

## TIIVISTELMÄRAPORTTI

# Liikkuvan maalin ilmaisu ja tunnistaminen SAR-tutkalla, Osahanke B

Juuso Kaitalo ([juuso.kaitalo@da-group.fi](mailto:juuso.kaitalo@da-group.fi), +358 29 0800 912)  
Ari Alanne, Torsti Poutanen, Juha-Pekka Louhos, Markus Marttila  
DA-Design Oy, Kassimäenkatu 2, FI-30300 Forssa, Finland

### Tiivistelmä

Hankkeessa tutkittiin liikkuvan maalin ilmaisuun ja tunnistamiseen soveltuvan SAR-tutkan (synthetic aperture radar) laitteistoratkaisuja. Tutkimus kohdennettiin kooltaan pieniin, painoltaan kevyisiin ja kustannuksiltaan edullisiin lyhyen kantaman järjestelmiin. Järjestelmän kokonaissuorituskyvyn ja laitteiston teknisen suorituskyvyn välisiä suhteita ja kustannusajureita selvitettiin laitteiston vaatimusten määrittelemiseksi ja optimoimiseksi. DA-Design keskittyi yhteishankkeessa laitteistotutkimukseen ja TTY (Tampereen teknillinen yliopisto) järjestelmäkehitykseen yleisesti sekä ohjelmisto- ja algoritmikehitykseen.

### 1. Johdanto

SAR-tutka mahdollistaa sää- ja valaistusolosuhteista riippumattoman kaukokartoituksen ja kuvantamisen tiedustelun, valvonnan ja maalittamisen tarpeisiin. Satelliitteihin ja ilma-aluksiin sijoitetut laitteistot ovat vakiintuneessa käytössä ja mahdollistavat laajojen alueiden kuvantamisen kaukaa.

Teknologian kehittyminen mahdollistaa entistä edullisempien, pienempien ja kevyempien järjestelmien toteuttamisen sekä aikaisempaa paremman suorituskyvyn. Olennaista kustannustehokkuuden, pienen koon ja painon sekä hyvän suorituskyvyn samanaikaisessa tavoittelussa on sovelluskohtainen optimointi.

Sotilaallisissa sovelluksissa tarkan kuvantamisen lisäksi on olennaista liikkuvan maalin ilmaisu ja tunnistaminen. Tunnistamisen tyypilliset edellytykset ovat riittävä resoluutio suhteessa kohteen kokoon ja riittävä signaalin ja häiriöiden välinen suhde. Kuvantamisen etäisyys, alueen pinta-ala ja resoluutio asettavat olennaisimmat reunaehdot järjestelmän teknisille vaatimuksille. Kyky liikkuvan maalin ilmaisuun sekä liikkuvan kohteen ja kuvausinstrumentin liikkeen nopeus asettavat lisää reunaehtoja.

Teknologisen kehityksen myötä tapahtuva laskentatehon ja komponenttien integraatioasteen kasvu mahdollistavat käyttökelpoisen suorituskyvyn saavuttamisen merkittävän pienikokoisella ja kevyellä laitteistolla. Pieniin ja kevyisiin miehittämättömiin ilma-aluksiin sopiva SAR-järjestelmä mahdollistaa sellaiset sovellukset, joilla on merkittävää uutuusarvoa. Keskeistä on toteuttaa käyttökelpoisen kokonaissuorituskyvyn saavuttava laitteisto kustannustehokkaasti.

### 2. Tutkimuksen tavoite ja suunnitelma

Tutkimuksen ensisijaisena tavoitteena on selvittää SAR-laitteiston suorituskykyvaatimuksia suhteessa ohjelmiston ja laitteiston muodostaman SAR-järjestelmän kokonaissuorituskykyyn.

**Postiosoite**  
**Postadress**  
**Postal Address**  
MATINE/Puolustusministeriö  
PL 31  
FI-00131 Helsinki  
Finland

**Käyntiosoite**  
**Besöksadress**  
**Office**  
Eteläinen Makasiinikatu 8 A  
00130 Helsinki  
Finland

**Puhelin**  
**Telefon**  
**Telephone**  
Vaihde 295 160 01

**s-posti, internet**  
**e-post, internet**  
**e-mail, internet**  
[matine@defmin.fi](mailto:matine@defmin.fi)  
[www.defmin.fi/matine](http://www.defmin.fi/matine)



Tutkimuksen toissijaisena tavoitteena on selvittää olennaiset kustannustekijät eli ne vaatimukset, jotka tuottavat merkittävimmän osan laitteiston kustannuksista suhteessa muihin vaatimuksiin. Näiden tulosten perusteella voidaan optimoida halutun suorituskyvyn toteuttava laitteisto määrättyyn tarkoitukseen siten, että laitteiston koko ja paino saadaan mahdollisimman pieneksi ja kustannukset kohtuulliseksi.

Tässä tutkimuksessa keskitytään tarkastelemaan erityisesti sellaista laitteistoa, jolla on mahdollista toteuttaa SAR-kuvantamista liikkuvan maalin ilmaisemiseksi ja tunnistamiseksi. Sovellusalueena tutkimus on kohdennettu lyhyen kantaman järjestelmään, jossa mittausetäisyys on suuruusluokkana kymmenistä metreistä enintään kilometreihin.

### 3. Aineisto ja menetelmät

Tutkimus aloitettiin teknologiakatsauksella, jossa pyrittiin selvittämään vapaasti saatavilla olevasta lähdeaineistosta SAR-teknologian tämän hetken tila, sovellukset ja tekninen suorituskyky. Teknologiakatsausta ei rajoitettu ainoastaan pieniin ja kevyisiin lyhyen kantaman järjestelmiin, jotta nykytilasta saadaan riittävän laaja kuva.

**Taulukko 1** esittää yhteenvetona edustavia esimerkkejä teknologiakatsauksessa tarkastelluista SAR-instrumenteista. Sentinel, TerraSAR ja Iceye ovat satelliitteja, jotka kantavat kuvattuja SAR-instrumentteja. Sentinel tuottaa ilmaista palvelua, TerraSAR tuottaa maksullista palvelua ja Iceye on kokeiluvaiheessa. MIRANDA35 on valmiina ostettava laite, joka on tarkoitettu lentokoneeseen tai miehittämättömään ilma-alukseen. MIRANDA300 on kokeilullinen laite, joka on sijoitettu ajoneuvoon. Taulukon arvot ovat valmistajien ilmoittamia.

	Sentinel 1A	TerraSAR-X	Iceye-X1	MIRANDA35	MIRANDA300
Mass	945 kg	394 kg	<70 kg	17.5 kg	5 kg
Transmit power	4380 W	2260 W		2 W (10 W)	3 mW
Frequency	5.504 GHz	9.65 GHz	~9.65 GHz	35 GHz	300 GHz
Bandwidth	0...100 MHz	150/300 MHz	60 MHz	600 MHz	30 GHz
Distance	693 km	512...520 km	494...506 km	< 6 km	< 20 m
Swath / Scene	80 km	4 x 3.7 km <sup>2</sup>	35 km		5 m
Az. Res.	5 m	0.25 m	10 m	15 cm	5 mm
El. Res.	5 m	0.25 m	10 m	15 cm	5 mm
Swath / Scene	410 km	270 x 200 km <sup>2</sup>	-	-	-
Az. Res.	20 m	40 m	-	-	-
El. Res.	40 m	49 m	-	-	-

*Taulukko 1: Teknologiakatsaus - SAR-instrumenttien ominaisuuksia*

Teknologiakatsaus osoittaa SAR-järjestelmien kuvantamisen suorituskyvyn ja teknisen suorituskyvyn välisiä riippuvuuksia sekä näiden suhdetta järjestelmän kokoon ja painoon. Näiden tietojen pohjalta voidaan arvioida myös järjestelmien kustannusrakennetta.

Teknologiakatsauksen pohjalta luotiin suorituskyvyn vaatimukset kiinnostuksen kohteena olevalla lyhyen kantaman SAR-järjestelmälle. Järjestelmän tavoitteellisen suorituskyvyn perusteella määriteltiin laitteiston teknisen suorituskyvyn vaatimukset. Kuvantamisen suorituskyvyn ja laitteiston teknisen suorituskyvyn välille pyrittiin luomaan selkeitä relaatioita vaatimusmäärittelyn toteuttamiseksi.

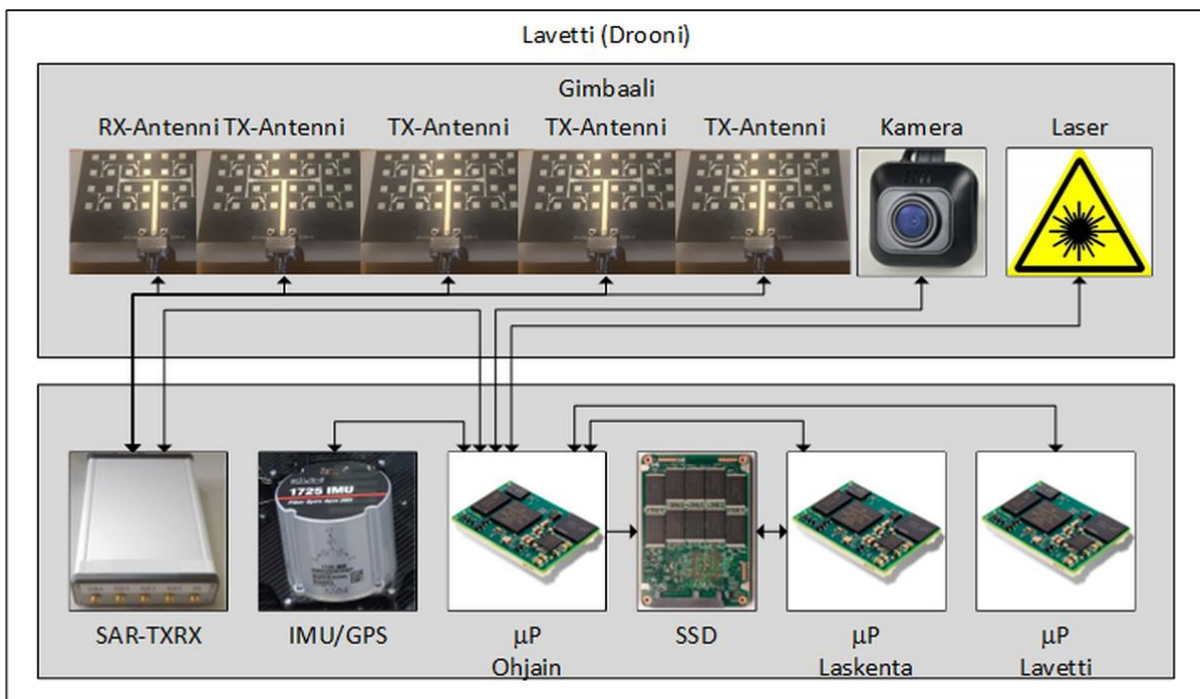
SAR-järjestelmälle asetettiin yhdessä TTY:n kanssa [1] seuraavat yleiset ja operatiiviset vaatimukset:

- Koko ja paino: Lennätettävissä miehittämättömällä ilma-aluksella
- Edullinen hankintahinta (< 30 k€)
- Erottelukyky:  $\sigma < 15$  cm
- Kantama:  $r = 50 - 500$  m
- Tutkan liikenopeus:  $v_{MAX} = 29$  m/s (100 km/h)
- Kyky liikkuvan maalin ilmaisuun (MTI, moving target indication)

Näistä vaatimuksista johdettiin yhdessä TTY:n kanssa [1] seuraavat järjestelmän tekniset vaatimukset:

- Kaistanleveys:  $f_{BW} \geq 1$  GHz (Erottelukyky:  $\sigma < 15$  cm)
- Keskitaajuus:  $f_c > 10$  GHz ( $f_{BW} < 10\% * f_c$ )  $\rightarrow f_c = 25$  GHz
  - Riittävä kantama (teho / etenemisvaimennus) rajaa taajuusalueetta:  $f < 40$  GHz
  - Soveltuva taajuusalue taajuusallokaatioissa:  $f = 24 - 26$  GHz
  - Soveltuvia laitteita saatavana ajoneuvojen tutkasovelluksiin
- Pyyhkäisy aika:  $t_{SWEEP} < 100$   $\mu$ s ( $v_{MAX} = 29$  m/s)
- Näytteenoton taajuus:  $f_{SAMPLE} > 35$  MHz ( $r_{MAX} = 500$  m)
- Antennin keilan leveys:  $\theta_{AZ} = 10^\circ$ ,  $\theta_{EL} = 30^\circ$  ( $\sigma$ ,  $v_{MAX}$ ,  $r_{MAX}$ )

Kuva 1 esittää lyhyen kantaman SAR-järjestelmän lohkokaavion, jossa on järjestelmän keskeiset osat ja niiden keskinäiset liitännät. Tämä tutkimus keskittyy tarkastelemaan SAR-tutkalaitteen ja antennin teknistä suorituskykyä painopisteen ollessa liikkuvan kohteen ilmaisuuden asettamissa vaatimuksissa.



Kuva 1: SAR-järjestelmän lohkokaavio

SAR-kuvantamisen mahdollistavien antennien lisäksi järjestelmässä on kamera, jolla voidaan ottaa optinen kuva, jotta tulosta voidaan arvioida vertaamalla SAR-kuvaa ja optista kuvaa. Lisäksi järjestelmässä on laser-osoitin antennin kohdistuksen seuraamiseksi tutkimuksellisissa tarkasteluissa. Miehittämättömässä ilma-aluksessa antennit ja kamera on asennettu erilliseen gimbaaliin, joka vakauttaa laitteiston asennon ja mahdollistaa antennien kohdistamisen. Paikkatieto kerätään inertiayksiköllä (IMU) ja satelliittipaikantimella (GPS). Järjestelmää ohjataan teollisuustietokoneella, joka välittää kerätyn datan muistiyksikköön. Todellisessa kuvantamiskäytössä järjestelmässä tulisi olla erillinen laskentatietokone, jolla esikäsitellään mi-



tattu raakadata. Tämän lisäksi myös lavetin ohjaamisesta ja liikehinnästä vastaava ohjain tulisi liittää järjestelmän ohjaimen, jotta kaikki toimenpiteet voidaan tehdä järjestelmän eri osissa synkronoidusti ja hallitusti.

Laitteiston rajoitteita selvitettiin mittaamalla algoritmien kehittämistä varten TTY:n hankkiman lähetyvastaanottimen teknistä suorituskykyä SAR-instrumenttina. Laitteisto on rajoittunut verrattuna sen lähtökohtaisiin vaatimuksiin, koska täsmällisiä vaatimuksia ei kaikilta osin voida saavuttaa valmiilla kaupallisilla laitteilla. Vähäisillä virheillä voi olla merkittävä vaikutus suorituskykyyn ja useiden virhetekijöiden yhteisvaikutus tuottaa monimutkaisen kokonaisvaikutuksen. Kokonaisvaikutuksen selvittäminen laitteen valmistajan antamien tietojen pohjalta tai laskennallisesti voi olla hyvinkin haasteellista ja johtaa merkittäviin virheisiin. Tarvitaan laitteistolle tehtyjä mittauksia, joilla selvitetään kokonaisvaikutuksen kannalta olennaiset seikat. Laitteistosta mitattiin seuraavat suorituskykyarvot (**Taulukko 2**):

Testi	Aaltomuoto	Merkitys
Lähettimen taajuuspyyhkäisy	FMCW	Tarkka etäisyysmittauskyky: lähetystaajuus tunnettava pyyhkäisyn aikana.
Lähettimen vaihekohina	CW	Vaihekohina vaikuttaa vastaanoton SN-suhteeseen. Lentävän alustan tärinän ja melun vaikutus lähetys-signaaliin.
TX/RX-loop-back	FMCW	Varmistetaan etäisyysmittauksen toiminta tunnetuilla TX-RX-viiveillä. Mittaus tuottaa myös tiedon TX-RX ja RX-RX-isolaatioista.

*Taulukko 2: SAR-instrumentin mittaukset*

Laboratoriomittausten lisäksi tässä tutkimuksessa toteutettiin kuvantamisen ja liikkuvan maalin ilmaisun kenttäkokeita Forssassa DA-Designin toimitilojen piha-alueella. Kokeita varten rakennettiin kuvan 1 kaltainen mittausjärjestelmä ja toteutettiin sarja mittauksia yhdessä TTY:n kanssa. Näiden kenttäkokeiden tulokset esitetään TTY:n osahankkeen tiivistelmäraportissa.

Antenni on järjestelmässä keskeisessä osassa, koska antennin suorituskyvyn puutteita ei voida kaikilta osin järjestelmän muissa osissa kompensoida. Järjestelmän koon ja painon sekä kustannusrakenteen osalta antennin osuus havaittiin merkittäväksi ja tarkoitukseen sopivien antennien kaupallinen saatavuus todettiin heikoksi. Tämän perusteella antenni otettiin olennaiseksi osaksi tutkimusta. Käyttökelpoisesta antennirakenteesta suunniteltiin ja toteutettiin prototyyppisiä suorituskyvyn ja rajoitteiden selvittämiseksi.

## 4. Tulokset ja pohdinta

### 4.1 Koelaitteiston suorituskykymittaukset

#### 4.1.1 Koelaitteisto

TTY hankki lyhyen kantaman kevyen ja edullisen SAR-tutkan algoritmien kehittämiseen laitteiston, jonka keskeiset toimintaparametrit (mm. pyyhkäisykaista, pyyhkäisy aika ja vastaanotinkanavien lukumäärä) ovat ohjelmoitavissa. Laite täyttää tärkeimmät sille asetetut vaatimukset:

- Taajuusalue: 24 – 26 GHz
- Kanavat: 1 x TX, 4 x RX
- Lähetysteho: 13 dBm (20 mW)
- Lineaarinen FMCW-chirp-modulaatio: Sawtooth ja Triangle
- Taajuuspyyhkäisy: < 1 ms (Vaatimus: < 0.1 ms)
- Näytteistystaajuus: 2 Msps max. (Vaatimus: > 35 MHz)
- USB-liitäntä: ohjaus, RX-datan luku ja tehonsyöttö
- Pieni tehonkulutus 4.25 W

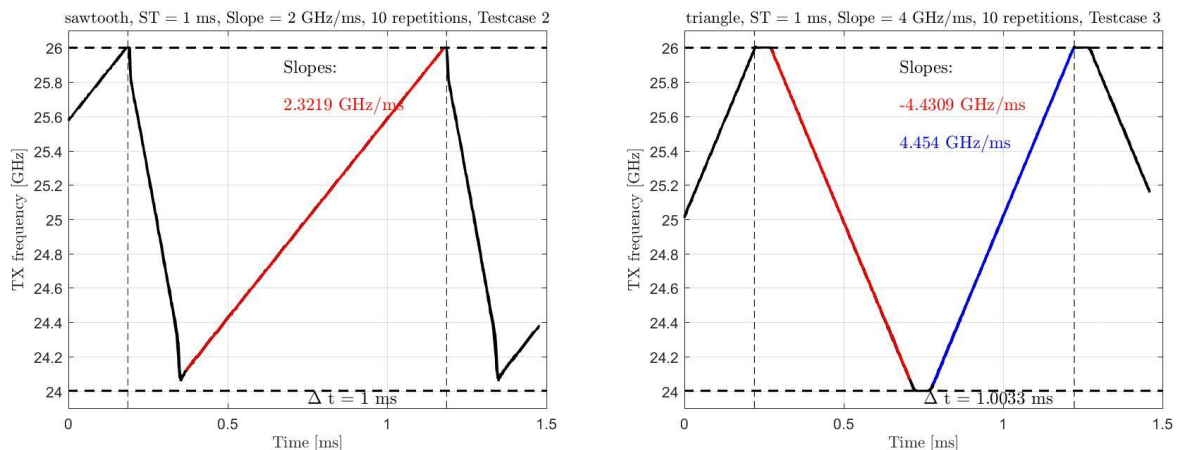
- Pieni koko: ulkomitat 100 x 150 x 40 mm (W x L x H)
- Kevyt laite: paino 240 g

Vertaamalla hankitun tutkan suorituskykyä vaatimuksiin huomataan, että ne eivät kaikilta osin vastaa toisiaan. Tutkan etäisyysresoluutio on riittävä, mutta pyyhkäisy aika on pitkä ja näytenopeus vaatimaton. Nämä asettavat ylärajat kohteen liikenopeudelle ja etäisyydelle tutkasta.

#### 4.1.2 Lähettimen taajuuspyyhkäisy

Taajuudessa alassekoitetun lähetinsignaalin hetkellinen taajuus pyyhkäisyä aikana rekisteröitiin modulaatioanalysointilaitteella. Mittaus tehtiin useilla tutkan pyyhkäisykaistan ja -ajan yhdistelmillä.

**Kuva 2** esittää tulokset kahdesta modulaatiomoodista: Sawtooth ja Triangle. Sawtooth-pyyhkäisy on vasemmalla ja Triangle-pyyhkäisy oikealla. Kummassakin tapauksessa tutkaan on asetettu pyyhkäisykaistaksi 24 – 26 GHz ja pyyhkäisyajaksi 1 ms. Sinisellä ja punaisella värillä osoitetaan alueet, jonne on sovitettu suora havainnollistamaan taajuuspyyhkäisyä lineaarisuutta.



Kuva 2: Lähettimen taajuus pyyhkäisyä aikana kahdessa eri toimintamoodissa.

Tuloksista voidaan tehdä seuraavat havainnot:

- Pyyhkäisyä aikana lähetystaajuus kasvaa tai laskee verrattain lineaarisesti ajan funktiona. Lineaarinen pyyhkäisy tekee mahdolliseksi yksinkertaisen ja nopean Fourier-muunnoksen käytön vastaanottimen etäisyyskompressiossa.
- Todellinen pyyhkäisy aika ja pyyhkäisyä kulmakertoimen (Hz/s) poikkeavat tutkan asetuspärametreistä lasketuista arvoista. On tärkeää selvittää pyyhkäisyajan ja kulmakertoimen todelliset arvot. Muussa tapauksessa kohteet ovat SAR-kuvassa väärillä etäisyyksillä ilman erillisen kalibroinnin toteuttamista.
- Kuvaan on piirretty päällekkäin useampi satunnaisesti valittu pyyhkäisy. Pyyhkäisy näyttää toistuvan tarkasti. Tämä on tärkeä ominaisuus tarkan SAR-kuvan saamiseksi. Jos pyyhkäisyssä on vaihtelua pyyhkäisykerrasta toiseen, SAR-kuvan fokusointi ei onnistu ja kohteista tulee epätarkkoja.

#### 4.1.3 Lähettimen vaihekohina

Tämän mittauksen tarkoituksena oli tarkastaa, mikä on koelaitteen lähettimen vaihekohina ja millaisen lisän miehittämättömän ilma-aluksen tärinä ja melu siihen aiheuttavat.

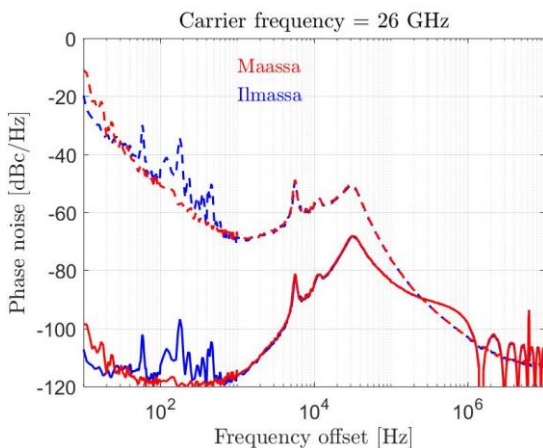
Vaihekohina on oskillaattorisignaalin satunnaista vaihefluktuaatiota, joka osaltaan huonontaa signaali-kohina-suhdetta. Se siirtyy vaihekohinaksi vastaanottimessa alassekoitettuun IQ-

signaaliin ja osaltaan heikentää muodostuvan SAR-kuvan laatua.

Kohteesta sironnut tutkan vastaanottama signaali sekoitetaan vastaanottimessa tutkan lähetsignaalin kanssa. Vastaanotettu signaali on tutkan lähetsignaalin viivästynyt kopio. Viiveen suuruus riippuu kohteen etäisyydestä. Kohteesta sironneen signaalin ja tutkan lähetsignaalin (paikallisoskillaattorisignaali sekoituksessa) vaihekohinat korreloivat niiltä osin kuin kohinan aikaskaala on pienempi kuin viive kohteesta eli vastaanottimen taajuussekoitus vaimentaa vaihekohinan matalimpia taajuuskomponentteja. Tämä on edullista esimerkiksi toisiinsa lähellä olevien kohteiden erottelun kannalta.

Mittausta varten tutkalaite kiinnitettiin multikopteriin ja ensiksi tehtiin vertailumittaus niin, että kopteri oli maassa ja roottorit eivät pyörineet. Tämän jälkeen mittaus toistettiin niin, että multikopteri leijui ilmassa ja roottorit pyörivät tyypillisellä lennonaikaisella kierrosnopeudella.

**Kuva 3** näyttää mittauksen tulokset. Katkoviivalla on esitetty lähettimen oma vaihekohina kopterin ollessa maassa ja ilmassa. Yhtenäinen viiva näyttää sen osan, joka päättyy vastaanottimen alassekoituksessa IQ-signaalin vaihekohinaksi. Kohteen etäisyys tutkasta on tässä esimerkissä oletettu olevan 100 m.



*Kuva 3: Vaihekohina lähetyksessä ja vastaanotossa*

Kopterin värinä ja melu tuottavat tässä tapauksessa selkeästi häiriötä alle 500 Hz:n taajuuksilla. Vastaanottimen alassekoituksessa vaihekohina ja kopterin häiriöt vaimenevat merkitysettömän pienelle tasolle. Tulokset osoittavat, että kopteri ei aiheuta merkittävää haittaa SAR-tutkalle lyhyen kantaman laitteistossa.

#### 4.1.4 TX/RX-loop-back-mittaus

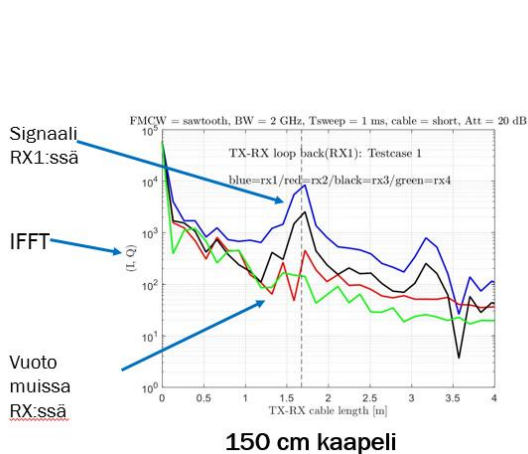
Mittauksella haluttiin varmistaa etäisyysmittauksen toiminta tunnetulla TX-RX-viiveellä. Mittaus tuotti myös arvion tutkan sisäisistä TX-RX ja RX-RX-isolaatioista.

Mittauksessa tutkalaitteen lähetsignaalin RF-signaali kytkettiin yhteen RX-porttiin kerrallaan kaapelilla, jonka viive tunnettiin. RX-signaali emuloi tässä tapauksessa tunnetulla etäisyydellä olevasta "kohteesta" tullutta heijastusta. Vastaanottimen alassekoittimeen syntyi siniaalto, joka kompressoitiin Fourier-muuntamalla ja muunnokseen syntyvän piikin taajuudesta (ns. beat-taajuudesta) voitiin laskea TX-RX-viive ja siten kohteen "etäisyys". Näin estimoitua "kohteen etäisyyttä" verrattiin TX-RX-kaapelin edustamaan tunnettuun "etäisyyteen".

Koska lähetsignaali kytkettiin vain yhteen vastaanottimeen kerrallaan, voitiin muista RX-kanavista mitata kytketystä kanavasta vuotanut teho ja siten arvioida RX-kanavien välinen erotuskyky. Sisäisesti lähettimestä suoraan vastaanottimiin vuotanut signaali kokee hyvin lyhyen etenemisviiveen ja näkyy siten alassekoituksessa matalataajuisena signaalina, jonka tehon avulla voidaan laskea arvio tutkan sisäisestä TX-RX-erotuksesta.



**Kuva 4** esittää TX/RX-loop-back-mittauksen tulokset. Kuvassa vasemmalla on Fourier-muunneltut eli etäisyyskompressoidut signaalit kaikista neljästä vastaanotinkanavasta. Lähetinsignaali oli kytketty ensimmäiseen RX-kanavaan (RX1, sininen käyrä). Muissa kanavissa näkyy ensimmäisestä kanavasta vuotanut signaali. Kuvassa oikealla on taulukko, johon on koottu tutkan antamat kaapelin pituusmittaustulokset eri tutkaparametreilla ja kahdella eripituisella kaapelilla.



150 cm TX-RX-kaapeli

FMCW-moodi	Start&stop freq [GHz, GHz]	Pyyhkäisy-aika [ms]	RX	Kaapelin pituus [cm], pyyhkäisy ylös	Kaapelin pituus [cm], pyyhkäisy alas
Lyhyt kaapeli (150 cm)					
Sawtooth	[24.5, 25.5]	0.5	RX1	166.0	—
			RX2	160.9	—
			RX3	157.9	—
			RX4	157.1	—
Triangle	[24.5, 25.5]	0.5	RX1	171.1	171.1
			RX2	169.0	170.1
			RX3	156.7	157.0
			RX4	156.2	157.5

824 cm TX-RX-kaapeli

FMCW-moodi	Start&stop freq [GHz, GHz]	Pyyhkäisy-aika [ms]	RX	Kaapelin pituus [cm], pyyhkäisy ylös	Kaapelin pituus [cm], pyyhkäisy alas
Pitkä kaapeli (824 cm)					
Sawtooth	[24.5, 25.5]	0.5	RX1	832.3	—
Triangle	[24.5, 25.5]	0.5	RX1	841.9	848.6

**Kuva 4: TX/RX-loop-back-mittauksen tulokset**

Vastaanotetussa ja etäisyyskompressoidussa signaalissa näkyy selvästi erottuva piikki, jonka paikka etäisyysakselilla antaa kaapelin pituudeksi hieman suuremman arvon kuin mitä kaapelin todellinen pituus on. Tämä johtuu siitä, että tutkan elektroniikan viivettä ei ole kalibroitu pois. Mitatut kaapelin pituudet ovat systemaattisesti suurempia kuin kaapelin todellinen pituus johtuen edellä mainitusta syystä. RX3 ja RX4 antavat lyhyempiä kaapelin pituuksia kuin RX1 ja RX2, mutta tämä on seurausta siitä, millaisia matkoja eri signaalit kulkevat laitteen sisällä.

Vastaanotinkanavien erotukseksi todettiin tyypillisesti 20 – 30 dB paitsi ensimmäisen ja kolmannen kanavan välillä oli vain 10 dB:n erotus. Syy näin huonoon erotukseen ja sen epätasapainoon ei ole tällä hetkellä tarkalleen tiedossa. Vastaanotinkanavien erotus on otettava huomioon, kun vastaanottimia käytetään antenniryhmävastaanotossa. Kahden kanavan välinen heikko erotus voi vääristää antenniryhmän pääkeilan muotoa, nostaa sivukeilatasa tai luoda nollia ei haluttuihin suuntiin. Lopullisena tavoitteena tulee selvittää heikon erotuksen syy ja pyrkiä poistamaan se.

Erotus lähettimestä vastaanotinkanaviin on 27 – 37 dB vastaanotinkanavasta riippuen.



#### 4.1.5 Koelaitteiston yhteenveto

Mittausten ja tulosten analyysin perusteella tunnistettiin tutkitusta tutkalaitteesta seuraavat vahvuudet ja heikkoudet sekä kehityskohteet.

##### **Vahvuudet**

- Suuri kaistanleveys  
→ Hyvä etäisyysresoluutio, teoriassa jopa 7.5 cm.
- Monikanavainen vastaanotin (4 kanavaa)  
→ Liikkuvan maalin ilmaisu tehokkaasti mahdollista (STAP).
- Pieni koko, paino ja tehonkulutus  
→ Voidaan lennättää esim. UAV:llä.
- Hinnaltaan kohtuullinen

##### **Heikkoudet / Kehitysmahdollisuudet**

- Pieni näytteenottotaajuus  
→ Rajoittaa etäisyysmittausikkunaa.
- Hidas taajuuspyyhkäisy:  
→ Tutka-lavetin nopea liike ja nopea liikkuva maali aiheuttavat ongelmia.
- Suurehko RX-kanavien ylikuuluminen  
→ Heikentää kykyä liikkuvan maalin ilmaisuun
- Tarkka RX-näytteistyksen ja TX-taajuuden ajoitustieto ja reaaliaikakello puuttuu  
→ Vaikeuttaa tutkadatan synkronointia muiden sensorien kanssa
- Vaatimaton lähetysteho ja kohinaluku  
→ Kantama on vaatimaton.
- Vain lineaarinen FMCW-chirp tarjolla  
→ Monipuolinen modulaatiovalikoima toisi liikkumavaraa usean tutkan keskinäishäiriöihin ja elektroniseen sodankäyntiin.

#### 4.2 Sovelluskohtaisen antennin toteutus

SAR-tutka on radiojärjestelmä, joka koostuu useista alijärjestelmistä. Kokonaissuorituskyvyn osalta keskeisessä osassa on antenni, koska sen olennaisia suorituskyvyn puutteita ei voida järkevästi kompensoida järjestelmän muissa osissa. Pienessä, kevyessä ja kustannustehokkaassa järjestelmässä antennijärjestelmän osuus korostuu, koska sen fyysinen koko, paino ja kustannus ovat merkittäviä.

COTS-tuotteina hyvin soveltuvia antenneja ei ole saatavilla, koska SAR-tutkan antennien vaatimukset eroavat oleellisesti muiden sovellusten antennien vaatimuksista. Useimmissa sovelluksissa antennilta halutaan mahdollisimman suuri vahvistus ja siten pyörähdysymmetrisen keila, eivätkä paino ja koko ole merkittävästi rajoittavia tekijöitä. SAR-tutkassa sen sijaan tarvitaan antenni, jonka keilan leveys on erilainen kahdessa toisiaan vastaan kohtisuorassa tasossa. Saatavuutta rajoittaa tietenkin myös se, että antennin suorituskyky määritellään useilla parametreilla, joiden kaikkien tulisi olla jossakin määrin sovellukselle käyttökelpoisella alueella.

Pieni koko ja paino sekä edullinen valmistuskustannus voidaan teoriassa toteuttaa tasomaisella mikroliuska-antennilla. Mikroliuska-antennin yksittäisen elementin ominaisuudet ovat vaatimattomat, joten suunnittelun näkökulmasta on kyse kaksikulotteisesta antenniryhmästä. Torviantennia käytettiin vertailukohtana, koska sillä voidaan toteuttaa käyttökelpoinen suorituskyky lukuun ottamatta pientä kokoa ja painoa sekä keilan muotoilun vaatimuksia. Toisaalta, koejärjestelmän mittaukset tehtiin torviantennilla, joka oli saatavilla vakiotuotteena ja on suorituskyvyltään koejärjestelmään riittävä, mutta se ei ole optimoitu järjestelmään kokonaisuutena.

Tavoitteena oli toteuttaa koejärjestelmässä käytettyä torviantennia vastaavat ominaisuudet siltä osin kuin ne ovat SAR-tutkan suorituskyvyn kannalta merkittäviä ja toisaalta merkittävästi pienempi koko ja paino. Koejärjestelmässä käytetyn torviantennin koko on  $120 \times 54 \times 42 \text{ mm}^3$  ja paino 150 g. Tasomainen antenni pyrittiin toteuttamaan siten, että sen koko on pienempi kuin  $120 \times 54 \times 4 \text{ mm}^3$  ilman liitintä ja paino vähemmän kuin 15 g ilman liitintä. Antennin tilavuutta ja painoa pyrittiin siis pudottamaan alle kymmenesosaan vastaavan torviantennin tilavuudesta ja painosta. Tällaisia antenneja käytettäessä antennijärjestelmän koko ja paino suhteessa koko järjestelmän kokoon ja painoon muodostuu hyvin kohtuulliseksi.





Soveltuvan tasomaisen antennin suorituskykyä selvitettiin laskelmilla, sähkömagneettisella kenttäsimulaatiolla ja valmistamalla käytännön prototyypit, joiden suorituskyky mitattiin.

Antenni vaatii pinta-alan, jonka määräävät keskitaajuus, vahvistus ja materiaali. Käytännössä tasomaisen antennin pinta-ala on samassa suuruusluokassa ominaisuuksiltaan vastaavan torviantennin apertuurin eli säteilevän aukon kanssa. Tasomaisen antennin paksuuden määrää kaistanleveys ja materiaali. Käytännössä tasomaisen antennin paksuus on vain murto osa ominaisuuksiltaan vastaavan torviantennin pituudesta. Kaistanleveyden osalta tasomaisella antennilla ei saavuteta torviantennin ominaisuuksia, koska antennin kokonaistilavuus on pieni. Muiden ominaisuuksien osalta ei ole helposti ja yksiselitteisesti todennettavissa, millainen suorituskyky voidaan saavuttaa, vaan tarvitaan simulaatioita.

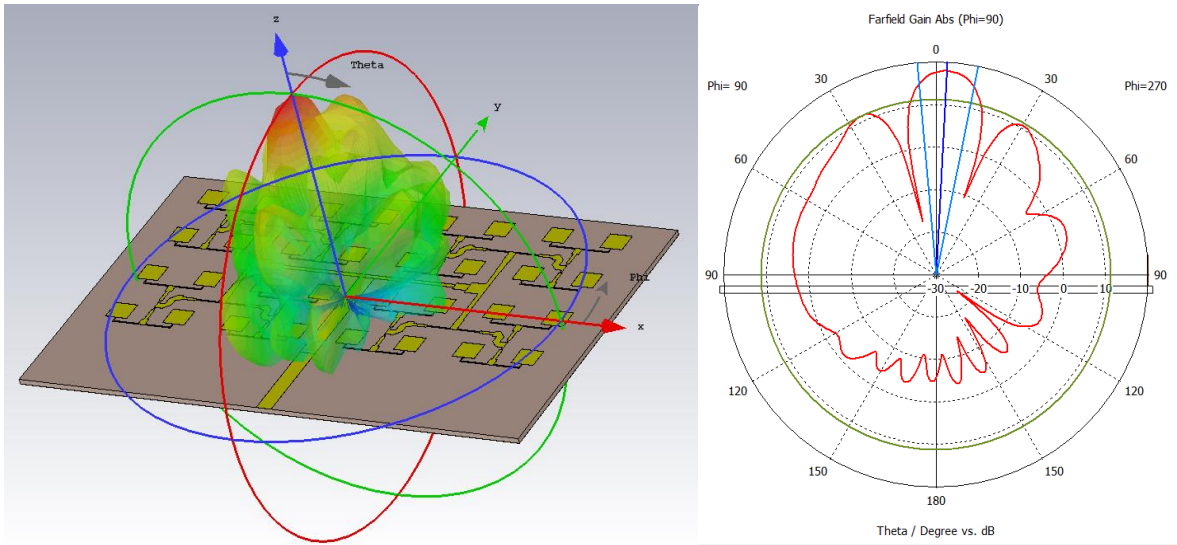
Kirjallisuuskatsaus ja sen perusteella tehdyt laskelmat osoittivat, että tasomaisella antennilla on teoriassa saavutettavissa riittävä suorituskyky. Mahdolliseksi ongelmiksi havaittiin pieni kaistanleveys impedanssin tai taajuusvasteen suhteen ja suurehko sivukeilataso. Nämä ominaisuudet eivät välttämättä ole helposti toteutettavissa käytännössä, vaikka simulaatioilla haluttu laskennallinen malli pystyttäisiin luomaan. Ongelmaksi havaittiin myös se, että erilaisia tasomaisia antennirakenteita on hyvin runsaasti ja täsmällinen tutkimus täytyy kohdentaa määrättyyn ennalta valittuun rakenteeseen. Kirjallisuuskatsauksen ja laskelmien pohjalta tutkittavaksi rakenteeksi otettiin kaksikerroksiselle mikroaaltolaminaatille toteutettu mikroliuskaryhmä. Tavoitteellisen suorituskyvyn toteuttavaksi ryhmän kooksi arvioitiin 4 x 8 (32) elementin ryhmä.

Antennirakenteen simulaatio toteutettiin CST Microwave Studio EM-simulaattorilla. Simulaation perusteella yksittäiselle antennielementille ja antennielementtien muodostamalle antenniryhmälle saatiin muodostettua haluttu suuntakuvio. Kun antenniryhmän elementteihin lisättiin tehonsyöttöverkko, sivukeilataso kasvoi toisaalta syöttöverkon aiheuttaman säteilyn vuoksi ja toisaalta syöttöverkon ja antennielementtien välisen kytkeytymisen vuoksi. Tilannetta pyrittiin parantamaan simulaatiomallin parametrien optimoinnin avulla.

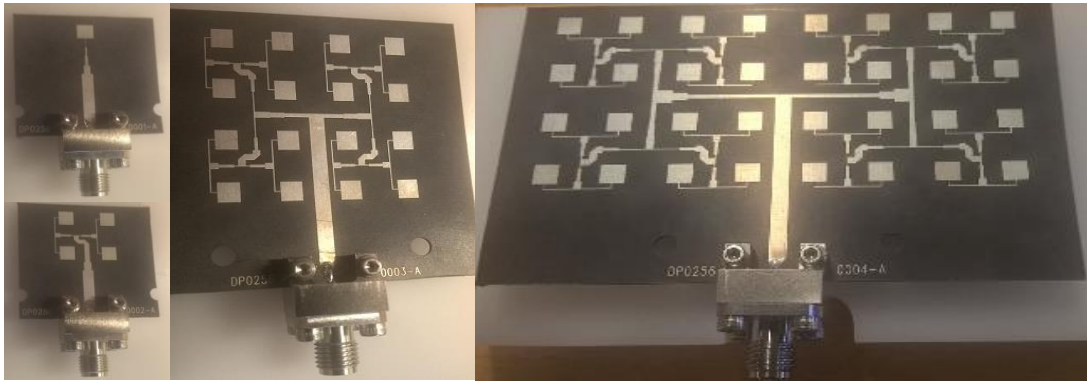
Antennista toteutettiin 1-, 2-, 4-, 16- ja 32-elementtiset ryhmät. Näistä kaikista toteutettiin kaksi prototyyppikierrosta optimoimalla peräkkäisten kierrosten tulosta vertaamalla laskennallista simulaatiomallin suorituskykyä ja mitattua toteutuksen suorituskykyä toisiinsa. Tavoiteltava antenni on 32-elementtinen ryhmä, mutta yksityiskohtien toteuttaminen optimaaliseksi vaatii myös pienempien ryhmien toteuttamisen, jotta simulaation ja toteutuksen väliset käytännön erot voidaan huomioida.

Antennin simulaatiomalli ja simuloitu suuntakuvio (Kuva 5) ja toteutettu prototyyppi (Kuva 6) on esitetty oheisissa kuvissa. Esitetyt tulokset ovat ensimmäiseltä suunnittelukierrokselta.

Tutkimuksen tuloksena on toteutettu sovelluskohtainen antenni, jonka suorituskyky on pienen koon ja painon sekä kustannusten osalta tavoitteiden mukainen. Suorituskyvyn osalta antenni ei kuitenkaan saavuta kaikkien parametrien osalta täysin asetettua tavoiteta. Toteutettu prototyyppi osoittaa arviot suunnittelun haasteista oikeaksi ja antaa merkittävää lisätietoa menetelmistä, jolla haluttu suorituskyky on saavutettavissa antennikehityksen seuraavissa vaiheissa.



Kuva 5: Antennin simulaatiomalli ja simuloitu suuntakuvi



Kuva 6: Simuloidusta antennista toteutettu prototyyppi

## 5. Loppupäätelmät

Tutkimuksen alussa tutkimusta päätettiin yhdessä puolustusvoimien asiantuntijoiden kanssa keskittää pieneen, kevyeen ja kustannustasoltaan edulliseen, lyhyen kantaman järjestelmään. Tällaisen järjestelmän kokonaissuorituskyvyn ja laitteiston teknisen suorituskyvyn välisiä suhteita selvitettiin perustutkimukselle ominaisella tavalla. Koejärjestelmän mittaus ja analyysi tuotti merkittävän määrän tietoa laitteiston suorituskyvyn yleisistä yksityiskohdista ja ongelmakohdista sekä kustannusrakenteesta, joita on vaikea lähestyä tehokkaasti teoreettisen tutkimuksen keinoin.

Liikkuvan maalin ilmaisua koskeva laitteiston suorituskyky selvitettiin sekä teoreettisesti että mittaamalla tavoitellulla tavalla. Laitteiston suorituskykyä ja virhelähteitä pystyttiin mittaamaan ja mallintamaan sekä siirtämään tietoa algoritmikehityksen tarpeisiin.

Koelaitteisto ei mahdollistanut tavanomaista FMCW-lähetettä monimutkaisempaa modulaatiota ja tämän osalta laitteiston käytännön suorituskyvyn selvitys jäi puutteelliseksi. Tutkimuksen taloudelliset resurssit eivät mahdollistaneet sellaisen laitteiston hankintaa, joka olisi mahdollistanut multistaattisen koejärjestelmän testaamisen ja tämän osalta laitteiston käytännön suorituskyvyn selvitys jäi puutteelliseksi.

Edellä mainittujen, tutkimusta rajoittavien tekijöiden seurauksena nostettiin korostetusti esiin



antennijärjestelmän suorituskyky. Antennijärjestelmän merkitys pienessä ja kevyessä lyhyen kantaman järjestelmässä korostuu ja se on myös merkittävä kustannusajuri. Antennin osalta tutkittiin yksityiskohtaisesti käyttökelpoisia rakenteita ja toteutettiin prototyyppejä, jotka lisäävät merkittävästi kohdennettua osaamista ja luovat tutkimuspohjaa tuotekehitykselle.

Varsinaisen SAR-instrumentin lisäksi järjestelmäkokonaisuutta koskevat ongelmakohdat nousivat tutkimuksessa esiin ja valmius kokonaisuuksien toteuttamiseen kehittyi tavoitellulla tavalla. Hyvin keskeinen seikka järjestelmäkokonaisuuden kehittämiseksi jatkossa on riittävän pyyhkäisy- ja näytteistysnopeuden kustannustehokas toteuttaminen, jotta tutkaa voisi liikuttaa testattua järjestelmää nopeammin ja sillä voisi ilmaista nopeampia maaleja. Tutkimus kokonaisuutena kasvatti merkittävästi aihealueen osaamista ja laajensi osaamista uusille sovellusalueille.

Tutkimuksen olennainen erityispiirre on se, että tutkimuksen osahankkeissa A ja B on työkennellyt algoritmeihin (TTY) ja laitteistoihin (DA-Design) yksityiskohtaisesti perehtyneet tahot. Tämän osaamisen yhdistäminen ja tiedon vaihto ryhmien välillä on siirtänyt merkittävästi osaamista molempiin suuntiin ja tuottanut tehokkaasti tuloksia, joita olisi ollut hankala saavuttaa vain toisen osapuolen toimesta.

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

Laitteiston tutkimuksesta ei ole tehty rahoituskauden aikana tieteellisiä julkaisuja tai raportteja DA-Designin toimesta. TTY on laatinut yhteishankkeessa useita julkaisuja. Vuonna 2017 suppealla jakelulla julkaistu tekninen raportti [1] käsittelee lyhyen kantaman SAR-järjestelmän laitteistovaatimuksia.

Mikäli tutkimuksessa saadaan sellaista tietoa ja uusia ratkaisuja, jolla on tieteellistä uutuusarvoa, pyritään tämä tieto julkaisemaan. Antennia koskeva tutkimus on vielä kesken ja siinä on havaittavissa seikkoja, joita ei tuoda selkeästi esiin olemassa olevissa julkaisuissa.

[1] Risto Vehmas ja Juha Jylhä, MiniSAR-järjestelmän suunnittelua, Tekninen raportti, Tampereen teknillinen yliopisto, Signaalinkäsittelyn laboratorio, huhtikuu 2017.