

TIIVISTELMÄRAPORTTI

Liikkuvan maalin ilmaisu ja tunnistaminen SAR-tutkalla

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

Tiivistelmä: Tässä hankkeessa tutkittiin maastossa liikkuvien maalien ilmaisua, kuvantamista ja tunnistamista synteettisen apertuurin tutkalla (synthetic aperture radar, SAR). Tällaiseen suorituskykyyn kykenevän ilmakehässä tai avaruudessa liikkuvan SAR-järjestelmän täytyy olla varustettu usealla erikseen digitoidulla vastaanotinkanavalla. Hankkeessa kehitettiin algoritmia, joka yhdistää perinteiset ilmaisu-, kuvantamis- ja tunnistustekniikat yhtenäiseksi ja laskentatehokkaaksi kokonaisuudeksi tuottaen uudenlaista hyödyllistä suorituskykyä SAR-järjestelmälle. Liikkuvan maalin ilmaisussa sovellettiin monikanavaisella antenniryhmällä mitatun signaalin adaptiiviseen suodatukseen (space-time adaptive processing, STAP) perustuvaa menetelmää. Algoritmissa ilmaisun ja taustavälkkeen suodatuksen jälkeen liikkuvasta maalista muodostetaan korkean erottelukyvyn kuva hyödyntämällä käänteistä SAR-laskentaa (inverse SAR, ISAR). ISAR-laskennassa estimoidaan liikkuvan maalin liiketila käyttäen kehittämiämme datapohjaisia liikekompensaatiomenetelmiä. Liikkuvan maalin tunnistus suoritetaan käyttäen muodostettua ISAR-kuvaa. Tunnistuksen osalta hankkeessa tutkittiin sekä ISAR-kuvista laskettujen piirteiden että raakadatan perusteella suoritettavaa tunnistusta, joista molemmat havaittiin toimiviksi periaatteiksi. Yksi osa tunnistusalgoritmia on kohteen asennon estimointi, koska kohteet kuvautuvat SAR-kuvaan hyvin erinäköisinä eri suunnista mitattuna. Kehitimme hankkeessa menetelmän, jossa asentoestimoinnin epävarmuus huomioidaan SAR-kuvatun kohteen tunnistuksessa. Tutkimuksen kaikissa osa-alueissa ilmaisussa, kuvantamisessa ja tunnistamisessa saatiin lupaavia tuloksia. Hankkeen toisena vuotena 2018 on tarkoitus jatkokehittää näitä kaikkia osa-alueita.

1. Johdanto

SAR on kuvaava tutka, jolla muodostetaan tyypillisesti kuvaa katsomalla lentävästä lavetista sivulle ja valaisemalla maastoa yläviihosta. Järjestelmän etäisyysmittauskyky perustuu signaalin tarkkaan viivemittaukseen lähettimen ja vastaanottimen välillä. Korkea etäisyserottelukyky saavutetaan hyödyntämällä laajakaistaista lähetettä. Sivusuunnan mittauskyky perustuu antennin säteilykuvioon, ja korkea sivuttaiserottelukyky saavutetaan muodostamalla leveä ns. synteettinen antenniaperttuuri hyödyntämällä kohdealueen ja tutkan välistä suhteellista liikettä. SAR-kuvan laskenta suoritetaan olettamalla lentokoneen liikerata tunnetuksi ja maanpinta staattiseksi. Tästä syystä maanpinnalla liikkuvat kohteet eivät SAR-kuvaa muodostettaessa kuvaudu oikein vaan niistä tuleva vaste siirtyy ja mahdollisesti myös leviää ympäristöön.

SAR-järjestelmää voidaan tehokkaasti hyödyntää liikkuvien maalien ilmaisuun (moving target indication, MTI) hyödyntämällä useasta vastaanotokanavasta koostuvaa systeemiä. MTI-tekniikoissa ideana on eliminoida tutkasignaalista staattisena pysyvän taustan eli maastosta tulevan taustavälkkeen aiheuttama vaste. Tällöin ideaalisessa tapauksessa jäljelle jäävät ainoastaan liikkuvan maalin vaste ja kohina. Adaptiiviseen signaalinkäsittelyyn perustuvissa STAP-tekniikoissa [1–3] perusideana on käyttää antenniryhmän tarjoamia lisävapausasteita staattisena pysyvän vasteen eliminointiin. Maalin ilmaisemista häiritsevän signaalitaustan suodat-

Postiosoite	Käyntiosoite	Puhelin	s-posti, internet
Postadress	Besöksadress	Telefon	e-post, internet
Postal Address	Office	Telephone	e-mail, internet
MATINE/Puolustusministeriö	Eteläinen Makasiinikatu 8 A	Vaihde 295 160 01	matine@defmin.fi
PL 31	00130 Helsinki		www.defmin.fi/matine
FI-00131 Helsinki	Finland		
Finland			

taminen kasvattaa ilmaisun herkkyyttä merkittävästi.

Etenkin sotilassovelluksissa liikkuvan maalin ilmaisun lisäksi on tärkeää myös tunnistaa maali. Nykyisten SAR-järjestelmien resoluutio on parhaimmillaan 10 senttimetrin luokkaa, mikä mahdollistaa pienienkin maalien tunnistamisen SAR-kuvasta. Tunnistamista varten liikkuvasta kohteesta on kyettävä muodostamaan korkean erottelukyvyn kuva, mikä vaatii taustavälkkeen eliminoimisen ja apertuurin muodostamisen kohteen vasteelle. Taustavälke voidaan suodattaa pois hyödyntämällä STAP-menetelmää ja liikkuvasta maalista voidaan laskea onnistuneesti tarkentunut kuva hyödyntäen käänteisessä SAR-laskennassa käytettäviä liikekompensaatioalgoritmeja [4–6].

Tutkamaalin tunnistamisen perusongelma on tutkavasteen (ja myös SAR-kuvan) voimakas riippuvuus suunnasta, josta kohde nähdään. Koska tunnistaminen liittyy usein kohteisiin, jotka eivät ole yhteistyöhaluisia, kohteen asentoa ei ennalta tunneta. Asento täytyy tavalla tai toisella estimoida perustuen tarjolla oleviin tietolähteisiin. Useimmat kirjallisuudessa esitellyt SAR-kuvannetun kohteen automaattisen tunnistamisen (automatic target recognition, ATR) menetelmät perustuvat mitatuista SAR-kuvista laskettuihin piirteisiin ja niiden perusteella opetettuun luokittimeen [7]. Erityisen hyviä ovat sellaiset piirteet, joiden arvo pysyy mahdollisimman samanlaisena kohteen asennon muuttuessa. Perinteisen mitattuun opetusdataan ja koneoppimiseen perustuvan hahmontunnistusperiaatteen hyödyntäminen menestyksekkäästi SAR-ATR:ssa vaatii hyvin suuren nimiöidyn kuva-aineiston, mikä tekee ratkaisumallista ennemminkin akateemisen kuin varsinaisesti vielä nykypäivänä käytännössä soveliaan. Toistaiseksi sellaisia opetusaineistoja, joissa kaikki oleelliset kohteet on mitattu kaikista oleellisista suunnista, ei tyypillisesti ole käytettävissä. Tästä syystä on kehitetty mallipohjaisia tai osittain mallipohjaisia ratkaisuja, joissa ei käytetä välttämättä ollenkaan mitattua opetusaineistoa, vaan tunnistettavat kohteet mallinnetaan kohdekirjastoon [7]. Mallia on mahdollista kääntää kaikkiin asentoihin, jolloin koko signatuurivariaatio on mahdollista oppia tai muuten mallintaa tunnistuksen suorittamista varten. Mallipohjaisen ratkaisumallin ongelmana on laskentakuorma, joka vaaditaan kohdekirjaston tuottamiseen [7].

Tutkimuksessa tarkasteltava kokonaisuus yhdistettynä korkean resoluution SAR-kuvantamiseen suurelta alueelta parantaa tilannetietoisuutta mahdollistamalla kuva-alueella liikkuvan maalin tunnistamisen. Erityisesti kasvava laskentateho sekä tutkatekniikan kehittyminen mahdollistavat näiden tekniikoiden yhdistämisen tavalla, joka on alalla uutuusarvoista.

2. Tutkimuksen tavoite ja suunnitelma

Tutkimuksessa toteutettava algoritmi ilmaisee mitatulla alueella liikkuvan maalin ja laskee siitä ISAR-kuvan sen tunnistamista varten. Tarkoituksena oli hyödyntää ilmaisuun ja taustavälkkeen suodatukseen STAP-menetelmää sekä kehittää ISAR-laskentaan soveltuva algoritmi, jolla pystytään lähes reaaliaikaisesti muodostamaan hyvin korkean resoluution (jopa n. 10 cm) kuva liikkuvasta maalista.

Tunnistukseen sovelletaan tutkimuksen suorittavan ryhmän aiemmin kehittämää tutkaherätekirjastoon pohjautuvaa menetelmää. Tutkimuksen pääpaino on liikkuvan maalin kuvantamisessa, ja tunnistusalgoritmin toteutus ja tarkastelut ovat mukana erityisesti, jotta voidaan arvioida muodostuvan kuvan laatua kohteentunnistuksen näkökulmasta.

Tutkimuksen tuloksena syntyy laskenta-algoritmeja sekä demonstraatiototeutus MATLAB-ohjelmistolla. Algoritmien testaamiseen hyödynnetään Puolustusvoimien Tutkimuslaitoksen suorittamia tutkamittauksia sekä simuloitua dataa.

Tutkimuksen tavoitteena on tuottaa tietoa, menetelmiä ja osaamista kansallisen SAR-suorituskyvyn edistämiseen. Tuloksia voi hyödyntää tuotekehityksessä, järjestelmähankinnoissa sekä SAR-datan hankinnassa ja käsittelyssä.

3. Aineisto ja menetelmät

Liikkuvien kohteiden ilmaisussa hyödynnettiin kirjallisuudesta tunnettua STAP-menetelmää [1–3]. Tässä monikanavaisen antenniryhmän signaalinkäsittelyyn soveltuvassa adaptiiviseen suodatukseen perustuvassa menetelmässä ideana on maksimoida liikkuvasta kohteesta heijastuneen vasteen tehon ja taustasta ja kohinasta tulevan vasteen tehojen suhde (signal to interference and noise ratio, SINR). Tämä tehdään suodattamalla ensin etäisyyskompressoidusta signaalista taustavälkkeen aiheuttama vaste, ja sen jälkeen etsimällä jäljelle jäävästä signaalista liikkuvaa kohdetta sovitetulla suodatuksella. Sovitetun suodatuksen tulosta käsitellään testisuureena, jolle suoritetaan kynnystesti. Mikäli testisuureen arvo ylittää vakioidun virheilmaisumäärän (constant false alarm rate, CFAR) -kynnysarvon, saadaan ilmaisu. Testisuureen laskemiseen käytetyn sovitetun suotimen parametreista selviää kohteen suunta antenniryhmään nähden (sivusuunnassa) sekä sen radiaalinen nopeus.

Ilmaisun jälkeen signaalista suodatetaan pois maaston aiheuttama taustavälke hyödyntäen STAP-menetelmää. Taustavälkkeestä suodatetulle signaalille suoritetaan ISAR-käsittely, jossa kohteen liiketilaa estimoidaan ratkaisemalla useita sopivasti määriteltyjä optimointiongelmia. Algoritmin vaiheet ovat etäisyyskohdistus, aika-ikkunan optimointi, autofokus, kiilakivi-interpolaatio, aika-taajuusesityksen muodostaminen ja sivusuunnan skaalaus [4–6]. Ilmais- ja kuvantamisalgoritmeja testattiin PVTUTKL:n tutkalla henkilöautosta mitattujen datojen ja simuloitun maastovälkesignaalin avulla. Suoritetuissa tarkasteluissa signaaliin emuloitiin erilaisia liiketiloihin ja summattiin simuloitua maastovälkettä. Tutkimuksessa hyödynnetyt PVTUTKL:n tutkan henkilöautomittaukset ovat julkista aineistoa.

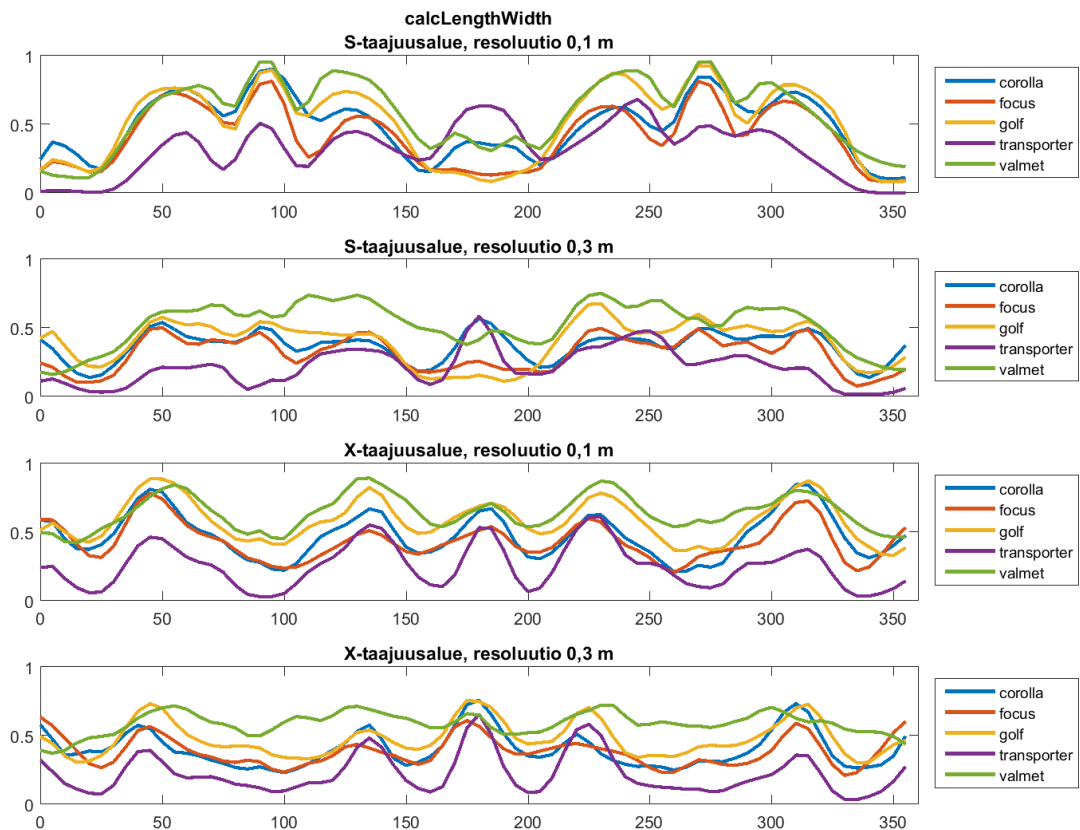
Tunnistustarkastelussa hyödynsimme samaa PVTUTKL:n tutkalla kulkuneuvoista mitattua aineistoa. Tarkastelussa SAR-ATR-kirjastossa oli kuvassa 1 esitetyt viisi kulkuneuvoa. Kulkuneuvot oli mitattu tiheästi kaikista atsimuuttisuunnista (kohteen koordinaatistoon sidottu sivusuunta) ja muutamasta elevaatio-suunnasta (kohteen koordinaatistoon sidottu pystysuunta) läheltä vaakasuuntaa. Muodostimme SAR-ATR-kirjaston tallentaen kullekin kulkuneuvolle kaikista suunnista viiden asteen välein lasketut SAR-kuvat. Käytimme muodostettua kirjastoa neljän-toista kirjallisuudessa esitetyn SAR-tunnistuspiirteen herkkyyden tarkasteluun asentoestimoinnin virheen kannalta. Tässä hyödynsimme aiemmin kehittämäämme menetelmää [8–9] kohteen asentoestimaatin epävarmuuden huomiointiin ja muodostimme jokaisesta tunnistuspiirteestä jakauman atsimuuttisuunnan funktiona käyttäen niin kutsutulle asentoepävarmuuden keskihajonnalle arvoa 5° . Tämä tarkoittaa, että kohteen estimoidun asennon oletetaan poikkeavan todellisesta tyypillisesti noin 5° . Esimerkki tällaisesta piirrejakaumasta on esitetty kuvassa 2, josta nähdään, että yksittäisen piirteen kyky erotella kohteet toisistaan vaihtelee riippuen tarkastelusuunnasta. Yksittäinen piirre ei riitä erottelemaan kohteita kunnolla. Tästä syystä tunnistuksessa on syytä käyttää yksittäisen piirteen sijaan useita piirteitä yhtä aikaa. Testasimme piirreperustaista kohteiden luokitusta hyödyntäen suuntakohtaisista piirrejakaumista tuotettuja posterioritodennäköisyyksiä. Jokaiselle piirteelle laskimme posteriorin 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.

Piirrepohjaisen luokituksen lisäksi tarkastelimme kohteen luokittamista raakadatan perusteella. Laskimme kullekin viiden asteen välein mitatulle SAR-apertuurille vasteen (tutkapoikkipinta-ala, radar cross section, RCS) histogrammin taajuuden ja atsimuutin funktiona. Histogrammien laskenta perustuu aiemmin kehittämäämme menetelmään [8–9], käyttäen asentoepävarmuuden keskihajontana arvoa 5° . Kuva 3 havainnollistaa yhden apertuurin (josta voidaan laskea yksi SAR-kuva) histogrammiesitystä. Tarkastelimme viiden kulkuneuvon luokitusta käyttäen etäisyysmittana kohteiden histogrammiesityksien yli lasketun Earth mover's distance

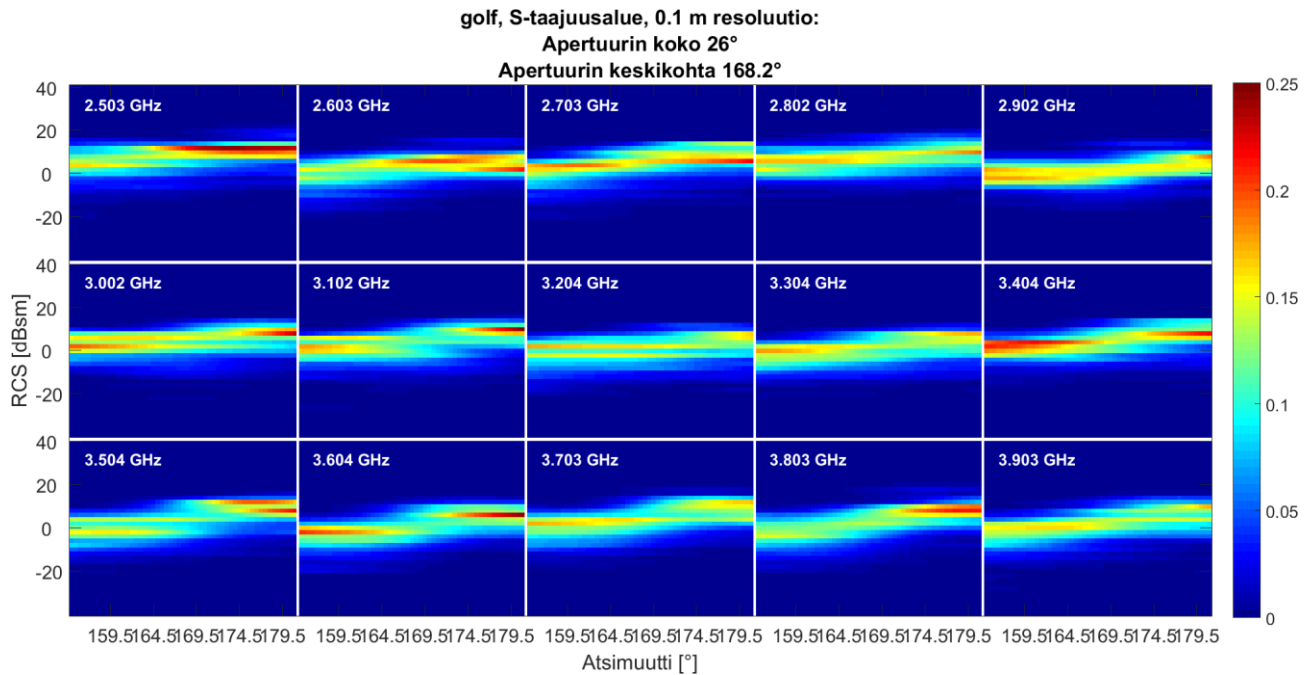
(EMD) -etäisyyden keskiarvoa. Luokitus määräytyy pienimmän etäisyyden mukaan.



Kuva 1: Viisi PVTUTKL:n tutkalla mitattua kulkuneuvoa: Corolla, Focus, Golf, Transporter ja Valmet. Mitattuja tutkavasteita käytettiin tunnistustarkastelussa.



Kuva 2: Esimerkki tunnistuspiirteen jakauman odotusarvon vaihtelusta atsimuuttisuunnan funktiona. Esimerkkipiirteenä on kohteen leveyden ja pituuden välinen suhde. Kohteen keula on suunnassa 0° ja perä on suunnassa 180° . Piirteen kyky erotella kohteita riippuu suunnasta.



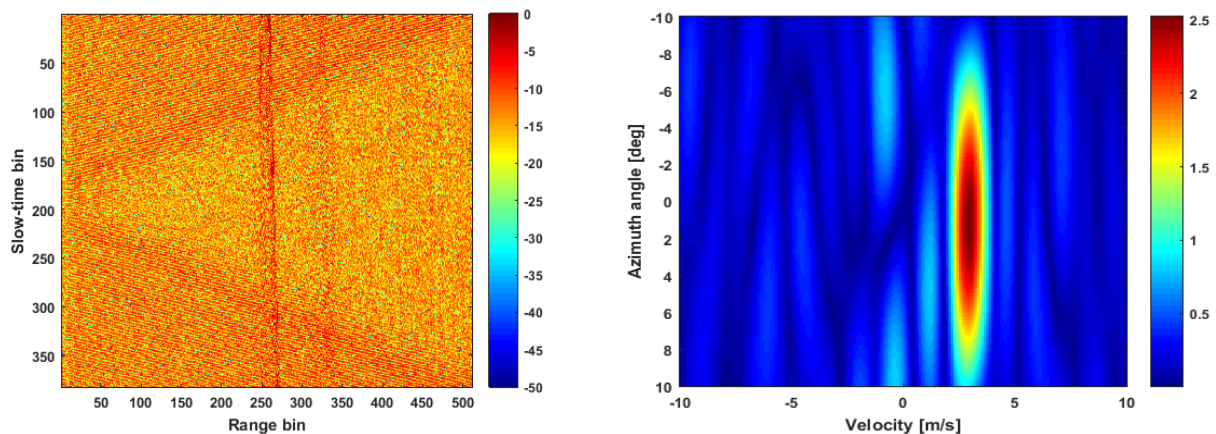
Kuva 3: Esimerkki yksittäisen SAR-apertuurin raakadatasta lasketuista vasteen (tutkapoikkipinta-alan) histogrammeista. Koko mittauskaista 2,5–4,0 GHz on jaettu 15 osaan, joille jokaiselle on laskettu oma atsimuutin (eli pitkän ajan) yli muuttuva histogrammi. Koska histogrammi muuttuu melko hitaasti atsimuutin (eli kohteen asennon) muuttuessa, tunnistaminen histogrammin perusteella ei ole erityisen herkkä asentoestimoinnin epävarmuudelle.

4. Tulokset ja pohdinta

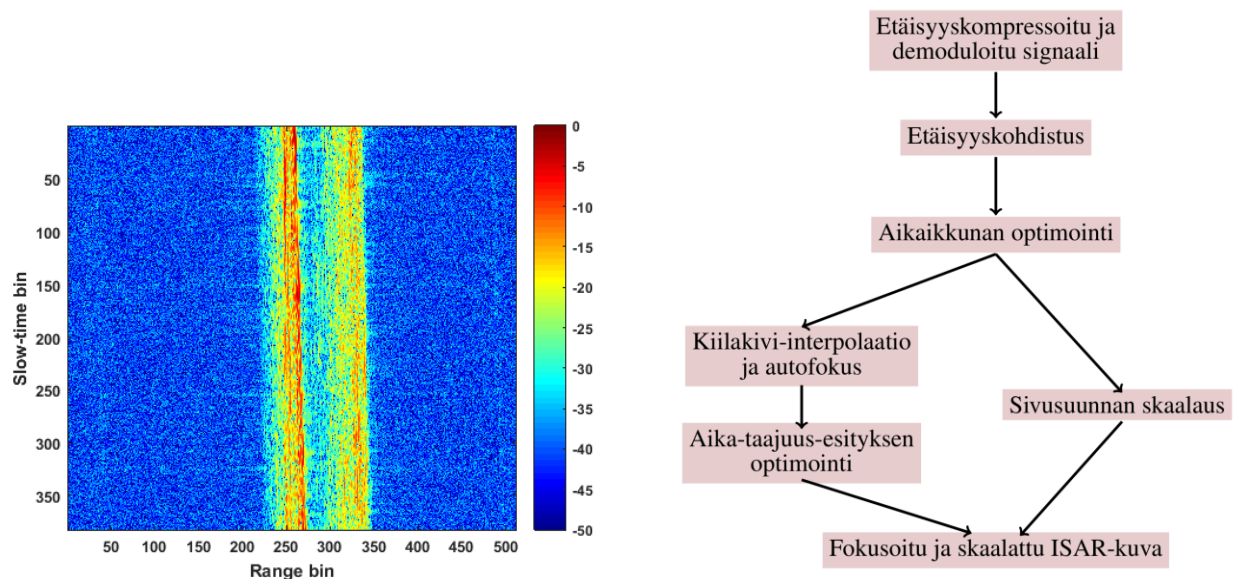
Tutkimuksen tuloksena syntyneet algoritmit ja numeeriset esimerkit toteutettiin hyödyntäen MATLAB-laskentaohjelmistoa. Seuraavaksi havainnollistetaan ilmaisu- ja kuvantamisalgoritmeja käyttäen hyödyksi henkilöautosta mitattua dataa, johon on summattu simuloitu maastovälkesignaali. Maastovälkesignaali on amplitudiltaan Rayleigh-jakautunutta, ja SINR ennen STAP-käsittelyä on -15 dB. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että autosta tuleva vaste on lähes kokonaan voimakkaan signaalitaustan peitossa, kuten kuvasta 4 huomataan. STAP-tekniikassa muodostetaan taustavälkkeen poistava suodin, jolla suodatetaan etäisyyskompressoitua monikanavasignaalia. Tämän jälkeen ilmaisu suoritetaan sovitetulla suodatuksella. Sovitetun suodatuksen tulos toimii testisuureena CFAR-kynnystestissä. Tämän testisuuren arvo, kohteen sivusuunnan ja nopeuden funktiona, tarkastellussa laskentaesimerkissä on piirretty kuvassa 4. Havaitaan, että testisuurella on selkeä maksimi atsimuuttisuunnassa nolla astetta (suoraan antenniryhmää vastaan kohtisuorassa suunnassa) ja radiaalisen nopeuden arvolla 3 m/s.

Algoritmin seuraavassa vaiheessa STAP-menetelmää hyödyntämällä suodatetaan signaalista taustavälkkeen aiheuttama vaste pois. Suodatuksen tuloksena saatu signaali on piirretty kuvassa 5. Tälle signaalille suoritetaan kuvan 5 lohkoavion mukainen ISAR-käsittely, jossa estimoidaan ja kompensoidaan liikkuvan maalin tuntematonta liiketilaa. ISAR-algoritmi koostuu useasta erillisestä optimointitehtävästä, joissa kussakin etsitään optimaalisia arvoja kohteen liikeparametreille, jotta kohteesta saadaan laskettua paras mahdollinen ISAR-kuva. Algoritmeissa kuvan laadun mittarina on käytetty kuvan kontrastia. Kuvassa 6 on piirretty STAP- ja ISAR-käsittelystä tuloksena saatu kuva sekä ideaalinen laskentatulokset ilman simuloitua taustavälkettä. Vertaamalla näitä kuvia havaitaan, että epäideaalisesta suodatuksesta jäljelle jäävä residuaalinen välkejäte aiheuttaa pohjakohinatason nousua. Lisäksi kohteen muoto on hieman vääristynyt. Tämä johtuu heikentyneestä SINR:stä ideaaliseen tapaukseen verrattuna, sillä ISAR-

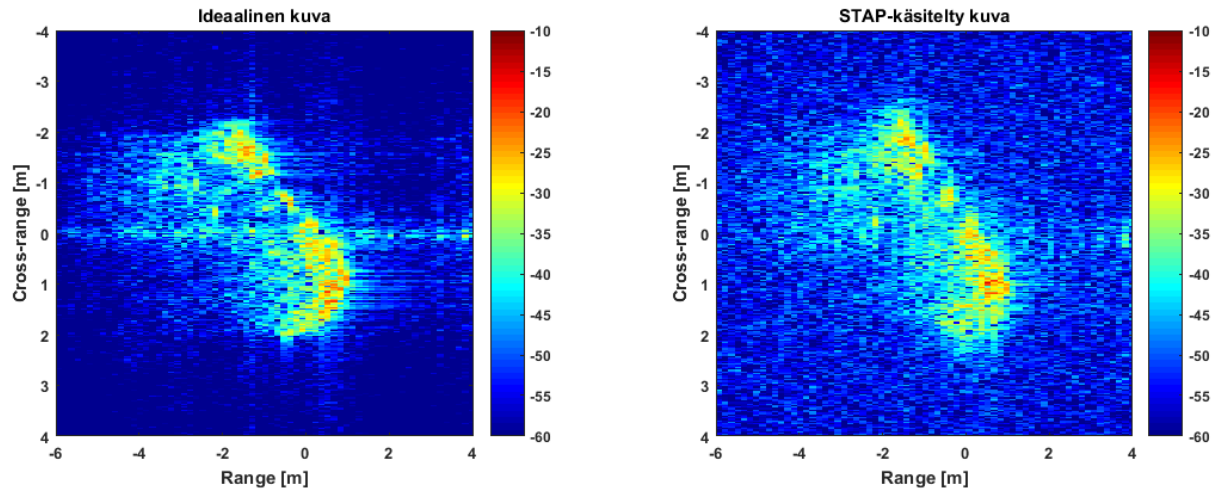
algoritmissa suoritettavien optimointitehtävien ratkaisun laatu heikkenee SINR:n pienentyessä. Liikkuvan maalin kuvantaminen voimakkaan vasteen tuottavan maaston seasta on siten huomattavasti haastavampi ongelma kuin matalaherätteistä taustaa vasten mitatun liikkuvan maalin kuvantaminen, kuten ilma-alus mitattuna maasijoitteisella tutkalla. Vuoden 2017 aikana rajoituimme käyttämään menetelmän kehityksessä ja tarkasteluissa vain mitattua henkilöautoa ja simuloitua maastotaustaa. Hyvänä puolena tällaisessa tarkastelussa on se, että maasto ei ole ainakaan tietynlainen yksittäistapaus, joka voisi olla sattumalta helppo tai vaikea. Lisäksi kykenimme asettamaan juuri tietynlaisen SINR:n ennen maaston ja kohteen summaamista yhteen. Jatkossa on tärkeää päästä testaamaan menetelmää eri tyyppisille mitatuille kohteille eri tyyppisiä todellisia mitattuja maastotaustoja vasten.



Kuva 4: Vasemmalla näkyy mitattu henkilöautosignaali, johon on summattu simuloitu maastovälkesignaali (SINR = -15 dB). Oikealla on STAP-menetelmässä käytetyn testisuuren arvo kohteen suunnan (sivusuunta antenniryhmään nähden) ja nopeuden funktiona. Kohde ilmaistaan testisuuren kynnyksestä perusteella. Tässä tapauksessa kohteen vaste on riittävän voimakas ilmaistavaksi.



Kuva 5: Taustavälkkeestä suodatettu signaali (vasemmalla) ja lohkokaaevio tutkimuksessa sovelletusta ISAR-algoritmista (oikealla). Suodatetuttu signaali toimii sisäänmenona ISAR-algoritmillemme.



Kuva 6. Vasemmalla on ideaalinen kuva henkilöautosta, ilman simuloitua taustavälkettä. Oikealla puolestaan on suoritettu STAP- ja ISAR-käsittelyt signaalille, jossa oli simuloitua taustavälkettä. Tuloksesta havaitaan pohjakohinatason nousu ja pieni auton muodon vääristymä.

Kohteiden tunnistusta koskevat tulokset laskettiin piirteisiin ja tilastolliseen luokittimeen (suurin posteriori) perustuvalla menetelmällä sekä raakadatasta laskettujen RCS-histogrammien EMD-etaisyyteen perustuvalla menetelmällä. Tulokset on esitetty kuvassa 7. Nämä tunnistustestit on tehty käyttäen kulkuneuvoista mitattua tutkadataa (kuva 1). Kuvassa 7 esitetyt tulokset ovat keskiarvo kaikista atsimuuttisuunnista, eli kohteen heading on ollut testissä kaikkiin suuntiin tutkaan nähden, ja niistä on laskettu tunnistustodennäköisyys keskiarvottamalla. Heading-virhe 0° tarkoittaa, että testinäyte on täsmälleen samasta suunnasta kuin kirjastosta ladattavat referenssijakaumat. Heading-virhe 5° tarkoittaa, että testinäyte on tasan 5° virheellisestä suunnasta referenssijakaumaan nähden. Sekä piirrejakaumiin että RCS-jakaumiin perustuvassa menetelmässä olemme soveltaneet asentoepävarmuuden mallintamista keskihajonnalla 5° [8–9]. Tämän vuoksi molemmat menetelmät kestävät kohteen asentoestimaatin virhettä kohtalaisen hyvin.

Piirrejakaumien tuottaminen kohdekirjastoon poikkeaa vaatimuksiltaan RCS-jakaumien tuottamisesta kohdekirjastoon. Mittauksiin perustuva piirrepohjainen kirjasto vaatii äärimmäisen paljon SAR-kuvia eri kohteista. Mallinnukseen perustuva piirrepohjainen kirjasto vaatii äärimmäisen paljon simulointia, koska kirjasto täytyy simuloida hyvin tiheällä atsimuuttihilalla. Sen sijaan, mittauksiin perustuva RCS-histogrammipohjainen kirjasto vaatii vain kohtalaisen määrän SAR-kuvia eri suunnista kohdetta, koska yksittäinen SAR-apertuuri kattaa suuren osan atsimuuttiavaruutta. Mallinnukseen perustuva RCS-histogrammipohjainen kirjasto on erityisen houkutteleva, koska kirjaston simulointi riittää suorittaa harvalla atsimuuttihilalla.

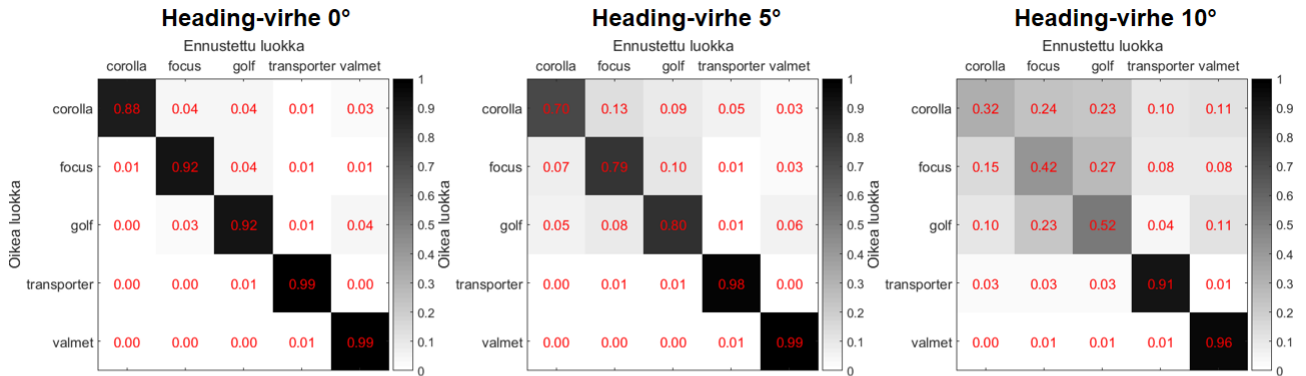
Jatkossa piirteisiin kannattaa perehtyä tarkemmin selvittäen, mitkä piirteet ovat hyödyllisiä. Piirteitä kannattaisi käyttää yhdessä nykyistä "älykkäämmin". Nyt piirteille lasketaan erikseen posterioritodennäköisyydet, jotka keskiarvotetaan tunnistuksen tekemistä varten.

Tehdyn tunnistustarkastelun heikkoutena oli kohteiden pieni määrä (viisi kappaletta). Myös mittauksia pitäisi olla enemmän saavutetun suorituskyvyn luotettavaa arviointia varten. Tunnistuskäsittelyn täytyy lisäksi kyetä huomioimaan tuntemattomat kohteet; kohteet, joita ei ole kohdekirjastossa. Liikkuvien maalien ilmaisu ja kuvantaminen on tehtävä todellisen maaston seasta käyttäen erilaisia testitapauksia, jotta voidaan arvioida kokonaisprosessin suorituskykyä.

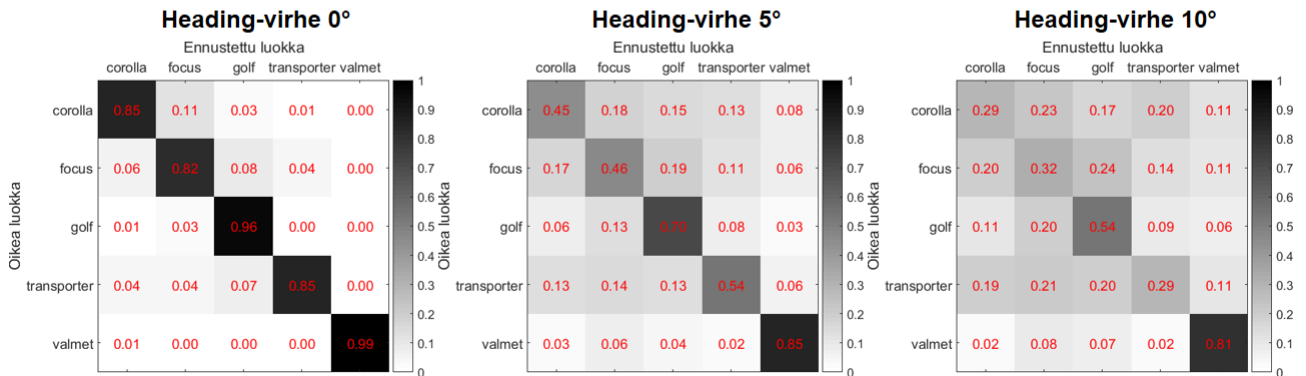
Saadut ATR-tulokset ovat hyvin lupaavia. Näissä tuloksissa erityisesti kohteen asennon määrittämiskyvyn epävarmuuden huomiointi on suorituskykyä lisäävää ja uutuusarvoista. Jatkossa on mielenkiintoista päästä laajentamaan tarkastelua suuremmalle määrälle mitattuja kohteita

käyttären laajempaa mittauksiin, mallinnukseen tai molempiin perustuvaa kohdekirjastoa.

Piirrejakauumiin ja tilastolliseen luokittimeen perustuva tunnistusmenetelmä



RCS-histogrammien EMD-etäisyyden perustuva tunnistusmenetelmä



Kuva 7. Tunnistustuloksia X-taajuusalueella, kun resoluutio on 10 cm. Sekaannusmatriiseissa lukemat ja harmaasävy ilmaisevat tunnistustodennäköisyyden. Ylärivillä neljäntoista SAR-kuvan piirteeseen ja tilastolliseen suurimman posteriorin luokittimeen perustuvan menetelmän tulos. Alarivillä SAR-apertuurien raakadatatista laskettujen RCS-histogrammien Earth mover's distance -etäisyydmittaan perustuvan menetelmän tulos. Heading-virhe viittaa asentoestimoinnin virheeseen kohteeseen sidotun koordinaatiston atsimuuttisuunnassa. Kun estimaatti kohteen asennosta muuttuu virheellisemmäksi, tunnistuskyky heikkenee merkittävästi.

5. Loppupäätelmät

Tutkimuksessa toteutettu menetelmä liikkuvan maalin ilmaisuun ja kuvantamiseen on todennettu käyttären simuloitua maastovälkesignaalia ja henkilöautosta mitattua SAR-dataa. Tunnistustutkimus keskittyi erityisesti mallintamaan epävarmuuden, joka liittyy suuntaan, josta kohde nähdään. Sovelsimme kehittämäämme epävarmuuden mallintamista kirjallisuudessa esiteltyyn piirrepohjaiseen tunnistusmenetelmään ja kehitimme uuden tunnistusperiaatteen, jossa käytimme SAR-raakadattaa RCS-histogrammeihin perustuvaan tunnistamiseen. Tutkimushankkeen toisena vuonna algoritmeja on suunniteltu jatkokehitettäväksi monipuolisesti ja sovellettavaksi TTY:lle hankittavalle demonstraatiolaitteistolle mitatun datan aiheuttamat haasteet huomioiden.

SAR-järjestelmä varustettuna liikkuvien maalien ilmaisukyvyllä mahdollistaa suuren alueen liki reaaliaikaisen valvonnan haastavissakin sääolosuhteissa. Mittausalueella liikkuvia maaleja pysytään havaitsemisen lisäksi seuraamaan ja mahdollisesti jopa tunnistamaan. Tutkitut menetelmät soveltuvat sekä maassa, merellä että ilmassa olevien kohteiden havaitsemiseen. Aihepii-

rissä on tarvetta laskentatehokkaammille ja luotettavammille algoritmeille, sillä erottelukyvyn jatkuva paraneminen tutkatekniikan kehittyessä ja laskentatehon kasvaessa tuo algoritmeille uudenlaisia vaatimuksia.

Eräs hyvin mielenkiintoinen liikkuva maali on matalalla lentävä miehittämätön ilma-alus (unmanned aerial vehicle, UAV). Pienikokoiset, jopa puuston katveessa tieuria pitkin lentävät UAV:t muodostavat haastavan uhan. Niiden torjumisen ensimmäinen edellytys on tehokas havaitseminen. Tutkimushankkeen toisena vuonna SAR-järjestelmää on tarkoitettu soveltaa matalalla lentävän UAV:n havaitsemiseen. Tällöin tarvitaan algoritmi- ja laitteistokehitystä, jotta lentävä maali voidaan tehokkaasti paikantaa kolmessa ulottuvuudessa hyödyntäen kaksiulotteista antenniryhmää.

Tutkimuksessa kehitettyjä menetelmiä ja osaamista voidaan hyödyntää tulevaisuudessa mahdollisessa SAR-tuotekehityksessä, SAR-järjestelmähankinnoissa sekä SAR-datan hankinnassa ja käsittelyssä. Työ tukee SAR-suorituskyvyn kehittämistä, ja siten tilannetietoa tuottavan tiedustelu- ja valvontajärjestelmän kehittämistä.

6. Tutkimuksen tuottamat tieteelliset julkaisut ja muut mahdolliset raportit

Vuoden 2017 aikana tutkimuksen aihepiiristä on julkaistu seuraavat artikkelit:

- R. Vehmas, J. Jylhä, "Improving the estimation accuracy and computational efficiency of ISAR range alignment", *European Radar Conference 2017*, Saksa, lokakuu 2017.
- R. Vehmas, J. Jylhä, M. Väilä, J. Vihonen, A. Visa, "Data-driven motion compensation techniques for noncooperative ISAR imaging," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, syyskuu 2017.
- R. Vehmas, J. Jylhä, M. Väilä, A. Visa, "Analysis and comparison of multichannel SAR imaging algorithms," *2017 IEEE Radar Conference*, Yhdysvallat, toukokuu 2017.

Näiden lisäksi on jätetty artikkeli arvioitavaksi vuoden 2018 EUSAR (European Conference on Synthetic Aperture Radar) -konferenssiin:

- R. Vehmas, J. Jylhä, "A contrast optimization algorithm for back-projection image reconstruction in noncooperative ISAR imaging".

7. Viitteet

- [1] J. H. G. Ender, "Space-time processing for multichannel synthetic aperture radar", *Electronics & Communications Engineering Journal*, 11(1), helmikuu 1999.
 - [2] W. Melvin, "A STAP overview", *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 19(1), tammikuu 2004.
 - [3] J. R. Guerci, *Space-time adaptive processing for radar*, Artech House, 2014.
 - [4] R. Vehmas, "Liikekompensatio- ja autofokusmenetelmät SAR- ja ISAR-tutkien signaalinkäsittelyssä", *Puolustusvoimien tutkimuslaitoksen julkaisuja 3*, Ylöjärvi, elokuu 2016.
 - [5] R. Vehmas, J. Jylhä, M. Väilä, J. Kylmälä, "A computationally feasible optimization approach to inverse SAR translational motion compensation", *European Radar Conference 2015*, Ranska, syyskuu 2015.
 - [6] R. Vehmas, J. Jylhä, M. Väilä, A. Visa, "ISAR imaging of non-cooperative objects with non-uniform rotational motion", *2016 IEEE Radar Conference*, Yhdysvallat, toukokuu 2016.
 - [7] K. El-Darymli, E. W. Gill, P. McGuire, D. Power, C. Moloney, "Automatic target recognition
-



in synthetic aperture radar imagery: a state-of-the-art review", *IEEE Access*, vol. 4, syyskuu 2016.

- [8] M. Väilä, J. Jylhä, H. Perälä, A. Visa, "Performance evaluation of radar NCTR using the target aspect and signature", *2014 IEEE Radar Conference*, Yhdysvallat, toukokuu 2014.
- [9] M. Väilä, J. Jylhä, V. Väisänen, H. Perälä, A. Visa, M. Harju, K. Virtanen, "A RCS model of complex targets for radar performance prediction", *2017 IEEE Radar Conference*, Yhdysvallat, toukokuu 2017.