



## TIIVISTELMÄRAPORTTI

### Hajautetun järjestelmän ja sensorifuusion parviälykäs ohjaus

**Juha Jylhä (sähköposti: juha.jylha@patriagroup.com, puh: 041 4688 632),  
Marja Ruotsalainen, Juho Uotila, Markku Åkerblom, Minna Väilä, Heikki Puustinen  
Emerging Technology Research (ETR), Systems & Integrations Operations, Patria Aviation Oy**

#### Tiivistelmä

Tässä tutkimuksessa tarkastelimme lennokkien parveilua tulevaisuuteen tähtäävän hajautetun kuvantamiskonseptin näkökulmasta koskien maastossa paikallaan olevien kohteiden havaitsemista, tunnistamista ja identifiointia. Tutkimuksen painopiste oli parveilevien lentävien lavettien tuottaman datan älykkäässä sensorifuusiossa tiedustelu-, valvonta- ja maalittamiskyvyn (TVM) kehittämiseksi. Tarkasteluun valittiin kolme keskeistä TVM-tehtävissä käytettävää maastossa olevien kohteiden kuvantamiseen tarkoitettua sensoria: elektro-optinen kamera (EO, Electro Optical), infrapunakamera (IR, Infrared) ja kuvantava tutka (SAR, Synthetic Aperture Radar). Hypoteesinamme oli, että kokonaistehokas parviäly ottaa huomioon hyvin yksityiskohtaisiakin seikkoja ja reunaehtoja sotilaallisen suorituskyvyn muodostumisesta, kuten liikkuvien lavettien ominaisuuksista, lavettien hyötykuormana olevien sensorien ja datalinkkien ominaisuuksista sekä jopa taistelunkestävyydestä. Laatumallamme parveilusimulaattorilla saamiemme tulosten valossa voimme todeta hypoteesin oikeaksi.

#### 1. Johdanto / Introduction

Hyönteisyhdyskunnan tai lintuparven toiminta ovat esimerkkejä eläinten käyttäytymismalleista, jotka ovat inspiroineet tutkijoita mallintamaan ja simuloimaan parvia ja sen jäsenten välistä vuorovaikutusta tietokoneen avulla. Perusajatuksena on, että yksinkertaisia sääntöjä ja toimintamalleja noudattamalla parven jäsenet voivat tuottaa hyvinkin organisoituneelta vaikuttavaa toimintaa ja näin ollen suorittaa tai ratkaista varsin monimutkaisiakin tehtäviä. Eriytyisen hämmästyttävää parviälyssä on itseorganisoituminen eli miten älykästä toimintaa voidaan saada aikaiseksi ilman, että kukaan johtaa sitä.

Parviäly on ollut aktiivisen tutkimuksen kohteena kolmisenkymmentä vuotta, mutta viime vuosien teknologinen kehitys on luonut sille käytännön tarpeita ja mahdollistanut sovelluskohteita. Erilaisten hyötykuormaksi soveltuvien sensoreiden koko on pienentynyt, datalinkkien siirtokapasiteetti on kasvanut ja lisäksi monenlaiset miehittämättömät järjestelmät, erityisesti automatisoidulla ohjauksella toimivat ilma-alukset, ovat saavuttaneet alhaisen hintatason ollen nykyisin jo kuluttajatuotteita. Näin ollen parviäly on entistä vahvemmin siirtymässä teoreettisista tietokonesimulaatioista käytäntöön, ohjaamaan ihmisen rakentamien automisten järjestelmien yhteistoimintaa.

Parveilu on laaja kokonaisuus, johon liittyy useita toisiinsa sidoksissa olevia tekijöitä. Suoritettavaksi määrätty tehtävä jakautuu parviällyn periaatteiden mukaisesti osatehtäviksi parven jäsenten kesken huomioiden jäsenten mahdollisesti erilaiset hyötykuormat ja muut ominaisuudet. Parveilusäännöt määrittävät, miten jäsenille määritetään tulevat reittipisteet tilannekuvan perusteella, miten ne liikkuvat parvena ja toimivat yhdessä. Hyvin suunnitellut parveilusäännöt takaavat tehokkaan ja turvallisen tehtävänsuorituksen törmäyksiä ja uhkia välttämällä. Käytännössä tämä vaatii logiikan kehittämistä esimerkiksi ohjaamaan sensoreiden ja datalinkin käyttöä sekä säätämään reagointia niin omien sensoreiden tuottamiin havaintoihin kuin parven muilta jäseniltä saatuihin viesteihin. Oleellinen tieto täytyy jäsentää sovelluksen mukaiseksi tilannekuvaksi, jonka perusteella parviäly määrittää osatehtävän toteutumisen

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			

sekä tulevat toimenpiteet. Sotilassovellukset tuovat vielä oman lisänsä parveilun laajaan kokonaisuuteen muun muassa sotilaallisten tehtävien, hyötykuormien ja uhkaympäristön muodossa.

Tiedonsiirtoyhteys on tärkeässä roolissa käytännön parviällysovelluksissa. Informaation välittämiseen parvessa vaikuttavat parven jäsenten sijainti sekä kommunikointisäännöt. Niiden suunnitteluun taas vaikuttavat muun muassa käytännön toteutettavuus, datalinkin suorituskyky sekä sensorit ja suoritettava tehtävä. Datalinkin käyttö ja tiedon jakaminen liittyvät oleellisesti myös siihen, missä parviällyyn sekä mitatun sensoridatan fuusiointiin ja analysointiin tarvittava laskenta suoritetaan. Toteutuksen kaksi ääripäätä ovat 1) kaiken datan siirtäminen maa-asemalle tai parven johtajalle ja laskennan sekä päätöksenteon suorittaminen täysin siellä ja 2) kunkin parven jäsenen käyttäminen hajautettuna laskentayksikkönä ja laskennan sekä päätöksenteon suorittaminen lavettien toimesta. Jälkimmäinen ratkaisu edellyttää päätöksentekoon tarvittavan tiedon välittämisen parven kaikille jäsenille. Käytännön sovelluksessa tämä valinta on tasapainottelua hajautuksen suoman häiriösietoisuuden sekä lavetissa tarvittavan laskentakapasiteetin ja datansiirtokapasiteetin välillä.

## 2. Tutkimuksen tavoite ja suunnitelma

Tämän toteutettavuustutkimuksen tarkoituksena oli perehtyä parveilun potentiaaliin ja suorituskykyyn lennokeilla suoritettavassa TVM-tehtävässä. Parveilun osatekijät ja niihin liittyvät valinnat ovat riippuvaisia toimintaympäristöstä, suoritettavasta tehtävästä sekä käytössä olevista laveteista ja hyötykuormana olevista teknologioista. Tutkimuksessa keskityttiin parveilun suorituskykytarkasteluun ja tulevaisuuden hajautettuun sensorijärjestelmään tutkimalla sensorifuusion integroimista parveiluun. Autonomisten miehittämättömien järjestelmien parveilu sovellettuna sotilaalliseen ongelmanasetteluun sisältää hyvin laaja-alaisen tutkimuskokonaisuuden. Suorituskyvyn tutkiminen oli suunniteltu perustuvan parven tehtävän simulointiin. Keskeinen osa tutkimuksen toteutusta oli simulaattorin suunnittelu ja toteutus.

Tutkimuksessa tarkastellut kolme sensoria, EO, IR ja SAR, täydentävät toistensa suorituskykyä erityisesti, kun niiden data fuusioidaan tarkasti. Oletuksena oli, että parveilu mahdollistaa autonomisten lavettien toiminnan ohjaamisen entistä paremman tilannekuvan tuottamiseksi ilman, että ihmisen tarvitsee kyetä tekemään parven nopeaan organisoitumiseen liittyviä päätöksiä. Parviälly siis automatisoidusti ohjaa parven jäsenten liikkumista esimerkiksi muodostuvan kuvan laadun, kuvantamisen kattavuuden sekä kohteiden tunnistus- ja identifiointikyvyn perusteella huomioiden parven jäsenien mahdollisesti toisistaan poikkeavan sensoroinnin. Suorituskyky muodostuu tällöin oletetusti myös nopeammin kuin ilman parviällyä. Jatkuva sensoreiden suorituskyvyn ja tilannekuvan laadun mittaaminen mahdollistavat yksittäisten lavettien puutteiden tai keskeytyneen osatehtävän suorittamisen paikkaamisen tarpeen vaatiessa parveilusääntöihin perustuen. Tulosten jakaminen oleellisilta osin lavettien kesken minimoi hukkaan menevän informaation määrän yksittäisen lavetin tuhoutuessa. Parveilusääntöihin on mahdollista sisällyttää taistelunkestävyyssnäkökulmaa esimerkiksi uhkien välttelyn muodossa, mutta uhkien huomiointi parven kokonaissuorituskyvyssä rajattiin tämän tutkimuksen ulkopuolelle.

Edellä kuvatun ongelmanasettelun tiivistimme seuraaviksi tutkimuskysymyksiksi:

1. Miten parveksi hajautettujen EO-IR-SAR-sensoreiden tuottamaa dataa voidaan fuusioida ja hyödyntää tehokkaasti lennokeilla toteutetussa TVM-tehtävässä?
2. Minkälaiset sensoreiden, muiden järjestelmien ja tilannekuvan suorituskykymallit ja -mittarit parveilun simuloimiseksi tarvitaan TVM-tehtävässä?
3. Minkälaiset parveilun periaatteet tuottavat lisäarvoa yksittäisen lennokin toimintaan verrattuna TVM-tehtävässä?
4. Millainen on parveilun ja sen suorituskyvyn simuloimiseksi tarvittava simulaatiokehys?

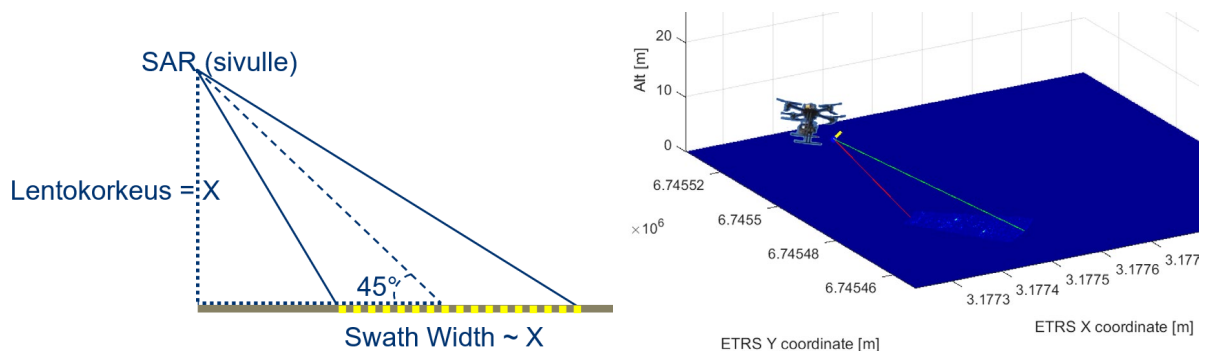
Tutkimuksen ensisijainen tavoite oli edistää TVM-suorituskykyä maastossa olevien kohteiden etsinnän ja identifiointin osalta. Pyrkimyksenä oli kehittää tarkasteltavalle tehtävälle sellaiset parveilu- ja kommunikointisäännöt ja parven jäsenten väliset tehtäväjaot, että tehtävän suoritus onnistuu mahdollisimman optimaalisesti. Parven yksilöiden lukumäärää, nopeutta, ajatuksia sekä hyötykuormia ja niiden suorituskykyä voidaan varioida toteutetussa simulaatiotarkaisussa. Lisäksi voidaan varioida kohteita ja niiden ominaisuuksia mukaan lukien naamiointi. Simulaattori pyrittiin suunnittelemaan ja toteuttamaan siten, että se sisältää riittävän yksityiskohtaisella tasolla kuvatut osat kokonaissuorituskyvyn muodostumisesta, mutta samalla simulaatioajojen keston on tarkoituksenmukaista olla maltillinen, jotta simulaattori soveltuisi esimerkiksi toistokokeita vaativaan suorituskyvyn analyysiin ja optimointiin.

### 3. Aineisto ja menetelmät

Seuraavaksi kerrotaan tiiviisti tutkimuksessa hyödynnetystä aineistosta, sensorifuusioalgoritmien dataperustaisesta tarkastelusta, suorituskykymallinnukseen valituista menetelmistä ja parveilusimulaattorin toteutuksesta.

#### EO-IR-SAR-sensorifuusion dataperustainen tarkastelu

Tämän tutkimuksen puitteissa päädyimme tekemään pienimuotoisen dataperustaisen tapaus-tutkimuksen lennokin EO-IR-SAR-sensorifuusiosta, jonka tarkoituksena oli tuoda konkretiaa ja evästystä sensoreiden suorituskykymallinnuksen pohjalle. Tapaustutkimuksen taustaineistona oli aiemmassa tutkimuksessa<sup>1,2</sup> tuotettu lennokin EO-IR-SAR-data. SAR-järjestelmän mitta-geometria on havainnollistettu kuvassa 1. EO- ja IR-kamera oli asennettu lennokkiin siten, että kaikilla kolmella instrumentilla kuvattiin sama alue viistosti sivulle päin lennokin kulkusuuntaan nähden. Toteutimme kyseisellä datalla esimerkin EO-IR-SAR-fuusioinnista. Tarkastelu pureutui erityisesti SAR-kuvien keskinäiseen rekisteröintiin ja georekisteröintiin, sekä kaikkien kolmen instrumentin kuvien fuusiointiin. Johtopäätöksenä voidaan todeta, että uusi menetelmä SAR-kuvan rekisteröinnin yhdistämisestä SAR-kuvanlaskenta-algoritmiin vaikuttaa hyvin potentiaaliselta sensorifuusion kannalta. Kaikkien kolmen instrumentin fuusiotuloksessa eri instrumentit täydentävät hyvin toistensa ominaisuuksia. SAR vaikuttaa erityisen hyödylliseltä etsittäessä maastosta kohteita, joiden sähkönjohtavuus tai sähkönjohtavuuspoikkeamien muoto eroavat maastosta, tai maastossa olevista kohteista, jotka eivät ole mielenkiintoisia. Nämä ovat oleellisia huomioita, kun suunnitellaan sensorifuusion



Kuva 1. SAR-järjestelmä tuottaa kuvaa katsoen viistosti alaspäin, lavetin kulkusuuntaan nähden sivulle. Kuvausalueen syvyys (Swath Width) maan pinnalla on tyypillisesti noin lentokorkeuden verran, kun kuvataan noin 45° kulmassa tavanomaista maastoa, jossa voi olla peitteisyyttä.

<sup>1</sup> J. Jylhä et al., Liikkuvan maalin ilmaisu ja tunnistaminen SAR-tutkalla – Osahanke A, Tiivistelmäraportti, Maanpuolustuksen tieteellinen neuvottelukunta MATINE, ISSN 1797-3457 (verkkojulkaisu), ISBN (PDF) 978-951-663-037-6, joulukuu 2018.

<sup>2</sup> J. Jylhä et al., Synthetic aperture radar imaging using COTS components, XXXV Finnish URSI Convention on Radio Science, lokakuu 2019.

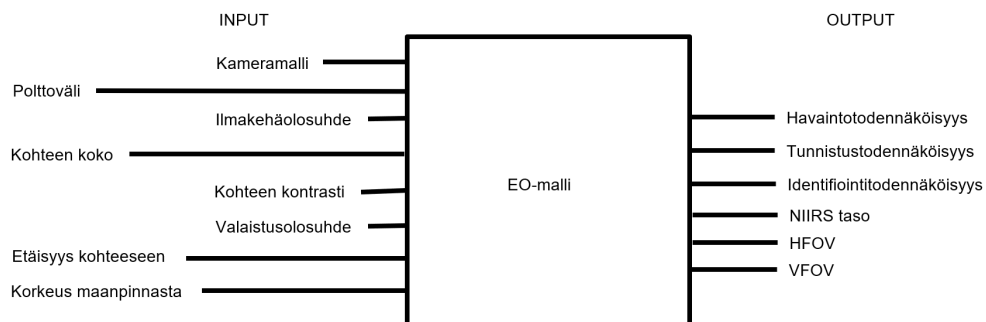
hyödyntämistä maalien etsinnässä ja tunnistamisessa maastosta. Dataperustaisen tapaustutkimuksen tulokset on dokumentoitu tätä kattavammin julkaisuihin [1] ja [2].

### EO-IR-SAR-sensoreiden ja sensorifuusion suorituskyvyn mallinnus

Parveilusimulaattorin sensoreita kuvaaviksi suorituskykyarvojen metriikoiksi valittiin TTP (Targeting Task Performance) ja NIIRS (National Image Interpretation Rating Scale). TTP kertoo todennäköisyyden erottelutehtävän onnistumiselle, kun kohde on näkökentässä. Erottelutehtävän osa-alueita ovat havainto, seuranta, luokittaminen, tunnistaminen ja identifiointi. Parveilusimulaattoriin päädyimme tässä tutkimuksessa toteuttamaan todennäköisyysmallinnuksen havaitsemiselle, tunnistamiselle ja identifiointille, mistä käytämme lyhennettä DRI (Detection, Recognition, Identification). NIIRS ja V-NIIRS (video, liikkuva kuva) arvot tuotetaan asteikolla 1–10, mikä puolestaan kertoo kameran ottaman kuvan laadun ja käytettävyyden ottamatta kantaa siihen, mitä kuvassa on.

EO- ja IR-kameroiden suorituskykymalliksi valittiin kattavasti todennettu ja laajasti käytössä oleva NV-IPM (Night Vision Integrated Performance Model). Se tuottaa valittujen metriikoiden mukaisen mallinnustuloksen ja sen integrointi MATLAB-ohjelmiston osaksi oli suoraviivaista. Malliin on tarvittaessa helppo sisällyttää erilaisia kameroita (IR, VIS, video), niiden muuttuvia ominaisuuksia kuten zoom sekä sääolosuhteita, valaistusolosuhteita, korkeuden ja kuvaussuunnan tai kohteen muutoksia. Toteutimme EO- ja IR-kameroiden suorituskyvyn mallinnusta varten MATLAB-simulaatioon mallin ja rajapinnan, joka on esitetty kuvassa 2. Syötteenä annetaan kameramalli, kameran polttoväli, ilmakehäolosuhde, kohteen koko, kohteen kontrasti, valaistusolosuhde, etäisyys kohteeseen ja korkeus maanpinnasta. Ulostulona palautuu kohteelle DRI-todennäköisyydet, kuvan NIIRS sekä kameran näkökenttä. XML-tiedostoina välitettäviä kameramalleja luotiin simulointia varten neljälle eri kameratyypille, jotka esitellään kuvassa 3.

SAR-järjestelmän suorituskyky päädyttiin mallintamaan simulaattoriin yhtenevällä tavalla DRI-todennäköisyyksinä ja NIIRS-arvona. Periaate on seuraava. Hyödynnetään TTP:n määritelmää, jolla DRI-todennäköisyydet saadaan yleistetyksi NIIRS-arvon perusteella. NIIRS GIQE (General Image Quality Equation) -yhtälöllä puolestaan saadaan SAR-järjestelmän NIIRS



Kuva 2. Elektro-optisten ja infrapunakameroiden suorituskykymallille laadittu rajapinta. Varsinainen malli on toteutettu pääosin perustuen NV-IPM-ohjelmistoon.



Kuva 3. Kameramalli laadittiin neljälle eri kameratyypille, LWIR, MWIR, VIS Still ja VIS Video, joita edustivat FLIR Vue Pro 640, FLIR A8580 Cooled InSb MWIR HD 1280x1024, Nikon D810 ja Zenmuse Z30.

käyttäen maaresoluutiota (GSD, Ground Sample Distance) ja reunavastetta (RER, Relative Edge Response). GSD ja RER puolestaan oletetaan toteutuvan, kunhan SAR-järjestelmän ominaisuudet mahdollistavat halutun resoluution ja kuvauslentolinja täyttää SAR-kuvauksen vaatimukset. Näiden ehtojen toteutuminen ratkaistaan erillisellä SAR-kuvauslinjan suunnittelutoiminnallisuudella, joka optimoi ehdot täyttävän lentokorkeuden ja kuvauslinjan alku- ja loppupisteen, sekä kuvauslinjan jakamisen erillisiin apertuureihin Stripmap-toimintatilassa. Kuvauslinjan tulee olla enintään SAR-järjestelmän kantaman määrittämällä viistoetäisyydellä kuvattavasta alueesta siten, että viistokulma kuvausalueen keskikohtaan on noin 45°. Lentonopeus määritetään huomioiden tutkan näytteistys- ja mittausnopeus. SAR-kuvaamisen periaate havainnollistettiin kuvassa 1. SAR-järjestelmän erityispiirteisiin kuuluu, että kuvausetäisyys ei varsinaisesti vaikuta resoluutioon ja kuvaaminen onnistuu liki riippumatta olosuhteista kuten pimeydestä, sumusta tai sateesta. Lisäksi SAR-järjestelmän voi toteuttaa ilmaisemaan liikkuvan maalin maastosta poikkeavan Dopplerin perusteella. Kohteen automaattinen tunnistaminen SAR-järjestelmällä on vielä tänä päivänä haastavampaa kuin EO- tai IR-kuvan perusteella. Tämän vuoksi SAR on luontainen ratkaisu suuren alueen kuvaamiseen loitompaa ja erityisesti kohteiden havaitsemiseen ja tunnistustarpeen osoittamiseen.

Sensorifuusio on mahdollista suorittaa usealla eri periaatteella ja fuusion tasolla. Tässä tutkimuksessa simulaattoriin implementoitavaksi valittiin kohteen DRI:n määrittämiseen tähtäävä datafuusio, joka voidaan edelleen jakaa päätöstason fuusioksi (DLF, Decision Level Fusion), piirretason fuusioksi (FLF, Feature Level Fusion) ja kuvatason fuusioksi (ILF, Image Level Fusion). Mallinnuksen lähtökohdaksi otettiin piirretason fuusio, jolloin kohteen identifiointitodennäköisyys

$$FLF_{id} = F_a R e^{-1/[1+\sum\{9 P_{id}/NIIRS\}]},$$

missä  $P_{id}$  on keskimääräinen todennäköisyys oikeille tunnistuksille kaikille kohteille kyseisellä sensorilla,  $F_a$  on fuusioitavien piirteiden merkityksellisyys asteikolla 0–1, ja  $R$  on piirteiden keskinäisen rekisteröinnin tarkkuus asteikolla 0–1. Funktiota voidaan käyttää simulaatiossa, kun kohteesta on useampi kuva joko eri sensoreiden tai saman sensorin kuvaamana.<sup>3</sup>

Kameroiden suorituskykyyn ja simulaation realistisuuteen vaikuttavana asiana mallinnettiin kohteiden naamioituminen tai piiloutuminen kasvillisuuden sekaan. Kasvillisuus määritettiin simulaattorissa perustuen maankäyttötyypin tarjoavaan aineistoon. Naamioitumistehokkuutta  $\epsilon_{id}$  voi kuvata kertoimella, joka lyhentää etäisyyttä, millä saataisiin vastaavat DRI-todennäköisyydet kuin ilman naamioitumista:

$$\epsilon_{id} = (1 - L_{d,cam}/L_d) \tau^{(L_{d,cam} - L_d)},$$

missä  $\tau$  on ilmakehän läpäisy,  $L_{d,cam}$  naamioituneen kohteen havaintoetäisyys ja  $L_d$  kohteen havaintoetäisyys ilman naamiointia.<sup>4</sup> Naamioituminen on mallinnettu simulaattoriin tässä muodossa EO- ja IR-kameroille. SAR-järjestelmää varten toteutettu naamiointi on määritetty suoraviivaisina DRI-lukemien kertoimina.

### Reitin optimointi

Lennokkiparven reitin optimoinnista uhkat huomioiden toteutettiin esiselvitys. Esiselvityksessä lennokkien reittien määräämiseen sovellettiin monitavoitteista verkko-optimointia. Valitulla menetelmällä kyetään ottamaan huomioon muun muassa lennokkien liikehtimisrajoitukset ja kartoittamiskyvyt, tehtävän aikavaatimukset sekä lennokkien kokemat uhkat. Menetelmä implementoitiin MATLAB-ohjelmistolla kehitettyyn reittioptimoinnin demonstraattoriin, jolla lennokkiparven reitit voidaan optimoida samanaikaisesti. Demonstraattorissa menetelmä vaiheistettiin siten, että se huomioi tuntemattomat uhkat, jotka otetaan huomioon vasta, kun ne

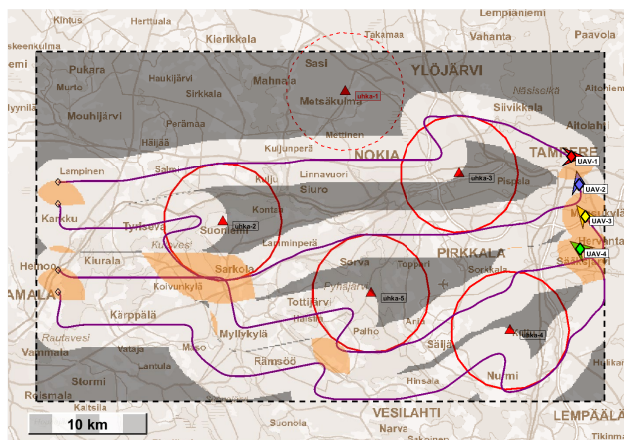
<sup>3</sup> B. Kahler, E. Blasch, Predicted Radar/Optical Feature Fusion Gains for Target Identification. Proc. IEEE National Conference on Aerospace and Electronics (NAECON), 2010.

<sup>4</sup> C. Plesa et al, Efficiency level determination of the camouflage net. Optoelectronics and advanced materials – rapid communications Vol. 1, No. 1, s. 63–67, 2007.



havaitaan. Vaiheistus mahdollistaa myös lennokkien yhteisen uhkatilannekuvan päivittämisen lennon aikana.

Reittioptimointi toteutettiin kolmen tavoitteen suhteen. Tavoitteet ovat lennetyn matkan, lennetyn matkan uhkien vaikutusalueissa sekä jo kartoitetun alueen uudelleenkartoitukseen minimointi. Optimoinnin tuloksena saadaan reitti kullekin lennokille niiden nykyisistä sijainneista annettuihin päätepisteisiin. Lennokit pyrkivät tavoitteiden painotusten mukaisesti lentämään päätepisteisiin suorinta reittiä, välttämään reitillä olevien uhkien vaikutusalueita sekä välttämään lentämästä siten, että lennokka kartoittaa jonkin toisen lennokin kartoittamaa aluetta. Kuvassa 4 on esitetty esimerkki reittioptimoinnin tuloksesta, jossa kukin lennokka pyrkii toteuttamaan edellä mainittuja tavoitteita. Menetelmää ei toistaiseksi integroitu parveilusimulaattoriin.

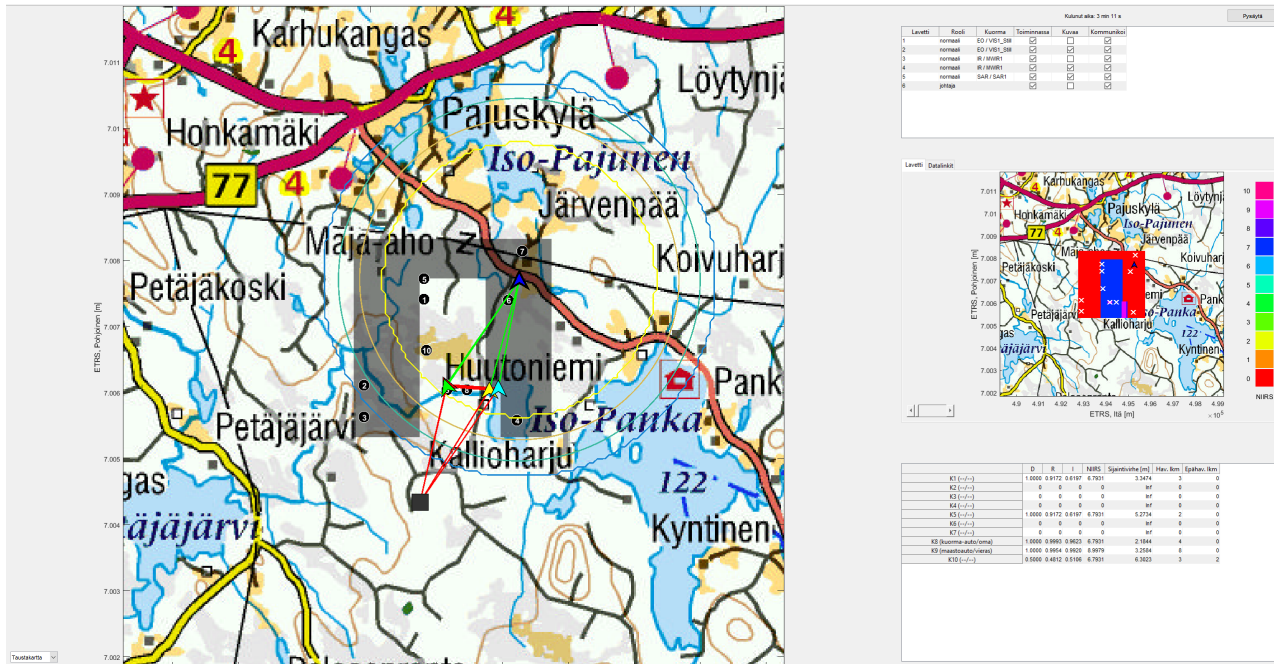


Kuva 4. Reittioptimoinnin esimerkkitulokset. Värilliset nuolenkärjet kuvaavat lennokkeja ja violetit murtoviivat niiden reittejä. Uhka-alueet on kuvattu punaisilla ympyröillä. Harmaa varjostus kuvaa alueita, joita ei ole kartoitettu, vaaleat alueet kartoitettuja alueita ja oranssi varjostus alueita, jotka kartoitetaan useammin kuin kerran.

### Parveilusimulaattori ja parveilun suorituskyvyn mittarointi

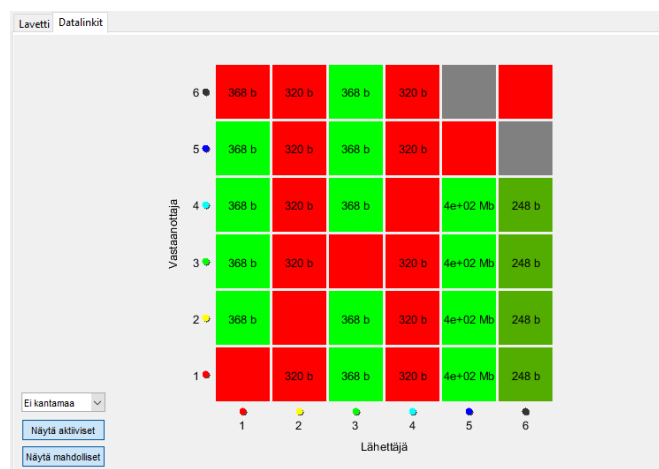
Projektin aikana tuotettiin MATLAB-pohjainen parveilusimulaattori graafisella käyttöliittymällä. Käyttäjä määrittelee tekstipohjaisella asetustiedostolla suoritettavan tehtävän, käytettävät lavetit ja niiden hyötykuormat sekä etsivät kohteet. Käynnistyksen aikana simulaattori lukee asetustiedoston ja lavetit alkavat suorittaa määritettyä tehtävää aika-askel kerrallaan.

Parveilusimulaattorin käyttöliittymä on suunniteltu siten, että käyttäjä pystyy tarkastelemaan lavettien etenemistä kartalla ja hahmottamaan mahdollisimman kokonaisvaltaisesti tehtävän tilannekuvan, halutessaan erikseen kunkin lavetin näkökulmasta. Kuvassa 5 on kuvakaappaus käyttöliittymästä. Suuressa karttanäkymässä tehtäväalue on korostettu tummennettuna, ja johon lavettien ja mahdollisten maa-asemien sijainnit päivittyvät. Maa-asema on merkitty mustalla neliöllä ja lentävät lavetit värillisillä nuolenkärjillä. Tehtäväalueelle sijoitetut kohteet on esitetty numeroituina ympyröinä. Lavetteja yhdistävät viivat kuvaavat lavettien välistä viestintää. Yhtenäinen viiva kuvaa datansiirtoa lavettien välillä ja katkoviiva mahdollista viestiyhteyttä, joka ei kuitenkaan kyseisellä ajanhetkellä ole aktiivinen. Tummansinisen lavetin ympärille piirretyt käyrät havainnollistavat tummansinisen lavetin datalinkin etäisyysriippuvaista kaistanleveyttä. Tummasininen lavetti kantaa SAR-hyötykuormaa ja kuvaa itsestään länteen päin. Muut lavetit kantavat EO- tai IR-hyötykuormaa ja kuvaavat suoraan alaspäin maastoa kohti suunnatulla kameralla. Käyttöliittymän oikean puolen yläosasta löytyy lavettilistaus, jossa on listattu tehtävässä käytettävien lavettien tehtäväroolit sekä sensorihyötykuormat ja tiedot siitä, onko kyseinen lavetti toiminnassa, kuvaamassa tai kommunikoimassa kyseisellä ajanhetkellä. Käyttäjä voi valita listasta lavetin, jolloin valitun lavetin sen hetkinen tilannekuva näytetään lavettikohtaisessa karttanäkymässä oikean laidan Lavetti-



Kuva 5. Parveilusimulaattorin käyttöliittymä. Vasemman puolen karttanäkymän päällä on johtajan tilannetietoisuus kartoitetusta alueesta. Oikealla puolella ylälaudassa on lista laveteista, keskellä lavettilistasta valitun lavetin tilannetieto NIIRS-kuvanlaadusta karttanäkymänä ja alhaalla sen tilannetieto havaituista kohteista taulukkona.

välilehdellä. Tässä pienemmässä karttanäkymässä on esitettyä tehtäväalueelta saatujen havaintojen NIIRS-laatuarvo värikoodattuna taustakarttanäkymän päällä. Lavettilistalta valitun lavetin kohteiden tunnistusta koskeva tilannetieto on esitetty taulukossa alaoikealla. Taulukosta löytyy kohdekohtaiset havainto-, tunnistus- ja identifiointitodennäköisyydet sekä kohteen kohdalta saatujen kuvien NIIRS-arvo. Kyseiset arvot on fuusioitu kohteesta saatujen kuvien yli. Lisäksi taulukossa on havaintojen ja epäonnistuneiden havaintoyritysten lukumäärät, arvioitu sijainnin virhe sekä kohteelle mahdollisesti tuotettu tunnistus- ja identifiointinimiö. Käyttöliittymän oikean puolen Datalinkit-välilehti on kuvassa 6. Siitä löytyy lähetysvastaanottomatriisi, josta käy ilmi, mitkä lavetit viestivät keskenään ja kuinka paljon dataa siirtyi kyseisellä aika-askeleella.



Kuva 6. Parveilusimulaattorin käyttöliittymän Datalinkit-välilehti. Matriisi havainnollistaa eri lavettien välillä siirtyvää datamäärää.

Erilaisten simuloitavien tapausten kokonaissuorituskyvyn mittarointiin kehitettiin tunnuslukuja ja visualisointeja. Kartoittamiseen liittyen tuotetaan aikasarja laadukkaasti kartoitetun alueen osuuden kehittymisestä sekä kartoitukseen kulunut aika. Kohteiden kuvaamista koskien tuotetaan identifioitujen kohteiden lukumäärä kertyvänä aikasarjana sekä korkea-arvoisten kohteiden identifiointiajanhetket. Tehtävän suorituksen resurssinkäyttöön liittyen tuotetaan aikasarja aktiivisten lennokkien lukumäärästä sekä lennokkien käyttöaika, joka kuvaa miten monta sekuntia lennokkaikaa, eli ikään kuin kokonaisenergiaa, tarvitaan tehtävän suorittamiseksi. Lisäksi tuotetaan datalinkillä välitetty kumulatiivinen ja hetkellinen datamäärä aikasarjana. Näiden mittarien perusteella on mahdollista etsiä hyvin toimivia tai optimaalisia parveilun parametreja.

#### 4. Tulokset ja pohdinta

Parveilua tarkasteltiin projektissa toteutetun simulaattorin avulla. Tarkasteluissa rajauduttiin tutkimaan lennokkiparven autonomiaa kahdesta näkökulmasta: täysi autonomia ja keskusjohto. Täyden autonomian toteutuksessa kaikki lennokit viestivät keskenään sekä mahdollisen maa-aseman kanssa. Jokainen lennokka muodostaa omaa tilannekuvaa itse tekemiensä havaintojen ja vastaanottamiensa viestien perusteella. Tilannekuvan perusteella jokainen lennokka tekee itsenäisesti päätökset omaan toimintaansa liittyen määrittäen muun muassa, onko työn alla oleva osatehtävä jo valmis tai onko tarjolla uusi korkeamman prioriteetin osatehtävä suoritettavaksi. Osatehtävän kuvaus sisältää muun muassa tiedon reittipisteistä sekä käytettävän sensorin ja kuvattavat reittiosuudet.

Keskusjohtoisessa toteutuksessa parven johtajana toimii joko maa-asema tai yksi lennokeista. Kaikki lennokit viestivät vain parven johtajalle joko suoraan tai mahdollisen relekoneen kautta. Vain parven johtaja muodostaa kokonaistilannekuvaa. Muiden lavettien tilannekuva muodostuu niiden itse tekemien havaintojen pohjalta. Parven johtaja muodostaa parven kaikkien lennokkien uudet osatehtävät ja viestii ne datalinkillä lennokeille. Osatehtävän loppuun suorittaminen ja uuden osatehtävän vastaanottamisen epäonnistuminen datalinkin kuuluvuuden riittämättömyyden vuoksi ohjaa lennokin lentämään kohti paluukoordinaatteja datalinkkiyhteyden aikaansaamiseksi tai tehtävän suorittamisen lopettamiseksi.

Parveilutarkastelut suoritettiin tiedustelun skenaariossa tehtäväalueen ollessa 3 km kertaa 3 km. Tehtävän tavoitteena oli alueen kartoittaminen sekä maastoon sijoitettujen kohteiden havaitseminen ja identifiointi. Tarkasteltavassa skenaariossa kohteita oli kymmenen ja niiden koko vaihteli välillä 4–10 m. Kolme kohteista oli vieraita ja näistä kolmesta kohteesta kaksi oli naamioitunut metsän sekaan. Alueen kartoittamista suoritettiin kaikilla lentävillä laveteilla, mutta havaittujen kohteiden identifiointia ainoastaan EO- ja IR-laveteilla. Datalinkin kuuluvuus oli rajattu niin, että se ei yltänyt tehtäväalueen laidalta toiselle eikä näin ollen myöskään tehtäväalueen ulkopuolelle sijoitetulta maa-asemalta kaikkialle tehtäväalueelle.

#### **Perusskenaarion ja sen variaatioiden suorituskyky**

Perusskenaariossa tarkasteltiin täyden autonomian tapausta. Lennokkeja oli viisi, joista kaksi kantoi EO-sensoria, kaksi IR-sensoria ja yksi SAR-sensoria. Lisäksi perusskenaariossa oli kiinteässä sijainnissa maa-asema. SAR-lavetti oli ajastettu lähtemään 100 s muita lennokkeja aiemmin. Kaikilla laveteilla oli datalinkki, jonka noin 1 GB/s bittinopeus mahdollisti kaiken tarvittavan informaation välittämisen 1 s mittaisen simulaatioaskeleen aikana. Näin ollen datalinkin bittinopeus ei aiheuttanut haasteita parveilulle. Jokaisesta skenaarioajasta muodostettiin neljä erillistä tapausta asettamalla maa-asema sekä lavettien lähtö- ja paluualue tehtäväalueen etelä-, länsi-, pohjois- ja itäpuolelle.

Perusskenaariosta toteutettiin useita variaatioita. Yhtenä variaationa kokeiltiin lennokkien määrän vähentämistä kolmeen poistamalla toinen EO-laveteista ja toinen IR-laveteista. Lisäksi testattiin SAR-hyötykuorman puuttumista korvaamalla SAR-lavetti EO-sensoria kantavalla lavetilla. Myös SAR-lavetin ajastusta tarkasteltiin lähettämällä kaikki lavetit liikenteseen yhtä aikaa sekä lähettämällä SAR-lavetti matkaan 200 s, 300 s, 400 s ja 500 s muita la-



vetteja aiemmin. Perusskenaarion täysin autonominen malli varioitiin myös keskusjohtoiseksi. Ensimmäisessä keskusjohtoisessa variaatiossa maa-asema toimi johtajana eikä relekonetta ollut käytössä. Toisena keskusjohtoisena variaationa kokeiltiin mallia, jossa maa-asema toimi johtajana ja käytössä oli relekone. Kolmantena keskusjohtoisena variaationa oli malli, jossa johtajana toimi SAR-lavetti eikä relekonetta käytetty.

Perusskenaarion ja sen eri variaatioiden suorituskyky on esitetty taulukossa 1. Mittareina on käytetty alueen kartoittamiseen kulunutta aikaa, korkea-arvoisen kohteen identifiointiin kulunutta keskimääräistä aikaa, lennokkien käyttöaikaa sekä siirrettyä datamäärää. Niiden perusteella keskusjohtoinen malli ilman relekonetta voidaan todeta varsin epäoptimaaliseksi tilanteessa, jossa datalinkki ei kanna maa-asemalta tehtäväalueen toiselle laidalle, vaikka välitettävä datamäärä onkin pieni suhteessa autonomiseen malliin. Keskusjohtoinen malli relekoneen kanssa on kartoitus- ja identifiointinopeuden puolesta yhtä hyvä autonomisen mallin kanssa. Relekone kuluttaa kuitenkin käyttöaikaa, mutta toisaalta siirrettävä datamäärä pienenee noin puoleen. Keskusjohtoinen malli lentävällä johtajalla vaikuttaa lupaavimmalta käytetyn mittariston valossa tarkasteltuun tiedustelutehtävään. Sen tuottama kartoitus- ja identifiointinopeus vastaa autonomista mallia. Lavettien käyttöaika kasvaa hieman, mutta siirrettävä datamäärä pienenee vajaan kahdeksasosaan autonomisesta mallista. EO- ja IR-lavettien vähentäminen on hieman perusskenaariota heikompi identifiointinopeuden puolesta, mutta lavettien käyttöaikaa on merkittävästi vähemmän ja siirrettävän datan määrä putoaa noin puoleen. Mikäli identifiointinopeus ei ole äärimmäisen kriittinen, tehtävä kannattaa suorittaa kohteiden määrään nähden sopivan pienellä lavettimäärällä. Tehtävän suorittaminen ilman SAR-lavettia voidaan todeta hyvin epäoptimaaliseksi. SAR:n ajastamisella havaitaan olevan vaikutusta kohteiden identifiointinopeuteen. SAR:n lähettäminen liikkeelle 500 s muita lavetteja aiemmin kasvattaa identifiointiajan lähes kaksinkertaiseksi perusskenaarioon verrattuna. Toisaalta ajastaminen vaikuttaa myös lavettien käyttöaikaan. SAR:n lähettäminen liikkeelle 500 s muita lavetteja aiemmin tuottaa noin 30 % perusskenaariota pienemmän käyttöajan. Myös siirretyn datan määrä pienenee tässä tapauksessa. Näin ollen SAR:n liikkeellelähden ajastus on tasapainoilua identifiointinopeuden ja käytettävän resurssin välillä.

### Kohteiden naamiointin vaikutus

Kohteen naamioimiseen liittyen tarkasteltiin tilannetta, jossa yksittäinen kohde naamioitiin sensorityyppikohtaista naamioitumiskerrointa hyödyntäen. Naamioitumisesta tuotettiin kolme tilannetta varioimalla naamioitumiskertoimen arvoja. Tuloksista havaittiin, että kohteen

Taulukko 1. Suorituskykymittaroinnin tulos perusskenaariossa ja sen variaatioissa. Taulukon arvot ovat neljän tapauksen keskiarvoja.

	Alueen kartoittaminen [s]	Kohteen identifioiminen [s]	Lennokkien käyttöaika [s]	Siirretty datamäärä [b]
Perusskenaario (autonom.)	775	354	4 280	108 240 837 902
Keskusjohto, ei relekonetta	1 187	567	6 254	30 263 091 718
Keskusjohto ja relekone	764	323	5 696	57 079 750 892
Keskusjohto, lennokka johtaa	761	324	4 452	12 901 355 500
Lennokkien vähentäminen	797	399	2 699	54 263 250 774
SAR:n puuttuminen	1 698	615	9 350	238 067 109 698
SAR yhtä aikaa	790	312	4 757	160 079 327 942
SAR 200 s aiemmin	757	436	3 872	101 247 738 186
SAR 300 s aiemmin	785	501	3 450	84 235 746 970
SAR 400 s aiemmin	782	581	3 136	66 920 721 678
SAR 500 s aiemmin	782	685	2 896	69 720 617 534

naamioinnin lisääminen pienensi kohteen havaitsemisen, tunnistamisen ja identifioinnin todennäköisyyksiä. Tapauksessa, jossa naamiointi oli "runsasta", kohdetta ei kyetty tunnistamaan eikä identifioimaan käytetyllä ohjelmiston parametroinnilla. Myös kohteesta tehtyjen epäonnistuneiden havaintoyritysten määrä kasvoi naamioinnin lisääntyessä. SAR-lavetti onnistui kuitenkin saamaan kohteesta havainnon myös "runsaan" naamioinnin tapauksessa, jolloin EO- ja IR-sensoreiden yhteinen suorituskyky tuotti varsin hyvät DRI-arvot. Lisäymmärryksen tuottamiseksi kohde tulisi naamioida paremmin myös IR-sensoria vastaan, jolloin DRI-arvot pienenisivät. Myös tilannetta, jossa kohde jää SAR-lavetilta kokonaan havaitsematta, olisi mielenkiintoista tarkastella.

## 5. Loppupäätelmät

Tutkimuksessa toteutettiin parveilusimulaattori, joka perustaltaan soveltuu hyvin sotilassovelluksessa hyödynnettävän parviällyn suorituskyvyn tutkimiseen ja analysoimiseen sekä parven toiminnan optimoimiseen. Tehtävän suorituksen optimoimisessa on otettava huomioon kaikki tehtävän suorituksen kannalta oleelliset osatekijät. Lavettien kohtaamat uhkat rajattiin tämän tutkimuksen parvelusimulaattorikehityksen ulkopuolelle, mutta skenaarioissa, joissa uhkat ovat relevantteja, on kiinnitettävä huomiota muun muassa lavettien reitin suunnitteluun uhkat huomioiden, viestinvälityksen minimoimiseen sekä keskusjohtoisessa mallissa johtajalavetin suojaamiseen ja korvaamiseen. Näin ollen tehtävän suorituksen optimointi muodostuu varsin monimutkaiseksi monitavoiteoptimointiongelmaksi. Parveilusimulaattorin rakenne ja sen sisältämien suorituskykymallien abstraktiotaso vaikuttavat sopivilta monimutkaisinkin sotilaallisen suorituskyvyn reunaehtojen mallintamiseen. Simulaattorin sisältämät mallit ja parviällyn parametroinnin mahdollisuudet eivät kuitenkaan kaikilta osin vielä vastaa riittävästi todellisuutta. Jatkokehityspotentiaalia on niin erilaisten tehtävien, hyötykuormien ja uhkaskenaarioiden lisäämisessä ja huomioimisessa kuin suorituskykymallien kehittämisessäkin. Jatkokehitystarpeista huolimatta toteutetun simulaatiomekanismin ja kehitetyn mallituksen avulla saatiin järkeviä ja loogisia tuloksia määriteltä tiedustelutehtävää koskien.

Parveilusimulaattoria voidaan tulevaisuudessa käyttää osana autonomisilla laveteilla suoritettavien tehtävien suunnittelua sekä hyötykuormien valintaa. Hyödyntämismahdollisuuksia voi nähdä niin suorituskyvyn suunnittelussa ja hankinnassa kuin sen rakentamisessa tai jopa takaisen käytön kehittämisessä aina parven parametroinnin tehtäväkohtaiseen optimointiin saakka. Tämän lisäksi tutkimus tuotti perustutkimuksellista tietoa parveilun ja sensorifuusion yhdistämisestä.

Hypoteesimme siitä, että parviällyn sotilaallisen soveltamisen onnistuminen riippuu aihealue-tietämyksen huomioimisesta parviällyn ohjelmoinnissa, vaikuttaa tämän tutkimuksen tulosten valossa oikealta. Tarkastellussa maastossa olevien kohteiden TVM-tehtävässä hyvin merkittävät parviällyn parametrit liittyivät sensoreiden ja datalinkin fysikaalisiin ominaisuuksiin, käyttöperiaatteisiin ja ajastuksiin. Esimerkiksi lennokkien autonomian tarkastelu havainnollisti, että lentävällä lavetilla oleva keskusjohto on kustannustehokkain ratkaisu tarkasteltuun skenaarioon datalinkin kuuluvuuteen liittyvistä rajoitteista johtuen.

## 6. Tutkimuksen tuottamat tieteelliset julkaisut ja muut mahdolliset raportit

Hankkeessa laadittujen kahden julkaisun sisältö tiivistettiin raportin kohdassa 3.

- [1] J. Jylhä, M. Väilä, M. Ruotsalainen ja J. Uotila, On Merging Image Registration and Focusing: A High-Resolution COTS SAR Application. NATO STO SET-273 Specialists' Meeting on Multidimensional Radar Imaging and ATR, Marseille, lokakuu 2021.
- [2] J. Jylhä, M. Väilä, M. Ruotsalainen ja J. Uotila, On Merging Image Registration and Focusing: A High-Resolution COTS SAR Application. Multidimensional Radar Imaging for Target Identification, NATO STO Review, kesäkuu 2022.