensointiongelma. ISAR-käsittelyä testattiin kuvassa 4 esitetyllä mittausdatalla. Tätä varten signaalista ikkunoitiin etäisyysalue, jonka sisällä liikkuva kohde oli mittauksen aikana. Lisäksi STAP-tekniikalla on mahdollista suodattaa paikallaan pysyvän maaston aiheuttamaa vastetta pois ennen ISAR-käsittelyä. Kyseisessä testissä asfalttialueen pinnasta tullut tutkavaste oli kuitenkin niin heikkoa, että suodatuksesta ei ollut merkittävää hyötyä. Mittauksen aikana liikkuneesta autosta laskettu ISAR-kuva on esitetty kuvassa 5. Auton katolla ollut soppiheijastin mahdollistaa ISAR-kuvan fokuusoimisen hyvin teräväksi.



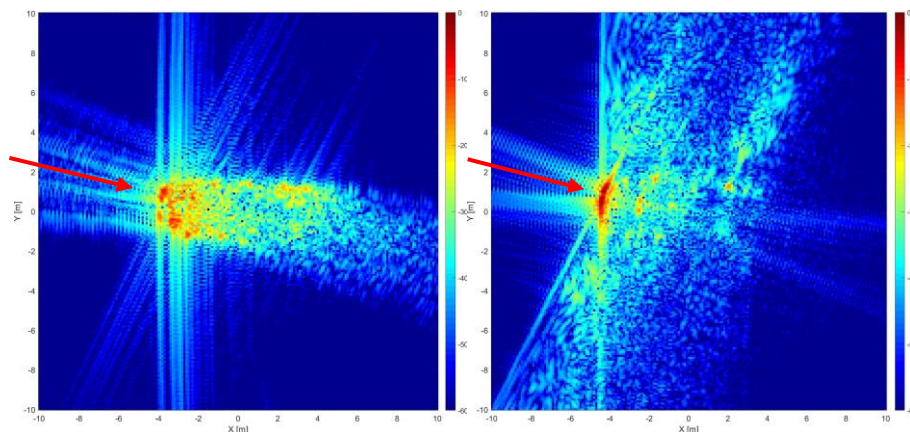
Kuva 5. Liikkuvasta autosta laskettu ISAR-kuva. Vasemmassa kuvassa näkyy voimakkaana auton katolla olleen soppiheijastimen vaste. Oikealla olevasta kuvasta soppiheijastimen vaste on suodatettu pois, jolloin autosta tullut vaste ja sen muoto erottuvat paremmin. Väri on tutkavasteen intensiteettiä logaritmisella asteikolla. Auton hahmon ääri viivat on piirretty kuvaan vihreänä reunuksena.

Suoritetuissa tarkasteluissa (SAR, MTI, ISAR) saavutetut tulokset todentavat liikkuvan maalin ilmaisuun kykenevän pienikokoisen FMCW-SAR-järjestelmän toimivuuden alustavalla proof-of-

concept -tasolla. Kattavat kenttätestit, sisältäen esimerkiksi haastavampia taustavälkeympäristöjä, on yksi oleellinen seuraava kehitysaskel. Lisäksi jatkokehitykseen kuuluu oleellisesti SAR-kokonaisjärjestelmän integrointityö, johon sisältyvät lentävä lavetti ja muut SAR-järjestelmän osat, kuten satelliittinavigointi- ja inertiasensorit. Järjestelmän ja algoritmien kattava testaus ja validointi erilaisissa olosuhteissa ja ympäristöissä on myös tärkeä jatkokehitysaskel, joka jäi tämän tutkimuksen ulkopuolelle.

ATR mittauksiin perustuvalla kirjastolla ja mallipohjaisella kirjastolla

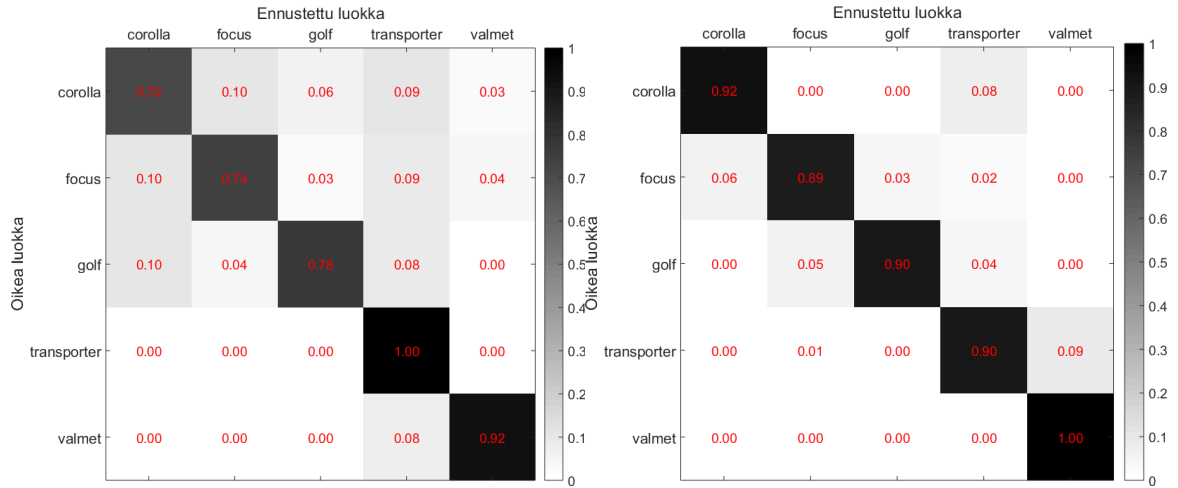
Kohteen automaattisen tunnistuksen suorituskyvyn tarkastelussa hyödynsimme kääntöpöytämitauksia viidestä ajoneuvosta. Tunnistus suoritettiin samoilla menetelmillä kuin vuoden 2017 tutkimuksessa, mutta käytimme nyt referenssiaineistona mitatun aineiston lisäksi mallinnettua referenssiaineistoa ja tarkastelimme näiden kahden välistä eroa tunnistuskyvyn kannalta. Raportissa [4] esiteltiin X-taajuusalueen ATR-tuloksia ja tässä raportissa esitellään vain S-taajuusalueen ATR-tuloksia tarjoten tällä tavoin uutta tietoa aiempien tulosten rinnalle. Taajuusalueen valintaan vaikutti myös se, että simulaatiot olivat noin kymmenen kertaa nopeampia laskettavia S-taajuusalueelle verrattuna X-taajuusalueeseen. Tarkasteltuja tunnistusmenetelmiä oli kaksi: piirteisiin ja tilastolliseen luokittimeen (suurin posteriori) perustuva menetelmä sekä raakadatasta laskettujen RCS-histogrammien EMD-etäisyyteen perustuva menetelmä. Mallipohjaisen kirjaston käyttäminen tuo esiin huomattavia haasteita. Kuva 6 esittää esimerkin mitatun ja SPURT:lla mallinnetun signatuurin välisestä erosta.



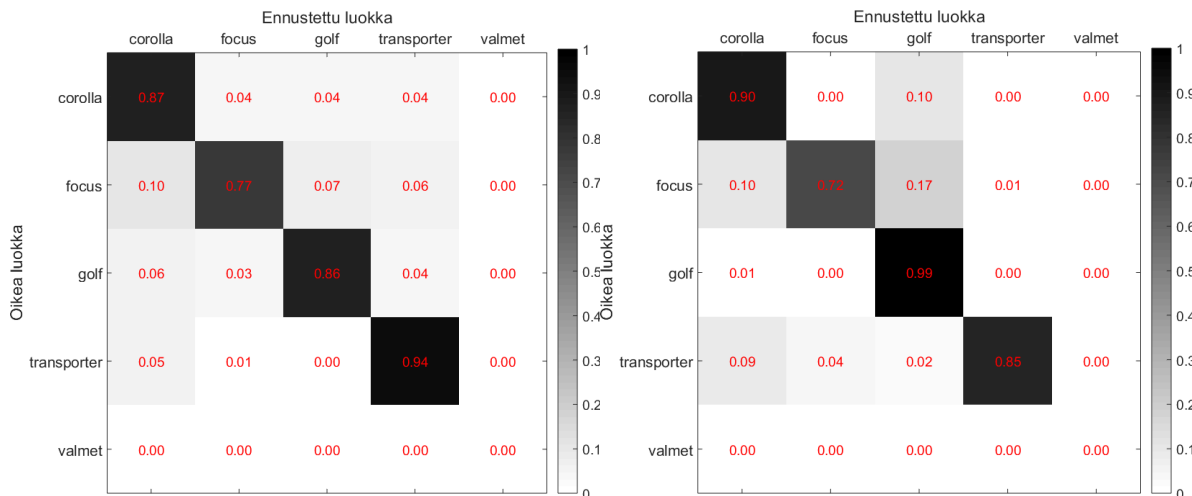
Kuva 6. Mitatun ja mallinnetun SAR-signatuurin välinen ero. Vasemmalla on mitattu Toyota Corolla etuviistosta ja oikealla sen SPURT-ohjelmistolla mallinnettu signatuuri. Tutkan valaisun suunta on merkattu kuvaan punaisilla nuolilla. Väri on tutkapoikkipinta-ala dBsm-asteikolla (decibel square meter). Mallinnuksen suurimmat heikkoudet ovat 3D-mallista puuttuvat oikealla tavalla läpinäkyvät ikkunat ja auton sisätilat sekä mallinnusmenetelmän aiheuttama vasteen leviäminen sivusuuntaisiin (cross-range) sivukeiloihin. Jälkimmäinen heikkous on yksi mallinnuksen jatkokehityskohde.

Kuvassa 7 on esitetty tunnistustulokset sekaannusmatriisien muodossa käyttäen mitattua referenssiaineistoa mitatun SAR-kuvan tunnistukseen. Kuvassa 8 on vastaava tulos käyttäen mallinnettua referenssiaineistoa mallinnetun SAR-kuvan tunnistukseen ja kuvassa 9 käyttäen mallinnettua referenssiaineistoa mitatun SAR-kuvan tunnistukseen. Tulokset on esitetty keskiarvotettuna kaikkien atsimuuttisuuntien yli eli kohteen vaakatason kääntymiskulmaa (heading) on testissä muutettu kaikkiin suuntiin tutkaan nähden, ja näistä testitapauksista on laskettu tunnistustodennäköisyys keskiarvotettamalla. Sekä piirrejakaumiin että RCS-jakaumiin perustuvassa menetelmässä olemme soveltaneet asentoepävarmuuden mallintamista [1] keskihajonnalla 5° . Kuvassa 9 esitetyn mielenkiintoisimman testin tulos on heikko johtuen erityisesti mallin ja mittauksen välisestä poikkeamasta. Mallinnuksen kehitys havaittujen puutteiden osalta onkin yksi mallinnuksen jatkokehityskohde. Tarkasteltu mallipohjainen tunnistustesti oli myös luonteeltaan hyvin vaativa, sillä neljän hyvin samankokoisen ja muotoisen kohteen erottelu toisistaan SAR-kuvan perusteella

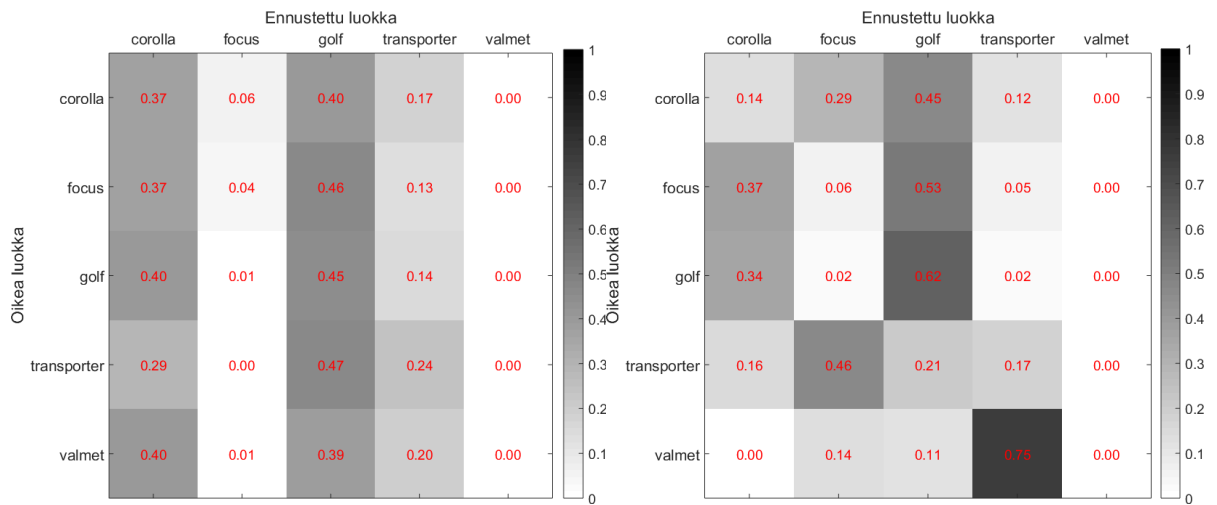
on äärimmäisen haastavaa.



Kuva 7. Tunnistustulokset verraten mitattua SAR-kuvaa mitattuun referenssiaineistoon S-taajuusalueella resoluutiolla 10 cm. Vasemmanpuoleinen sekaannusmatriisi vastaa pirre-pohjaista menetelmää ja oikeanpuoleinen sekaannusmatriisi histogram-pohjaista menetelmää. Sekaanusmatriiseissa lukemat ja harmaasävy ilmaisevat tunnistustodennäköisyyden.



Kuva 8. Tunnistustulokset verraten mallinnettua SAR-kuvaa mallinnettuun referenssiaineistoon S-taajuusalueella resoluutiolla 10 cm. Vasemmanpuoleinen sekaannusmatriisi vastaa pirre-pohjaista menetelmää ja oikeanpuoleinen sekaannusmatriisi histogram-pohjaista menetelmää. Sekaanusmatriiseissa lukemat ja harmaasävy ilmaisevat tunnistustodennäköisyyden. Valmet-traktorista ei ollut käytössä 3D-mallia, joten se ei ollut mukana mallinnetussa kirjastossa eikä sitä näin ollen voida tunnistaa ko. mallinnettua kirjastoa käyttäen.



Kuva 9. Tunnistustulokset verraten mitattua SAR-kuvaa mallinnettuun referenssiaineistoon S-taajuusalueella resoluutiolla 10 cm. Vasemmanpuoleinen sekaannusmatriisi vastaa piirrepohjaista menetelmää ja oikeanpuoleinen sekaannusmatriisi histogrammipohjaista menetelmää. Sekaanusmatriiseissa lukemat ja harmaasävy ilmaisevat tunnistustodennäköisyyden. Valmet-traktorista ei ollut käytössä 3D-mallia, joten se ei ollut mukana mallinnetussa kirjastossa.

Jatkossa tunnistuspiirteisiin kannattaa perehtyä vielä tarkemmin ja selvittää, mitkä niistä ovat hyödyllisimpiä. Lisäksi piirteitä kannattaisi hyödyntää yhdessä älykkäämmin nykyisessä ratkaisussa käytetyn posterioritodennäköisyyksien keskiarvotuksen sijaan.

Piirre- ja histogrammipohjaisten lähestymistapojen lisäksi kohteen tunnistuksen yhteydessä tutkittiin korrelaation hyödyntämistä, jossa tavanomaisten menetelmien perusongelmana on tuntemattomat rotaatio ja rotaatioakselin sijainti. Kehittämämme ratkaisumalli mahdollistaa kohteen tunnistuksen lisäksi myös kohteen valaisu- ja rotaatiokulman selvittämisen. Tunnistettavan kohteen SAR-kuvasta sekä eri kohteiden referenssi-SAR-kuvista eri valaisukulmissa etsittiin voimakkaimmat sirottajat. Tämän jälkeen kuvadata uudelleennäytteistettiin polaariseksi käyttäen kutakin voimakkainta sirottajaa vuorollaan origona. Origin oletetaan löytyvän tunnistettavista signatuureista ja referenssisignatuureista liki samasta kohdasta. Tarkasteltavan SAR-kuvan polaarimatriiseja korreloitiin referenssiaineistosta laskettujen polaarimatriisien kanssa. Korrelaatiossa polaarimatriiseja pyöritettiin (rotaatioakseli origossa) keskenään etsien parasta korrelaatiotuloksen perusteella määritettiin tarkasteltavan kohteen valaisukulma ja kohdetyyppi. Kun mittauksiin perustuen tuotettuja SAR-kuvia verrattiin mittauksista tuotettuun referenssiaineistoon, kohteiden tyyppi ja valaisukulma kyettiin ennustamaan oikein. Kun mittauksiin perustuen tuotettuja SAR-kuvia puolestaan verrattiin mallintamalla tuotettuun referenssiaineistoon, ei kohteiden tyyppiä tai valaisukulmaa kyetty ennustamaan. SAR-kuvista laskettujen polaarimatriisien korreloimiselle suurimman haasteen muodostivat edellä mainitut poikkeamat mallintamalla tuotetun ja mitatun SAR-aineiston välillä (ks. kuva 6). Menetelmän kehittämiseksi saavutettiin arvokasta tietoa, mutta kehitys jäi vielä kesken.

Tehdyn tunnistustarkastelun heikkoutena oli testikohteiden pieni määrä (4–5 kappaletta). Luotettavaa suorituskyvyn arviointia varten kohteiden määrän pitäisi olla selvästi suurempi ja kohteita tulisi olla mukana eri tyyppisistä kulkuneuvoista, jotka mielellään edustaisivat erilaisia kohdekategorioita. Tyyppitunnistuksen lisäksi olisi siis kiinnostavaa tarkastella kohteiden karkeampaa kategorisointia SAR-signatuurien perusteella. Tunnistuskäsittelyn tulisi kyetä huomioimaan tuntemattomat kohteet eli kohteet, joita ei ole kirjastossa. Kokonaisprosessin suorituskyvyn arvioimiseksi liikkuvien maalien ilmaisu ja kuvantaminen olisi tehtävä todellisen maaston seasta käyttäen erilaisia testitapauksia.

5. Loppupäätelmät

Tutkimuksessa kyettiin toteuttamaan COTS-tason FMCW-tutkasta SAR-järjestelmä, jolla demonstroitettiin alustavalla tasolla lyhyen kantaman SAR-kuvantaminen, liikkuvan maalin ilmaisu ja liikkuvan maalin kuvantaminen. On huomionarvoista, että liikkuvan maalin kuvantamisesta (liikkuvalla) SAR-tutkalla on hyvin vähän tuloksia esitettynä kirjallisuudessa. Keskeisimpinä puutteina ja myös jatkokehitysajatuksina ovat kattava SAR-järjestelmän integrointi ja menetelmien monipuolinen validointi erilaisissa mittausympäristöissä, liikkuvan maalin korkeuden estimointi ja maaston 3D-kuvantaminen. Kaksi jälkimmäistä vaativat sivu- ja pystysuunnassa aseteltua antenniryhmää tähdäten erityisesti liikkuvien maalien nykyistä tehokkaampaan ilmaisemiseen haastavan maaston ja puuston seasta sekä myös matalalla lentävien kohteiden ilmaisemiseen, joka jäi tässä tutkimuksessa testaamatta.

Saadut ATR-tulokset ovat kaiken kaikkiaan lupaavia, vaikka useita kehityskohteita nousi esiin. Testissä oli 4–5 ajoneuvoa, joista kolme oli muotoilultaan ja mitoiltaan liki identtisiä. Lisäksi niiden 3D-malleissa ei ollut materiaalitietoa, jolloin autojen ikkunat mallinnettiin sähköä johtavina ja tutkalle läpinäkymättöminä. Mitatun ja mallinnetun signatuurin ero oli tyypillisesti liian suuri. Nämä seikat tekivät mallipohjaisen kohdekirjaston testistä äärimmäisen haastavan ja ATR-tuloksista ei siltä osin voi vetää kovin pitkälle meneviä johtopäätöksiä. Hankkeessa kehitetyistä ATR-menetelmistä erityisesti kohteen asennon määrittämiseen liittyvän epävarmuuden huomiointi on suorituskykyä lisäävää ja uutuusarvoista. Jatkossa tulisi laajentaa tarkastelua suuremmalle määrellä mitattuja kohteita käyttäen laajempaa mittauksiin, mallinnukseen tai molempiin perustuvaa kohdekirjastoa. Kohteen mallinnusta kannattaa kehittää havaittujen puutteiden osalta. Ehdotetun signatuurien korrelaatiomenetelmän jatkokehittäminen tarjoaa mahdollisuuden kohdesignatuurien välisen etäisyysmitan kehittämiseen sekä kohteen asennon estimointiin.

Tutkimuksessa tavoiteltu SAR, MTI, ISAR, ATR -menetelmäkokonaisuuden kehittäminen kohti SAR-suorituskyvyn rakentamista voidaan todeta edenneen hyvin. Saavutetuilla tuloksilla on tieteellistä uutuusarvoa, mikä on osoitettu myös julkaisemalla [5]–[9]. Yhteishankkeen yhteenvetona voi esittää, että FMCW-tutkaan perustuva lyhyen kantaman SAR-järjestelmä vaikuttaa hyvin kustannustehokkaalta ja suorituskykyiseltä ratkaisulta maaston ja merialueiden tiedusteluun ja valvontaan. Tutkimuksessa käytetyllä COTS-tason FMCW-tutkalla voidaan vähintään demonstroida suorituskykyä, mutta suorituskyvyltäänä varsinaiseen SAR-käyttöön riittävän tutkan kehittäminen ei ole kaukana. COTS-tutkan keskeisinä puutteina on todettu näytteistykseen hitaus ja kantama, joiden molempien kehittäminen merkittävälläkin tavalla on saavutettavissa kustannustehokkaasti. Osaaminen järjestelmän toteuttamiseksi otti merkittävän harppauksen eteenpäin tämän hankkeen aikana.

6. Tutkimuksen tuottamat tieteelliset julkaisut ja muut mahdolliset raportit

Kirjoitimme tämän kaksivuotisen tutkimuksen tuloksista useita julkaisuja. Tänä vuonna niistä julkaistiin [5]–[9] ja osa saaduista tuloksista on edelleen julkaisematta tiedejulkaisuissa. Artikkelit [5] ja [7] sekä väitöskirja [9] käsittelevät kuvanmuodostusalgoritmeja. Artikkelin [6] ja siihen liittyvän esityksen laadimme kutsuttuna NATO SET-251 -ryhmän kokoukseen; aiheena oli kohteiden ISAR-signatuurien laskennan ja simuloinnin menetelmät sekä ATR. Konferenssiartikkelissa [8] käsitelimme kohteen SAR-signatuurien simuloinnin nopeuttamista. Tarkoituksemme on jatkaa julkaisemista aihepiirissä.

- [1] M. Väilä, J. Jylhä, H. Perälä ja A. Visa, Performance evaluation of radar NCTR using the target aspect and signature, *2014 IEEE Radar Conference*, Yhdysvallat, IEEE, s. 623–628, toukokuu 2014.
- [2] R. Vehmas, *Liikekompensatio- ja autofokusmenetelmät SAR- ja ISAR-tutkien signaalinkäsittelyssä*, Ylöjärvi: Puolustusvoimien Tutkimuslaitos (Puolustusvoimien tutkimuslaitoksen julkaisuja), 112 sivua, 2016.



-
- [3] R. Vehmas ja J. Jylhä, *MiniSAR-järjestelmän suunnittelua*, Tekninen raportti, Tampereen teknillinen yliopisto, Signaalinkäsittelyn laboratorio, huhtikuu 2017.
- [4] J. Jylhä, R. Vehmas, M. Ruotsalainen, M. Väilä ja H. Perälä, *Liikkuvan maalin ilmaisu ja tunnistaminen SAR-tutkalla*, MATINE-tiivistelmäraportti – Tampereen teknillinen yliopisto, MATINE, joulukuu 2017.
- [5] R. Vehmas, J. Jylhä, M. Väilä, J. Vihonen ja A. Visa, Data-driven motion compensation techniques for noncooperative ISAR imaging, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 54, no. 1, IEEE, s. 295–314, tammikuu 2018
- [6] R. Vehmas, J. Jylhä, H. Perälä, M. Väilä ja M. Ruotsalainen, Algorithms for target ISAR signature reconstruction, Artikkelijä kutsuttu esitys, *3rd Meeting of NATO SET-251 "Ship radar signature management – benefit to ships"*, toukokuu 2018.
- [7] R. Vehmas ja J. Jylhä, A contrast optimization algorithm for back-projection image reconstruction in noncooperative ISAR imaging, *12th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR 2018)*, Saksa, VDE, s. 464–469, kesäkuu 2018.
- [8] H. Perälä, M. Väilä ja J. Jylhä, M-SPURT—Compressing the target characterization for a fast monostatic RCS simulation, *International Conference on Radar 2018*, Australia, IEEE, elokuu 2018.
- [9] R. Vehmas, Computational algorithms for improved synthetic aperture radar image focusing, Väitöskirja, Tampereen teknillinen yliopisto, lokakuu 2018.