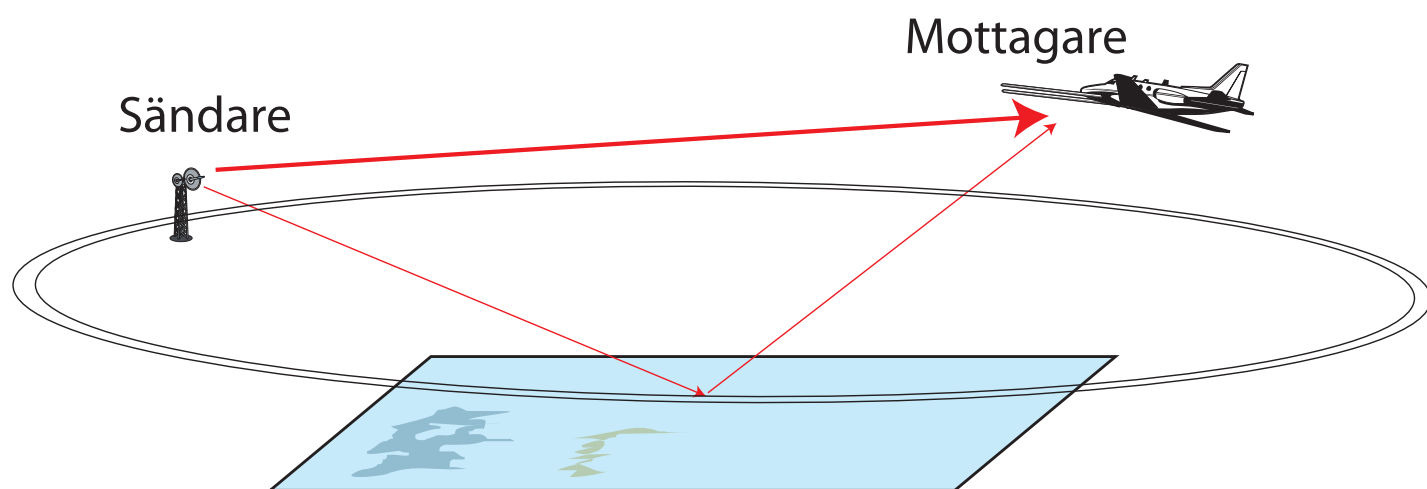


LARS ULANDER, PER-OLOV FRÖLIND,  
PER GRAHN, ANDERS GUSTAVSSON





Lars Ulander, Per-Olov Frölind, Per Grahn,  
Anders Gustavsson

# Bistatisk och passiv radar

Slutrapport

|                        |                                          |
|------------------------|------------------------------------------|
| Titel                  | Bistatisk och passiv radar, slutrapport  |
| Title                  | Bistatic and passive radar, final report |
| Rapportnr/Report no    | FOI-R--4018--SE                          |
| Månad/Month            | November                                 |
| Utgivningsår/Year      | 2014                                     |
| Antal sidor/Pages      | 29 p                                     |
| ISSN                   | 1650-1942                                |
| Kund/Customer          | FM                                       |
| Forskningsområde       | 7. Sensorer och signaturanpassning       |
| FoT-område             | Sensorer och signaturanpassning          |
| Projektnr/Project no   | E54537                                   |
| Godkänd av/Approved by | Martin Rantzer                           |
| Ansvarig avdelning     | Sensor- och TK-system                    |

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk.  
All form av kopiering, översättning eller bearbetning utan medgivande är förbjuden.

This work is protected under the Act on Copyright in Literary and Artistic Works (SFS 1960:729).  
Any form of reproduction, translation or modification without permission is prohibited.

## Sammanfattning

Projektet ”Bistatisk och passiv radar” har bedrivits som ett treårigt forskningsprojekt. Syftet med projektet har varit att öka kunskapen om bistatisk och passiv radar, dvs. radarsystem där sändare och mottagare är placerade geografiskt åtskilda på olika plattformar. Det passiva systemet, som saknar en egen sändare, parasiterar på lämpliga icke-kooperativa sändare såsom digital-TV.

Tillämpningar för bistatisk och passiv radar finns inom alla stridsarenor, speciellt där högaktuell lägesbild önskas samtidigt som radiotystnad är av största betydelse. I praktiska försök med flygande plattformar har vi demonstrerat bra resultat från både bistatisk och passiv SAR (bildalstrande syntetisk aperturradar), som kan anses unika.

Projektet bygger vidare på en mångårig utveckling av experimentella radarsystem som nu utökats med nya delsystem. Prov och försök med bistatisk radar på S-band har dock inte kunnat genomföras enligt ursprunglig planering.

Nyckelord: passiv, bistatisk, radar, SAR, LORA, CARABAS, CARINA, SIMCLAIRS, DVB-T

## Summary

The project "Bistatic and passive radar" has been conducted during a three-year period. The aim of the project has been to increase the knowledge of bistatic and passive radar, i.e. radar systems with transmitter and receiver located on geographically separated platforms. The passive system, which lacks its own transmitter, makes use of non-cooperative transmitters of opportunity such as DVB-T.

Applications of bistatic and passive radar exist in all combat arenas, especially where situational awareness is desired while radio frequency transmission silence is of the utmost importance. We have, in real-life, demonstrated unique results of using both bistatic and passive airborne SAR (imaging synthetic aperture radar).

The project is part of a long-term development of experimental radar systems that now has been extended with new subsystems. Experiments with bistatic radar at S-band have, however, not been possible to conduct as originally planned.

Keywords: passive, bistatic, radar, SAR, LORA, CARABAS, CARINA, SIMCLAIRS, DVB-T

## Innehållsförteckning

|          |                                                       |           |
|----------|-------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Sammanfattande resultat</b>                        | <b>7</b>  |
| 1.1      | Bistatisk SAR .....                                   | 7         |
| 1.2      | Passiv SAR .....                                      | 7         |
| 1.3      | Utformning av bistatiskt och passivt radarsystem..... | 8         |
| 1.4      | Internationella samarbeten .....                      | 8         |
| <b>2</b> | <b>Försök med bistatisk SAR</b>                       | <b>9</b>  |
| 2.1      | Inledning.....                                        | 9         |
| 2.2      | Planering och genomförande.....                       | 10        |
| 2.3      | Resultat.....                                         | 12        |
| 2.4      | Framtida arbete.....                                  | 13        |
| <b>3</b> | <b>Försök med passiv SAR</b>                          | <b>14</b> |
| 3.1      | Planering och genomförande.....                       | 14        |
| 3.2      | Databearbetning och resultat.....                     | 16        |
| 3.2.1    | Signalbehandlingskedjan .....                         | 17        |
| 3.2.2    | Resultat.....                                         | 18        |
| 3.3      | Framtida arbete.....                                  | 19        |
| <b>4</b> | <b>Försökssystem</b>                                  | <b>20</b> |
| 4.1      | Systemöversikt CARINA .....                           | 20        |
| 4.2      | Framtida arbete.....                                  | 22        |
| <b>5</b> | <b>Internationell samverkan</b>                       | <b>23</b> |
| 5.1      | SIMCLAIRS.....                                        | 23        |
| 5.2      | NATO SET-186 APRA .....                               | 24        |
| 5.3      | AIRBEAM.....                                          | 25        |
| <b>6</b> | <b>Publikationslista 2012-2014</b>                    | <b>26</b> |
| 6.1      | Vetenskapliga artiklar (peer-review) .....            | 26        |
| 6.2      | Konferensartiklar .....                               | 26        |
| 6.3      | Rapporter och Memon .....                             | 27        |
| <b>7</b> | <b>Referenser</b>                                     | <b>29</b> |





# 1 Sammanfattande resultat

Projektet ”Bistatisk och passiv radar” är finansierat via samlingsbeställningen från försvarsmakten och har pågått mellan 2012 och 2014. Det kan ses som en fortsättning på FoT-projektet ”Bistatisk SAR för urban miljö” som pågick mellan 2009 och 2011.

Syftet med projektet är att öka kunskapen om bistatisk och passiv radar, dvs radarsystem där sändare och mottagare är placerade geografiskt åtskilda på olika plattformar. Det passiva systemet, som saknar en egen sändare, parasiterar på andra lämpliga icke-kooperativa sändare såsom digital-TV. I projektet har marksänd digital-TV använts men i framtiden kan även satellitsänd digital-TV bli möjligt att använda.

Tillämpningar för bistatisk och passiv radar finns inom alla stridsarenor, speciellt där aktuell lägesbild önskas samtidigt som radiotystnad är av största betydelse. Ett skäl till detta kan vara minimera risken för att motsidan ska upptäcka att spaning pågår.

Andra mätgeometrier än den vanliga monostatiska, gör det möjligt att påverka och förbättra kontrasten mellan mål och bakgrund. Detta skapar en ny dimension vid ledning av plattformen i fråga: krav på relativa lägen samtidigt som den passiva plattformen med enbart mottagare kan operera långt framskjutet utan upptäckt.

## 1.1 Bistatisk SAR

Våra bistatiska flygförsök 2013 med SAR-avbildning på VHF-bandet, där sändaren befann sig i en plattform (FMV:s TP86 Sabreliner) och mottagaren i annan (civil helikopter Schweizer 300), visar att detektionsförmågan för objekt dolda i skog, t.ex. fordon, ökar genom lämpligt val av geometri. Vi får en tydligare bild jämfört med monostatisk radar. Se närmare beskrivning i avsnitt 2. Det bistatiska systemet ger dessutom en taktisk fördel genom att mottagaren som befinner sig nära det avbildade området inte sänder ut röjande radarsignaler. Nackdelar är att det behövs en mer avancerad synkroniseringshårdvara och att koordineringen mellan plattformarna blir mer omfattande, eftersom relativa positioner under mätförloppet avgör prestanda. Data från liknande flygburna bistatiska försök på VHF-bandet har aldrig tidigare redovisats, så våra resultat torde därmed vara de första [18].

## 1.2 Passiv SAR

Redan under slutet av 2012 genomfördes ett flygförsök där data registrerades med en mottagare installerad i TP86 för att testa om passiv (parasiterande) SAR kan tänkas fungera och med vilka prestanda [24]. Olika systemkoncept för detta har studerats tidigare [31]. Databearbetningen och analysen var dock svårare än förväntat och slutfördes inte förrän 2014. Två olika geografiska områden avbildades i försöken och i bägge fallen utnyttjades TV-sig-naler enligt standarden DVB-T, dvs. från TV-sändaren i Krokek utanför Norrköping i det ena fallet och från Follingbo söder om Visby i det andra.

Bearbetning av data visar på intressanta resultat trots att inte förväntad upplösning kunnat uppnås på grund av brister som identifierats, se vidare avsnitt 3. Vi har lyckats avbilda markområden, än så länge med begränsad upplösning, där belysningen kommit från icke-kooperativa DVB-T-sändare. Resultaten är unika såtillvida att det är första gången som flygburen passiv SAR demonstrerats. Det återstår dock arbete med att avhjälpa bristerna och därmed höja bildkvaliteten. Våra resultat tycks också vara bättre än de som helt nyligen redovisats från det enda andra liknande försök vi känner till [32][33].

### 1.3 Utformning av bistatiskt och passivt radarsystem

Vi har utvecklat ett försökssystem för radarmätningar som kan konfigureras på ett flexibelt sätt genom att den har flera utbytbara moduler. Det innebär, exempelvis, att vi kan göra bistatiska mätningar från olika plattformar, samtidigt med motsvarande monostatiska mätningar från en av plattformarna, se avsnitt 4.

Projektet är en av flera intressenter som bidrar långsiktigt till uppbyggnaden av nya försökssystem. Resultaten från projektet är mycket goda och målsättningarna har till största delen kunnat uppfyllas. Målsättningen att genomföra ett markbundet bistatiskt experiment på S-band kunde dock inte uppnås som planerat p.g.a. försenad leverans.

### 1.4 Internationella samarbeten

Tre samarbeten har genomförts under projektperioden:

- EDA SIMCLAIRS<sup>1</sup>
- NATO SET-186 APRA<sup>2</sup>
- EU FP7 AIRBEAM<sup>3</sup>

Projektet har, som resterande uppgift från projekt ”Bistatisk SAR för urban miljö”, värderat sub-SAR som är ett koncept för att upptäcka mål under markytan, t.ex. nedgrävda IED:er. Detta arbete har skett inom ramen för EDA-projektet SIMCLAIRS och i samarbete med Saab, se avsnitt 5.1.

Projektet har deltagit i NATO-gruppen SET-186 APRA som haft som uppgift att delge varandra erfarenheter och gemensamt hitta tillämpningar för flygburen passiv radar och krav på dessa tillämpningar, se avsnitt 5.2.

I EU-FP7-projektet AIRBEAM har civila tillämpningar i samband med naturkatastrofer studerats. Vårt projekt har framförallt bidragit med erfarenheter från SAR och fått insikter i krav från dessa tillämpningar, samtidigt som vi fått förnyade kunskaper om kombinerade system och hur övriga partners sett på detta, se avsnitt 5.3.

---

<sup>1</sup> SIMCLAIRS = Studies for Integrated Multifunction Compact Lightweight Airborne Radars and Systems

<sup>2</sup> APRA = Airborne Passive Radars and their Applications

<sup>3</sup> AIRBEAM = AIRBorne information for Emergency situation Awareness and Monitoring

## 2 Experiment med flygburen bistatisk SAR

### 2.1 Inledning

Flygburen eller satellitbaserad SAR-radar är en etablerad teknik för högupplösande markspaning. Många SAR-system utnyttjar C- eller X-bandet, dvs. mikrovågsfrekvenser kring 6 GHz eller 10 GHz, motsvarande våglängderna 5 cm respektive 3 cm. FOI har tidigare utvecklat SAR-system (CARABAS, LORA) på lägre frekvenser i VHF-respektive UHF-bandet som har unik förmåga att upptäcka mål dolda i skog och under kamouflage. Upptäcktsförmågan begränsas ofta av radarklottedet från den omgivande skogen som är relativt hög för en monostatisk radargeometri, dvs. med samlokaliserade sändare- och mottagarantennerna. Genom att subtrahera bilder tagna vid olika tidpunkter kan klotternivån reduceras och upptäcktsprestanda förbättras under förutsättning att målet förflyttat sig [34]. En annan möjlighet som FOI undersökt är att flyga i en cirkel runt målområdet vilket ger högre upplösning och även minskar klotternivån [35].

Ett annat alternativ för att reducera klotter från skog är att använda en bistatisk radarkonfiguration, dvs. med sändare och mottagare på olika plattformar och med stor vinkelseparation sett från målområdet. Metoden bygger på att radarekots från skog på VHF-bandet ofta domineras av hörnreflektion mellan mark och trädstammar. För monostatisk geometri ger det maximalt radareko när mark och stam bildar en rät vinkel. För bistatisk geometri bryts symmetrin och hörnreflektionen avtar i styrka om sändare och mottagare separeras med tillräcklig vinkel i höjddled. Reflektionen från ett fordon, däremot, är mindre känslig för den bistatiska geometrin och sker över en bred vinkelsektor, dvs. under förutsättning att fordonets höjd över mark är mindre än våglängden, se Figur 2-1 som illustrerar principen.



Figur 2-1. Schematisk illustration av radarreflektion från fordon respektive skog på VHF-bandet. Våglängden på det använda frekvensbandet (27-82 MHz) varierar inom intervallet 4-10 m. Infallande riktning för radarstrålningen illustreras av den långa pilen från det övre högra hörnet i bilderna. Vänstra bilden visar den reflekterade strålningen från ett fordon, dvs. som sprids inom en bred sektor eftersom fordonets utsträckning i höjddled är litet i förhållande till våglängden. I den högra bilden visas radarreflexen från skog som domineras av hörnreflektion mellan trädstammar och mark eftersom stammarna är höga i förhållande till våglängden, och marken kan betraktas som plan. Hörnreflektion mellan vertikal stam och horisontell mark ger starka radarekon som koncentreras till en small sektor i motsatt riktning i förhållande till den inkommande radarstrålningen.

Under hösten 2013 genomfördes de första försöken med bistatisk SAR på VHF-bandet och med två flygande plattformar. Syftet med försöken var att undersöka hypotesen att bistatiska geometrier kan ge mindre klotter och bättre måldetektion för fordon dolda i skog. Mätningarna genomfördes med en radiomottagare, CARINA, i en helikopter som registrerade signaler från en flygradar, LORA, med både sändare och mottagare [18][36]. LORA har sedan 2011 kompletterats med en funktionalitet som möjliggör mätningar även

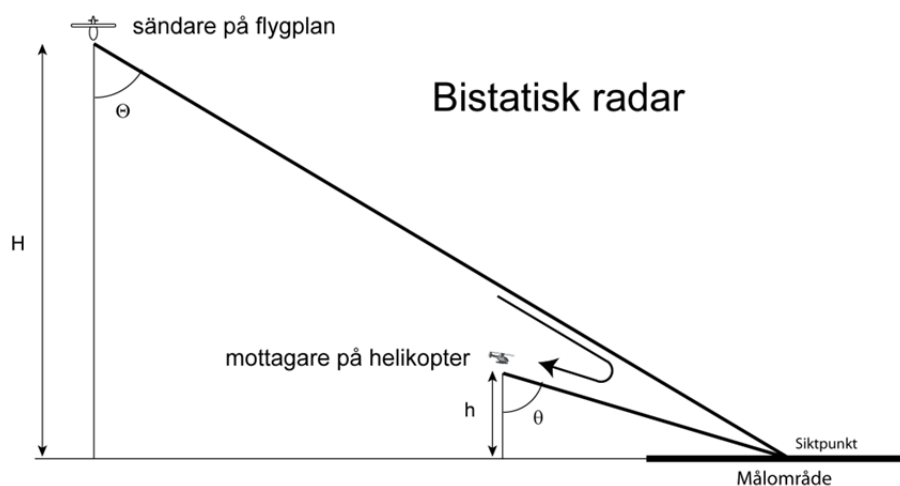
inom bandet 20-90 MHz, dvs. den arbetsmod som tidigare fanns realiserad i det äldre flygburna systemet CARABAS-II. Det bistatiska provet utfördes inom frekvensbandet 27-82 MHz med LORA installerat i FMV:s provflygplan TP86 Sabreliner och CARINA installerad i en Schweizer 300. Registrerat data har analyserats och bistatiska SAR-bilder har genererats. För CARINA var såväl plattform som tillhörande antennarrangemang samma som använts och utvecklats av Saab för systemet CARABAS-3, se Figur 5-1.

## 2.2 Planering och genomförande

Flygburna bistatiska mätningarna på VHF-bandet genomfördes med CARINA-systemet som passiv mottagare och LORA-systemet som såväl belysande sändare som monostatisk mottagare. De bistatiska proven inleddes med synkroniseringstester för att verifiera att en gemensam och stabil tidsreferens kunde upprätthållas mellan LORA och CARINA. Synkroniseringen baseras på att utnyttja 1PPS<sup>4</sup>-signalen från de GPS-mottagare som var installerade i respektive system.

De bistatiska proven syftade till att samla in monostatiska och bistatiska SAR-data där den bistatiska geometrin varierades mellan ett antal flyglöpor över samma målområde. Då CARINA är installerad i en liten helikopter fick dess flygenvelop till stora delar styra utformningen av flygprogrammet. En Schweizer 300 flygs som regel på höjder från en kilometer eller lägre medan TP86 i allmänhet flyger på betydligt högre höjder. Den passiva bistatiska mottagaren fick därmed verka närmast målområdet. Det motsvarar också det taktiska uppträdande som ett bistatiskt system förmodligen skulle använda, dvs. med den belysande sändaren på stort avstånd och mottagaren (utan egen röjande strålning) placerad på kortare avstånd från fientligt område.

Den bistatiska geometrin skapades med rakbanor på olika höjd, se Figur 2-2. Tre bistatiska vinklar, 0°, 10° och 20°, i elevation definierades enligt Tabell 1, Vinklarna är korrekta vid siktpunkten som är mitt i avbildat markavsnitt. Registreringen under varje flyglöpa pågick så att en aspektvinkelförändring (integrationsvinkel) om minst 90° skulle uppnås för ett markområde med radien 500 m runt siktpunkten. Planerade flyghastigheter var anpassade så att samma aspektvinklar registrerades vid siktpunkten från de två parallella flygbanorna på olika höjd. Då den lilla helikopterns farthållning påverkades kraftigt av med- och motvind var detta i praktiken dock svårt att uppnå fullt ut.



Figur 2-2. Sidovy av använd bistatisk radargeometri. Sändare och mottagare har olika infallsvinkel  $\Theta$  respektive  $\theta$  mot målområdet. Den bistatiska vinkeln i elevation är  $\Theta - \theta$ . Den nominella rakbanan för respektive plattform är vinkelrät mot sidovyns plan. Plattformarnas fart anpassades så att flygplanet hela tiden skulle ligga rakt över helikopter sett från siktpunkten. I praktiken gick det dock inte att hålla dessa hastigheter eftersom helikoptern är vindkänslig.

<sup>4</sup> 1PPS = 1 Pulse Per Second. En tidssynkroniserad signal som högkvalitativa GPS-mottagare genererar.

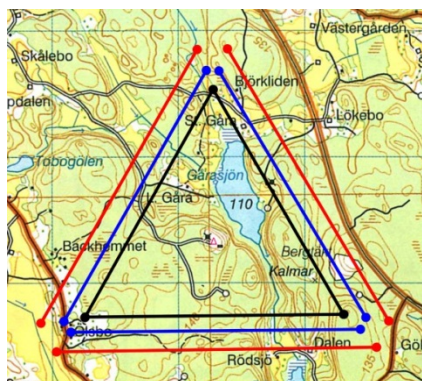
Tabell 1. Bistatiska radargeometrier. De geometriska parametrarna är definierade i Figur 2-2.

| Geometri | H      | $\Theta$ | h     | $\theta$ | $\theta - \Theta$ |
|----------|--------|----------|-------|----------|-------------------|
| 1        | 2500 m | 60°      | 500 m | 60°      | 0°                |
| 2        | 2500 m | 55°      | 333 m | 65°      | 10°               |
| 3        | 2500 m | 50°      | 217 m | 70°      | 20°               |

Flygplaneringen innehöll tre flygpass över två olika geografiska områden, nämligen Lilla Gåra (FOI:s utomhusmätplats för radarmålarea) sydväst om Linköping samt Røxtuna (Tuna Kungsgård) nordost om Linköping invid Røxtens södra strand.

Det inledande flygpasset för systemverifiering genomfördes 25 oktober 2013 över Røxtuna, en terräng som mest består av öppna fält samt sjön Røxen, då det bedömdes ge minst klotter. Flygpasset bestod av tre flyglöpor på kurs 270° med de geometrier som redovisas i Tabell 1. En 5 m stor radarreflektor användes som referensobjekt placerad vid siktpunkten och inriktad mot norr.

De två följande passen genomfördes 25 oktober respektive 8 november över huvudmålområdet Lilla Gåra. Syftet med de två passen var att ha två olika målspele. För varje flygpass genomfördes tre flyglöpor med olika kurser (90°, 210° och 330°) per bistatisk vinkel enligt Tabell 1. Det gav totalt nio flyglöpor per pass. På samma sätt som i Røxtuna placerades en 5 m stor radarreflektor vid siktpunkten, belägen inom mätplatsens mätplan. Reflektorns riktning justerades i horisontalplanet inför varje flyglöpa för att ge optimal målarea. På mätplanen och i skogen strax utanför fanns några fordon av olika typer utplacerade. Figur 2-3 visar de nio planerade flyglöporna för helikoptern samt radarreflektorn utplacerad vid siktpunkten.



Figur 2-3. Nio flyglöpor kring Lilla Gåra som användes av helikoptern. För respektive flygkurs där röd, blå och svart bana motsvarar en allt lägre flyghöjd (se Figur 2-2 och Tabell 1). Tillsammans med parallella flygbaner på högre höjd för TP86, utanför kartans täckning, erhöles de bistatiska vinklarna 0° (röd), 10° (blå) och 20° (svart) vid siktpunkten (liten röd triangel). De två fyllda cirkelarna hos varje flygbana motsvarar start- och stoppositioner. Fotot visar Lilla Gåra mätplats där en 5 m stor radarreflektor placerats i anslutning till siktpunkten. Reflektorn justerades manuellt för att peka optimalt, i azimutled, mot de två plattformarnas flygkurser 90°, 210° och 330°. Tornet som syns intill används för mätningar av målarea. (© Karta: Lantmäteriverket Gävle 2001. Ref. nr. L2002/308)

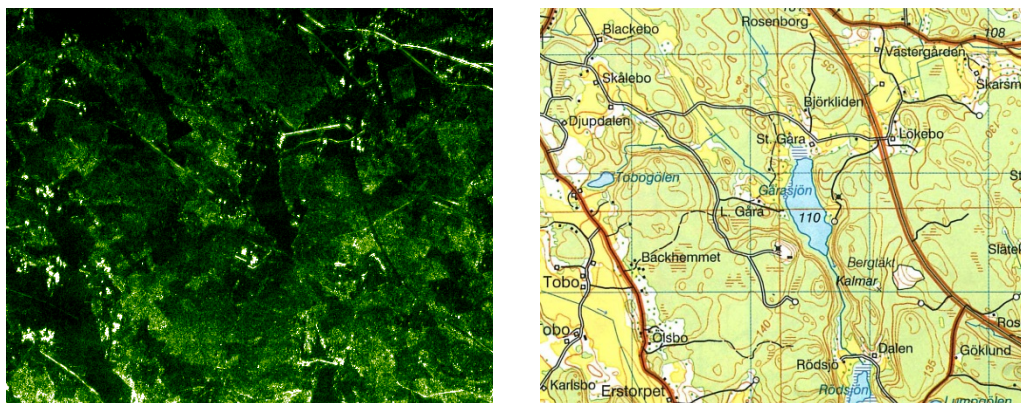
Efter det första flygpasset upptäcktes att LORA-systemet inte hade registrerat monostatiska data. Felet åtgärdades och monostatiska data kunde samlas in under det andra flygpasset. Bistatiska data samlades dock in framgångsrikt under bägge flygpassen.



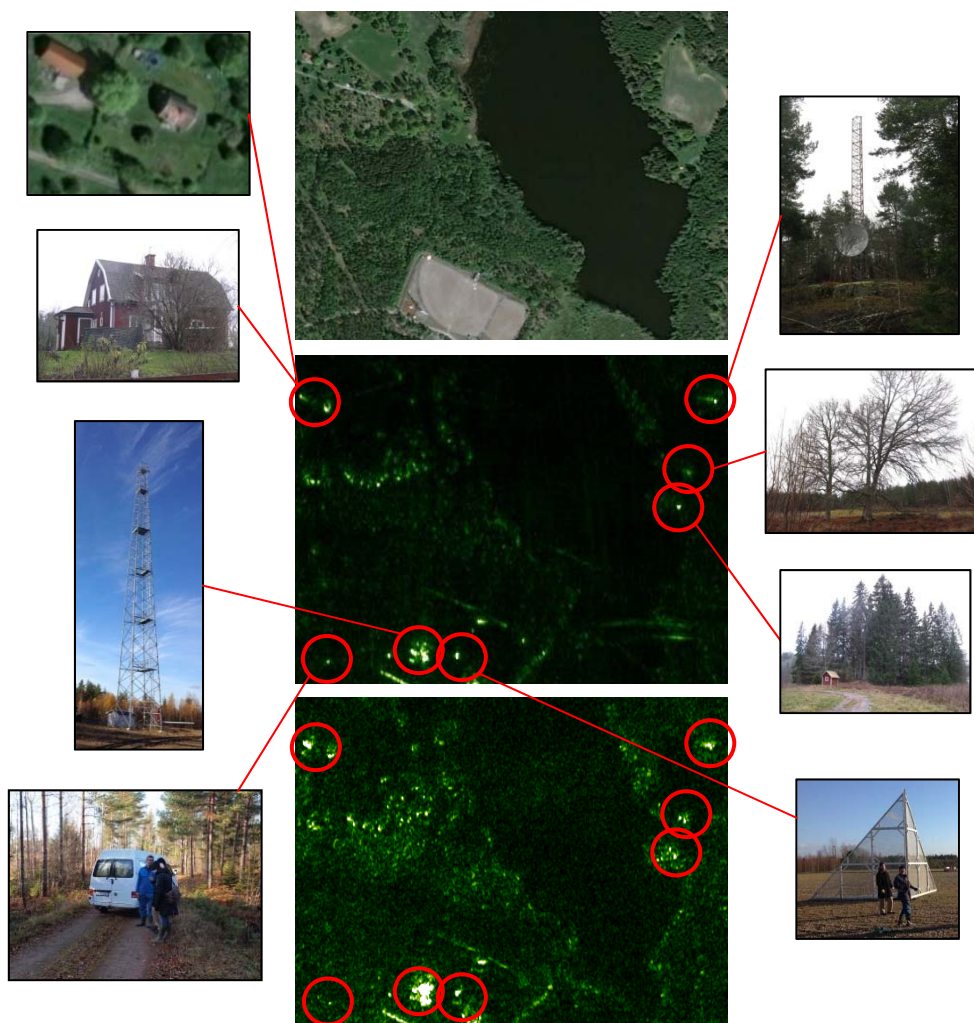
## 2.3 Resultat

Insamlat radardata processerades till SAR-bilder på sedvanligt sätt, dvs. med puls-kompression, bredbandsrekonstruktion, radiostörfiltrering och bakåtprojektion [37]. Monostatiska och bistatiska data har processats på likartat sätt. En skillnad är dock att den mottagna signalen behöver justeras i det bistatiska fallet eftersom GPS-synkroniseringen via 1PPS-signalen inte är perfekt. Detta görs genom att noggrant följa och bestämma tid och fas för den mottagna direktsignalen från sändaren.

Två exempel på resultat från försöken presenteras i Figur 2-4 och Figur 2-5. En monostatisk SAR-bild från LORA-systemet, dvs. med LORA som både sändare och mottagare, visas i Figur 2-4. Mörka områden är antingen sjöar eller områden utan vare sig skog eller bebyggelse, t.ex. öppna fält. Vita områden är företrädesvis bebyggelse, olika typer av luftburna ledningar eller stängsel. Gröna områden är skogsmark. I Figur 2-5 visas istället en jämförelse mellan en monostatisk och en bistatisk SAR-bild. Den undre bilden är monostatisk och den mittersta bilden har 20° bistatisk vinkel. Bilderna visar en tydlig skillnad för klottret över skog med betydligt lägre nivåer för 20° bistatisk vinkel. Signalnivån från hus, master, torn och fordon visar däremot ingen större skillnad mellan bilderna. Dessa observationer är i överensstämmelse med våra förväntningar och beräkningar. Några enstaka träd visar samma beteende, dvs. liten skillnad mellan bilderna, vilket förklaras av att de är lövträd med relativt stora horisontella grenar. Att master och torn, som ju är trädlika, syns beror på horisontella strukturer hos fackverken.



Figur 2-4. Vänstra bilden visar en monostatisk SAR-bild (bildstorlek: 4.1 km x 3.3 km) från 8 november 2013 och flygriktning 90°. Kartbild över samma område visas till höger. (© Karta: Lantmäteriverket Gävle 2001. Ref. nr. L2002/308)



Figur 2-5. Den mittersta radarbilden visar en bistatisk SAR-bild med 20° bistatisk elevationsvinkel (bildstorlek: 740 m x 560 m) från 8 november 2013 och 90° flygriktning. Den undre SAR-bilden visar istället avbildning med motsvarande monostatiska radargeometri och den övre är en Google-bild. Intressanta detaljer är inringade och förbundna med motsvarande mark- eller flygfoto. Notera att klotret från skogen är mindre i den mittersta bilden jämfört med den undre bilden.

## 2.4 Framtida arbete

Resultaten från flygförsöken visar att det är möjligt att minska klotternivån och förbättra detektionsförmågan i skogsterräng genom att använda lämplig bistatisk SAR-geometri. Det är betydelsefullt eftersom radarreturen från militärt intressanta mål samtidigt inte ändras nämnvärt, med en kontrastökning som resulterar i en ökad detektionsförmåga som följd. Klotternivån minskar dock inte för alla typer av skog. Träd med kraftiga horisontella grenar som t.ex. ekar påverkas inte lika mycket av den bistatiska geometrin. Inte heller hus, torn, master eller stängsel påverkas nämnvärt. Resultaten är i linje med vår ursprungliga hypotes.

En stor fördel med bistatisk radargeometri är att mottagaren är placerad i en separat plattform visavi sändaren vilket gör den mindre utsatt för motåtgärder t.ex. störning. En nackdel är dock att sändare och mottagare måste synkroniseras. I flygförsöken användes signaler från GPS-mottagare men det finns andra lösningar som skulle kunna studeras närmare.

### 3 Experiment med flygburen passiv SAR

Den första flygburna mätkampanjen i syfte att samla in data för att kunna studera olika frågeställningar kring passiv SAR genomfördes under 2012, med ett flygpass i november och ett i december. Digital marksänd TV enligt standarden DVB-T<sup>5</sup> valdes som icke-kooperativ sändsignal inför planeringen av denna första mätomgång. Som flygburen mottagare utnyttjades FOI:s SAR-system LORA [36], vilket är anpassat för installation i FMV:s provplattform TP86 Sabreliner. LORA kan konfigureras för att passivt registrera signaler i intervallet 200-800 MHz, utan att själv sända. Det innebär att merparten av den del på UHF-bandet som är upplåtet i Europa för tjänsten DVB-T (470-862 MHz), enligt internationella teleunionen ITU<sup>6</sup>, kan utnyttjas. Sedan ett antal år tillbaka används frekvensutrymmet 790-862 MHz inte längre i Sverige för DVB-T utan har av PTS<sup>7</sup> överlåtits till tjänster inom mobilt bredband. Samtidigt har frekvensbandet 174-240 MHz öppnats upp för DVB-T [38].

#### 3.1 Planering och genomförande

Den utsända signalen från en av de digitala TV-kanaler som distribueras av sändarna i Krokek och Follingbo användes som belysare vid respektive flygpass. Sändarnas geografiska lokalisering framgår av Tabell 2. Flygpassen varade drygt en timme från start till landning på Malmens flygfält.

Tabell 2. Sändarmaster som utnyttjades vid inledande flygförsök med passiv SAR. Masterna är s.k. storstationer där antennsystemets centrum befinner sig ungefär 12 m under masttoppen.

| Mast      | Latitud<br>[WGS84] | Longitud<br>[WGS84] | Masthöjd<br>[m] | Höjd över<br>havet [m] | ERP<br>[kW] |
|-----------|--------------------|---------------------|-----------------|------------------------|-------------|
| Krokek    | 58° 40' 35.4" N    | 16° 28' 03.9" E     | 324             | 437                    | 50          |
| Follingbo | 57° 35' 33.6" N    | 18° 22' 22.7" E     | 260             | 338                    | 50          |

Tre rakbanor längs flygkurserna 89°, 115° och 280° definierades för flygprogrammet där sändaren i Krokek var belysningskälla, se Figur 3-1. Banorna repeterades på flyghöjderna 1.5 km och 3 km vilket gav totalt sex registreringar. De olika höjderna gör det möjligt att undersöka hur infallsvinklar och avstånd till mark respektive sändare påverkar den mottagna signalen. Med hjälp av dessa data kan kraven analyseras för mer operativt intressanta flyghöjder och längre spaningsavstånd.

När antennsystemet för LORA har installerats pekar huvudloben för respektive antennelement snett ner mot marken på vänster sida om flygplanets färdriktning. Som framgår av Figur 3-1 har flygbanan mot Krokek på kursen 280° sändaren hela tiden på höger sida vilket innebär att direktsignalen, som inte reflekterats via markscenen, når mottagaren genom antennsystemets backlober. För flygkurs 115° är situationen istället den omvända då registreringen startar relativt nära sändaren för att sedan fjärma sig alltmer men med sändarmasten hela tiden på vänster sida om flygplanet. Även om TV-sändarna har optimerats för att ha riktverkan i vertikalled, med antennloben riktad svagt nedåt, är direktsignalen som registreras vid passiv SAR stark relativt de reflekterade markbidragen och riskerar att "blända" mottagaren. På högre höjd och längre avstånd förväntas en svagare direktsignal men också en svagare markretur p.g.a. det längre avståndet till marken. Jämförelser av insamlat datamaterial från de två flygkurserna, liksom två olika flyghöjder, gör det möjligt att undersöka krav på systemdynamik.

<sup>5</sup> DVB-T = Digital Video Broadcasting – Terrestrial, dvs. marksänd digital-TV.

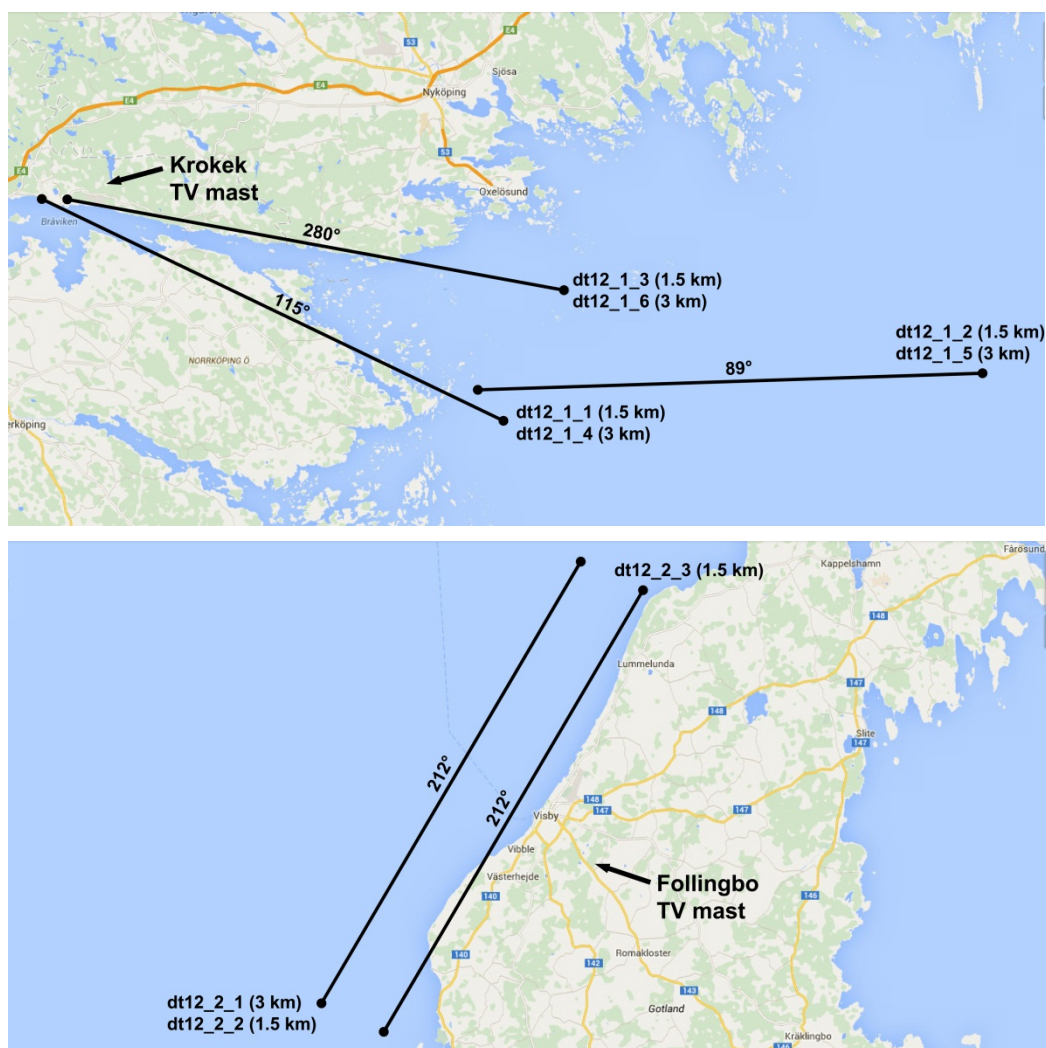
<sup>6</sup> ITU = International Telecommunication Union

<sup>7</sup> PTS = Post och Telestyrelsen



Den tredje flygbanan (kurs 89°), baserad på Krokek, placerades på längre avstånd från sändaren och syftade främst till att inkludera öppet hav samt den yttre skärgården inom den belysta markscenen. Detta förmodades resultera i gynnsam klotterbakgrund gentemot större fartygsmål. Som stöd till den efterföljande dataanalysen registrerades även tillgänglig AIS<sup>8</sup>-information från fartyg inom det aktuella området i samband flygpassets genomförande den 21 november 2012.

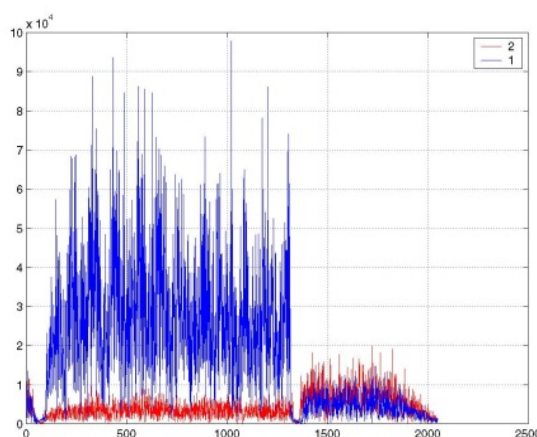
För Follingbo var flygkursen 212° med två parallellförflyttade flygbanor på höjden 1.5 km, där endast den yttre banan repeterades på höjden 3 km vilket gav totalt tre registreringar under flygpassets genomförande 12 december 2012. Som illustreras i Figur 3-1 definierades rakbanorna i detta fall symmetriskt relativt Follingbo så att man såväl närmar sig som fjärrnar sig sändaren på vänster sida under varje registrering, dock på ett betydligt längre näravstånd till sändaren jämfört med Krokeksmätningarna.



Figur 3-1. Planeringsunderlag för de mätgeometrier som definierades inför passiva dataregistreringar med LORA där TV-signalen från Krokek (överst) respektive Follingbo (nederst) utnyttjades som belysare av markscenen. Alla fem fördefinierade och markerade rakbanor har längden 52 km och tar omkring 5.4 minuter att flyga med den föreskrivna farten om 160 m/s. (Bilder: Google Maps)

<sup>8</sup> AIS = Automatic Identification System - ett internationellt system som bygger på att fartyg själva rapporterar sin identitet och position till sin närmaste omgivning.

Data registrerades i princip kontinuerligt av LORA-systemet genom en ny mätmod som anpassats för passiv SAR. I ett cykliskt mönster om 160  $\mu\text{s}$  lagras data kontinuerligt frånsett ett kort uppehåll på 1.5625  $\mu\text{s}$  som avslutar varje intervall. Mottagarens centerfrekvens i LORA kan inte ställas in godtyckligt och TV-kanalens bandbredd hamnar därför som regel något osymmetriskt inom mottagarens bandbredd på 10 MHz. Vid stor osymmetri mellan TV-kanalen och mottagarens momentana frekvensfönster kan signalen inte registreras fullständigt, vilket gör TV-kanalen olämplig. TV-kanal nummer 28, med en centerfrekvens på 530 MHz var bäst för Krokeks-sändaren och TV-kanal nummer 41 med centerfrekvensen 634 MHz för Follingbo-sändaren. Motsvarande injusterade centerfrekvenser inom LORA:s mottagarband blev 528 MHz respektive 633.6 MHz. Figur 3-2 visar mottagen signal vid två olika avstånd till TV-sändaren i Krokek.



Figur 3-2. TV-kanalens (kanalnummer 28) frekvensspektra är registrerat mellan index 100 och 1400. LORA-mottagarens bandbredd är 10 MHz med 5 kHz per indexenhet. Blå kurva representerar insamlat data från ett avstånd när flygplanet är som närmast sändaren i Krokek på höjden 3 km och kursen 115°. Röd kurva återger istället registrerat data från samma flyghöjd men i början av rakbanan längs kurs 280° på väg mot sändaren.

Vid samtliga mättillfällen har LORA konfigurerats för att registrera data parallellt i tre mottagarkanaler anslutna till separata element i antennsystemet. Motivet för detta är att möjliggöra digital lobstyrning, både för att erhålla en renare referenssignal från direktsignalen och för att undertrycka densamma i förhållande till den svagare markreturen.

En viktig förutsättning för ett bra resultat är att DVB-T-signalen ligger inom mottagarens dynamikområde vilket undviker överstyrning. LORA:s mottagarsystem har dock bara fasta dämparlägen vilket innebär att det är svårt att finna en dämparinställning som fungerar för både de starka direktsignalerna och de svaga returerna från målområdet, speciellt då signalerna varierar i styrka under flyglöporna.

## 3.2 Databearbetning och resultat

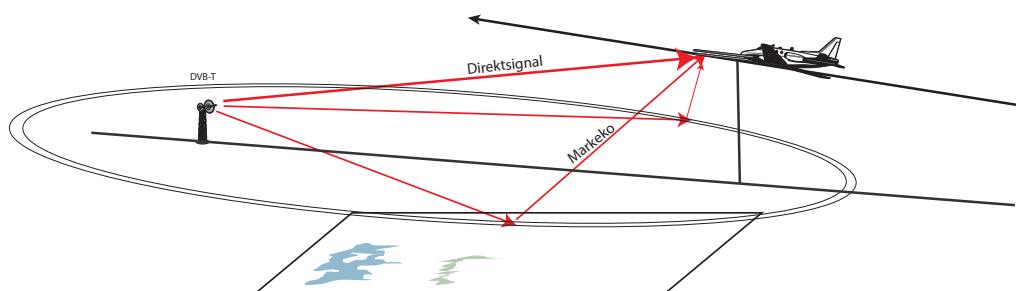
Omkring 50 minuter med mätdata från vardera av de tre parallella antennkanalerna finns registrerat under de nio flyglöporna. Resultaten hittills baseras på analys från tre löpor. Avsikten med analysen är att ta fram delresultat från någon sekunds integration, antingen koherent eller icke-koherent, och sedan integrera signalen under 10-tals sekunder. En utvärdering visar dock att integrationen inte lyckats fullt ut. Huvudskälet är osäkerhet i geometrin, vilket orsakar problem vid längre integrationstider. Nuvarande resultat baseras på att endast en antennkanal utnyttjats vilket förenklat signalbehandlingen. Fortsatt analys kommer att inkludera fler kanaler vilket förväntas öka signalbrusförhållandet och förbättra undertryckning av oönskade signaler.

### 3.2.1 Signalbehandlingskedjan

Resultaten baseras på korrelationsteknik och en geometrimodell. Positioner för TP86 är kända igenom LORA:s integrerade GPS- och INS-system. Detta delsystem ger data om plattformens position samt roll-, anfalls- och girvinklar<sup>9</sup>. Med kunskap om hur mottagarens antennelement är placerade relativt navigationssystemet kan elementens position bestämmas i det jordfasta koordinatsystemet WGS84. Den markfasta sändarens position (höjd plus markkoordinat) är också känd.

Geometrin för analyserat data illustreras schematiskt i Figur 3-3. Markpositionerna i den genererade SAR-bilden är definierade inom ett rektangulärt område med sändarens respektive mottagarens positioner kända.

För en viss tidpunkt av mottagen signal beräknas avståndet från sändaren till mottagarens aktuella position längs två utbredningsvägar: sträckan för direktsignalen samt sträckan från sändaren via reflexion i marken och till mottagaren, se Figur 3-3. Avstånden för delsträckan mellan sändarens position och alla markpunkter inom det önskade området för SAR-bilden är konstanta och kan beräknas i förväg. Korrelationen avser den mottagna signalen med sig själv, motsvarande tidsfördröjningen mellan de två gångvägarna givet en viss markpunkt. Tidsfördröjningen definierar således en ellipsoid där sändar- och mottagarposition utgör brännpunkter. Skärningen mellan ellipsoiden och en plan markyta definierar i sin tur en ellips.



Figur 3-3. Passiv bistatisk geometri. Sändarens direktsignal används som referenssignal för korrelation av tidsfördröjningar motsvarande gångvägen sändare-markpunkt-mottagare. Då mottagarantennens riktningsverkan i azimut (sidled) är liten kan markskot komma från vilken punkt som helst utmed en ellips med mottagaren och sändaren som brännpunkter.

Upplösningen är beroende av sändarsignalens bandbredd samt den bistatiska geometrin. Bandbredden för en DVB-T-kanal är ca 8 MHz vilket motsvarar ca 20 m i avståndsupplösning när radargeometrin är monostatisk men försämrar som funktion av den bistatiska geometrin. Korrelationsberäkningarna upprepas utmed flyglöpan, vilket gör det möjligt att, med kännedom om markhöjden, bygga upp en tvådimensionell upplösning. För en viss markpunkt vrider sig ellipserna utefter flyglöpan och signalen integreras koherent. Övriga markpunkter som skär ellipsen bidrar endast till en brusmatta. Det är därför uppenbart att noggrannare kännedom om mätgeometrin ger större integrationsvinst och mindre geometrisk distorsion.

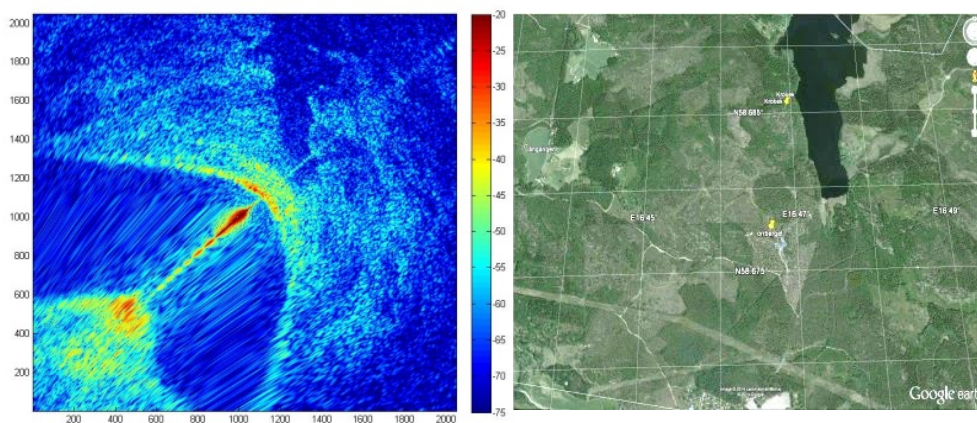
För att snabba upp beräkningarna har FFT-metoder använts för korrelationer. Detta tillsammans med det förenklande antagandet att geometrin är statisk under korta tidsintervall, dvs. vi har antagit i beräkningarna att plattformen står still under 160  $\mu$ s. Eftersom flyghastigheten är 160 m/s är förflyttningen under denna tid ca 2.5 cm. Våglängden är ca 50 cm och felet blir maximalt någon tiondels våglängd. I praktiken är de processade SAR-geometrierna ännu mer gynnsamma och felet kan betraktas som försumbart.

<sup>9</sup> Dessa vinklar brukar benämnas "roll, pitch and yaw"

### 3.2.2 Resultat

Figur 3-4 visar en framräknad SAR-bild från Krokeksområdet efter att registrerade radarekon är integrerade och projicerade på ett plan. Vid en jämförelse med den optiska bilden kan kontrastskillnader från större strukturer identifieras såsom sjöar, öppna fält och skogsbeklädd terräng. Radarbilden har genererats med en integrationstid på 1 s vilket motsvarar en flygsträcka på ca 160 m. Bandbredden hos en DVB-T-signal är 8 MHz vilket ger avståndsp profiler med en upplösning på ca 20 m. Upplösningen i den andra riktningen (tvärs avståndet) definieras av den vinkelvariation som fås under integrationssträckan och blir i det här fallet också ca 20 m. En analys visar att den teoretiska upplösningen inte uppnåtts beroende på osäkerheter i den antagna geometrin. Den faktiska upplösningen återstår att utvärdera genom att i mer detalj analysera bilddata.

Sändarens position i Figur 3-4, markerad med gult mitt i den optiska bilden, framträder tydligt i radarbilden på samma position. Mottagarplattformen befinner sig här på ca 3 km höjd (ca 2.5 km över masten) och på ca 3.1 km i avstånd i markplanet. Den ungefärliga positionsriktningen indikeras av sidoloberna från sändaren i sydvästlig riktning.

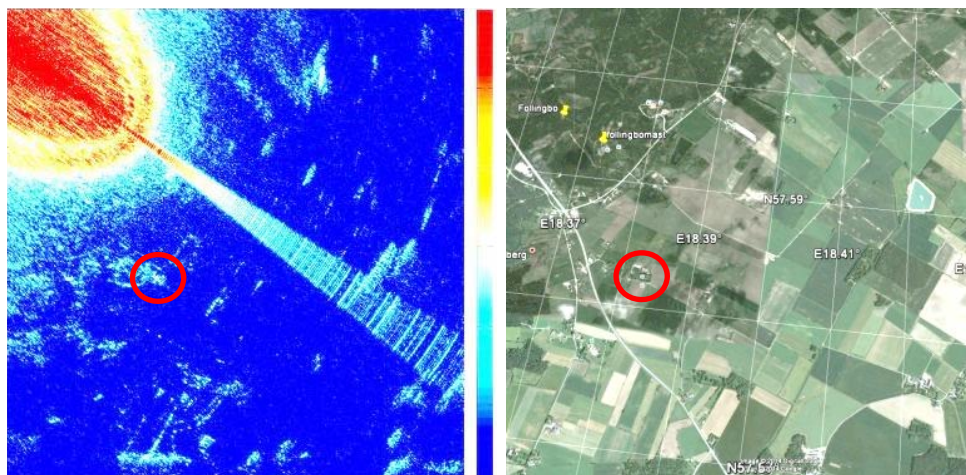


Figur 3-4. Till vänster visas passiv radaravbildning i Krokeksområdet. Till höger visas en Google-bild som täcker samma område som SAR-bilden. Bildens storlek är 4.1 km x 4.1 km och sändaren är i centrum av bilden. Mottagarplattformen befinner sig ca 300 m utanför bilden i riktning mot sydväst, dvs. i förlängningen av sändarens sidolober.

Figur 3-5 visar passiv radaravbildning med data registrerade över Gotland nära TV-masten i Follingbo. I detta fall kan mer småskaliga strukturer ses jämfört med Krokeksbilden. De härstammar från små skogsdungar, hus, diken och enskilda träd. En stark reflektor i bilden är Follingbo kyrka.

I detta fall är mottagarplattformen på samma flyghöjd som för Krokeksfallet men på större avstånd (ca 15 km). Signalbehandlingen har i detta fall korrigerats med en förbättrad markhöjdsmodell, i syfte att öka integrationsvinsten över större variation i aspektvinkel. Integrationstiden är ca 13 s, vilket motsvarar en 2 km lång flygsträcka. Den teoretiska upplösningen i sida är högre jämfört med Krokeksbilden och är ca 5 m. Geometrin är även i detta fall osäker vilket gör att den teoretiska upplösningen inte kunnat uppnås.





Figur 3-5. Till vänster visas passiv radaravbildning som genererats med hjälp av TV-sändaren i Follingbo på Gotland. Avståndet är i detta fall betydligt längre till mottagarplattformen, ca 15 km från sändarmasten i nordvästlig riktning. Bildstorleken är 4.1 km x 4.1 km. Apertursträckan är 2 km och aspektvinkelskillnaden kan utläsas ur sidoloberna som strålar ut från sändarpositionen. Till höger visas motsvarande Google-bild över området. Skogskanter, staket, diken, träd och buskar är synliga i radaravbildningen. Follingbo kyrka är markerad med en röd ring och ger en mycket stark radarretur.

### 3.3 Framtida arbete

Resultaten är preliminära och baserade på försök med det befintliga LORA-systemet. Det är byggt som ett konventionellt pulsat SAR-system och har därmed en del begränsningar när det skall konfigureras för passiva mätningar. Resultaten visar dock att det är möjligt att utnyttja LORA:s mottagardel i kombination med DVB-T-signaler som parasiterande sändare där man saknar kännedom om signalmodulationen. Avbildningen av terrängen uppvisar stor likhet med vad en flygburen monostatisk SAR på samma frekvensband skulle ge. Resultatets kvalitet beror delvis på använda geometrier under avbildningen, varför inverkan av geometri på kvalitet behöver studeras ytterligare för att kunna optimera den egna plattformens flyglöpor relativt fasta sändare.

Då fasta markmål är synliga men inte optimalt fokuserade är det naturligt att tänka sig att förbättra bildkvaliteten med autofokusmetoder som en del i vidareutvecklingen av signalbehandling för passiv SAR. I en förlängning kan även rörliga mål komma att kunna fokuseras med liknade tekniker. De redan gjorda passiva SAR-registreringarna innehåller fler antennkanaler som t.ex. kan utnyttjas för att dämpa klotter eller, alternativt, öka signalbrusförhållandet. En avkodning av DVB-T-signalen skulle också kunna göras för att få fram en renare referenssignal från sändaren och på så sätt öka signalbrusförhållandet och förbättra bildkvaliteten. Framtida arbeten bör också analysera räckvidder och förväntade prestanda för olika tänkbara scenarier. Eftersom vi får en stark direktsignal till den flygande plattformen så kan DVB-T-signalen även belysa flygande farkoster som därmed skulle kunna avbildas i ett luftspaningsscenario.

## 4 Försökssystem

Arbete med att ta fram en ny generation av radarsystem för experimentella mätningar har påbörjats. En ledstjärna har varit att utrustningen skall vara flexibel, för att enkelt kunna konfigureras för olika typer av radarregistrering. Systemspecifikationen har därför utgått från krav som definierats av tre olika tillämpningsfall som bedömts vara av intresse [21][23]:

- Scenario A: *Bistatisk SAR-mätning*. En typisk konfiguration är att sändaren befinner sig på stort avstånd från målområdet medan mottagaren är passiv och opererar på kort avstånd. I en militär hotsituation skyddas sändaren av det större avståndet och mottagaren av att den är radiotyst. Inledningsvis är målsättningen att mottagarsystemet skall kunna konfigureras att registrera bistatiskt data på VHF-bandet (flygburet) eller S-bandet (markfast).
- Scenario B: *SAR-mätningar med LORA NG* ("Next Generation"), dvs. monostatisk, bistatisk eller passiv (icke-kooperativ) avbildning. Avsikten är i första hand att kunna ersätta det nuvarande LORA-systemet och därmed säkerställa en förmåga att kunna mäta på låga frekvenser som stöd i frågeställningar rörande yttäckande markspaning eller målsignaturer. Med en modulär och flexibel designfilosofi underlättas vid behov uppgraderingar till mikrovågsbandet eller en utökning av antalet parallella mätkanaler för t.ex. polarimetriska registreringar.
- Scenario C: *Sjömätningar på S-band*. Scenariot är en land- eller fartygsbaserad radar avsedd för upptäckt av små sjömål på havsytan. Systemet ska klara koherent dopplertfiltrering i kombination med stor bandbredd för både monostatiska och bistatiska mätgeometrier. Mottagarenheten i det sistnämnda fallet är tänkt att baseras på framtagna utrustning i scenario A.

Av de tre tillämpningsfallen har en utrustning för scenario A tagits fram inom projektet men har än så länge endast provats i fältexperiment på VHF-bandet. Systemet kallas CARINA [18][21].

Realisering av utrustning för scenario C sker inom FoT-projektet "Upptäckt av små sjömål på ytan". Systemet kallas MARINA-S och ett första fältexperiment med monostatisk mätgeometri i kustnära miljö har genomförts [39][40]. Systemutformningen för scenario B kommer att ha sin utgångspunkt i MARINA-S som, till skillnad från CARINA, inkluderar såväl sändare som mottagare. Den framtagna mottagarenheten i MARINA-S kan, till skillnad från dagens LORA-system, direkt sampla signalen (dvs. utan blandarsteg) på de aktuella delarna av VHF- och UHF-banden. Som ett flygburet system måste också aspekter kring regelverket fram till ett flyggodkännande beaktas under systemutformningen. Som ett sista led i denna process, ingår olika typer av markbundna samfunktionstester med övrig avionik på den plattform som installationen anpassats för.

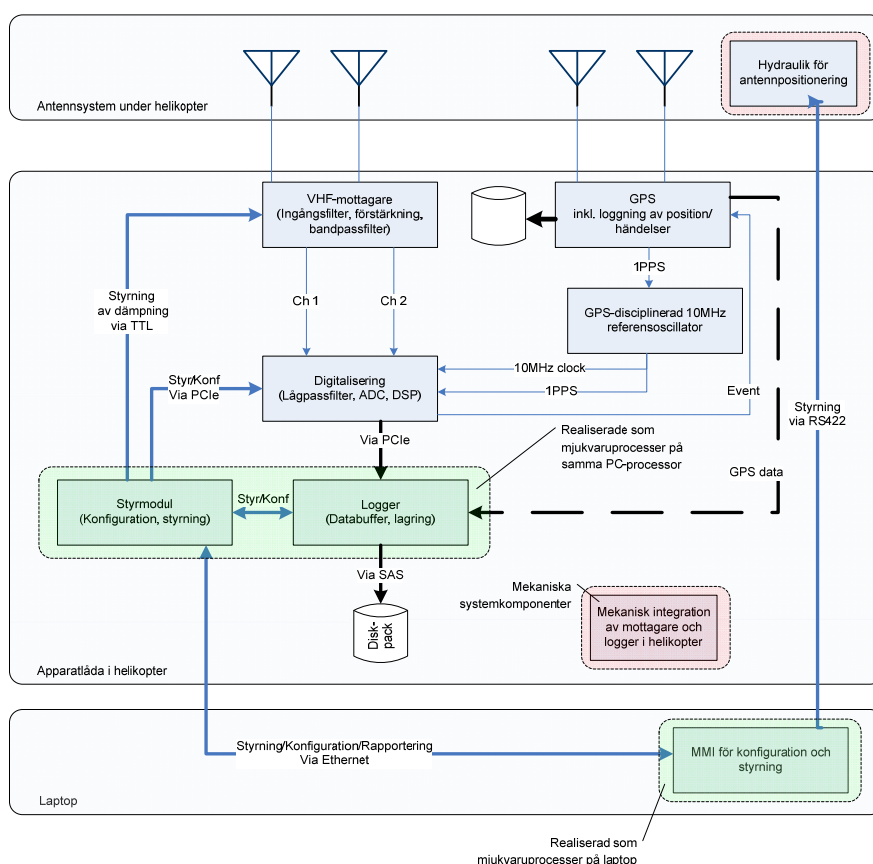
### 4.1 Systemöversikt CARINA

CARINA realiserar mottagardelen av ett bistatiskt radarmätsystem för VHF-bandet (25-85 MHz) och är avsett för montering i samma helikopter (Schweizer 300) som Saab använder för systemet CARABAS-3, se Figur 5-1. De horisontella antennerna som återfinns i samma figur utnyttjas vid mätningar med CARINA. Därmed kunde proceduren för ett flyggodkännande av CARINA avsevärt förenklas då den kunde hanteras som enbart en modifiering av en redan certifierad grundinstallation. I princip ersätts en apparatlåda inne i kabinen med en annan medan all övrig utrustning inklusive kablage tillhörande grundinstallationen bibehålls.

Systemskiss och blockschema för CARINA framgår av Figur 4-1. Systemet är försett med två egenutvecklade direktsamlade mottagarkanaler som är anslutna till vardera av de två

horisontella antennelementen under helikoptern. Mottagarens två kretskort (kanaler) omges av en aluminiumlåda för att förhindra störningar från omgivande komponenter, se Figur 4-2. Dämpning och variabel förstärkning kan kontrolleras för varje kanal. Data registreras med ett dynamiskt omfång motsvarande 14 bitar och med en samplingstakt på 250 MHz.

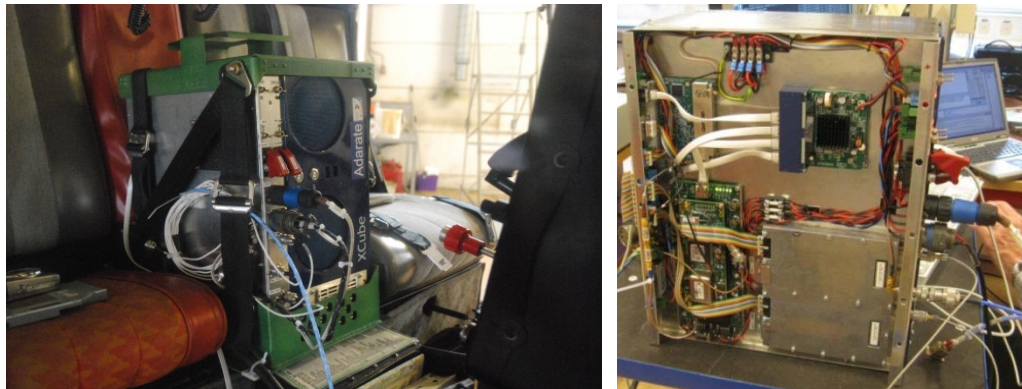
Den digitala dataströmmen lagras på en diskpack av halvledartyp med en total kapacitet på 4 TB. Även positionsangivelser från navigationssystemet, liksom annan statusinformation från radar- och GPS-enheterna, lagras tidsmarkerat på disken för att kunna knytas till motsvarande information hos den sändande plattformen och få en korrekt synkronisering av alla händelsestillstånd vid den bistatiska bildgenereringen. Ett elektronikkort med FPGA-kretsar realiserar logik för radarstyrning. En kraftfull Linux-dator har som uppgift att kontrollera FPGA-kortet och överföra insamlade digitala data till en utbytbar diskpacke där en maximal dataöverföringshastighet på omkring 1.5 GB/s kan uppnås.



Figur 4-1. Systemblockschema för CARINA [21]. Blockschemat visar funktionsblock och realisering i hårdvara eller mjukvara (grön bakgrund). Systemets delar är monterade på tre platser i helikoptern: som last under helikoptern (antennsystem, frånsett GPS-antennerna på stjärtbommen), mellan sätena inne i kabinen (apparatlåda) eller vid radaroperatören (operatörskonsol på en laptop). Mekaniska funktionsblock är markerade med rödaktig bakgrund. Kraftmatningen för de olika delsystemen visas inte i blockschemat.

Efter färdigställande genomgick CARINA en rad prestandamätningar i labb för att verifiera specifikationer som den utformats och konstruerats för att uppfylla. Därefter inleddes försök med bistatiska registreringar. Även i detta fall skedde de första proven i labbmiljö med CARINA och LORA separerade från varandra, där LORA:s sändsignal injicerades i CARINA:s mottagare via en kabel. I övrigt arbetade de två enheterna åtskilt för att möjliggöra kontroll av att den valda lösningen för synkronisering baserat på 1PPS-signal och en GPS-styrd referensoscillator, gav tillräckligt bra tids- och fasstabilitet. Detta

är nödvändigt för att möjliggöra koherent bearbetning av bistatiskt SAR-data under typiska mätsekvenser. Detta mätprogram upprepades sedan på marken med utrustningen i respektive flygburen plattform för att säkerställa att installationsarbetet, inklusive den nya elektromagnetiska omgivningsmiljön, inte förändrar de goda resultat som uppnåts. Därefter kunde de första flygburna bistatiska SAR-mätningarna på VHF-bandet inledas och som finns beskrivet i avsnitt 2.



Figur 4-2. Vänstra bilden visar apparatlådan för CARINA när den installerats mellan sätena inne i kabinen i på en helikopter av typen Schweizer 300. Vid sidan av strömförsörjning samt anslutningar till en laptop hos radaroperatören sittande till vänster går övrigt kablage från CARINA till externa enheter såsom radarantennerna, GPS-antennerna samt drivning och hydraulisk styrning av antennsystemet. Den högra bilden visar den del av apparatlådan där de två mottagarna är monterade, inneslutna i en aluminiumlåda i nedre högra delen. Till vänster om lådan är ett kretskort monterat som innehåller den GPS-mottagare från vilken 1PPS-signalen extraheras liksom den av GPS-systemet stabiliserade referensoscillator på 10 MHz som all signalgenerering i CARINA utgår ifrån. Motsvarande kretskort finns installerat i den sändande utrustningen vid bistatiska mätningar för att möjliggöra synkroniseringen mellan de separerade plattformarna.

## 4.2 Framtida arbete

Målsättningen att även genomföra ett markbundet bistatiskt experiment med MARINA-S och en omkonfigurerad CARINA (CARINA-S) kunde inte uppnås. Anledningen till detta är förseningar i leveranser av ingående nyckelkomponenter i de två systemen. Under fjärde kvartalet 2014 har dock de sista delarna kunnat integreras. Inledande bistatiska mätningar på S-bandet är nu möjliga att genomföra, företrädesvis initialt i labbmiljö och därefter i marina radarexperiment.



## 5 Internationella samarbeten

### 5.1 SIMCLAIRS

SIMCLAIRS ("Studies for Integrated Multifunction Compact Lightweight Airborne Radars and Systems") var ett fyraårigt EDA-projekt. Projektet startade våren 2009 och genomfördes av ett trilateralt industrikonsortium bestående av Thales Systèmes Aéroportés (Frankrike), Saab AB (Sverige), SELEX Sensors & Airborne Systems Ltd (UK) samt Thales UK Ltd (UK). FOI har varit associerad medlem till konsortiet och deltog i projektet såsom partner till Saab och har endast deltagit i 2 av 5 tekniska domäner. Finansieringen för FOI:s medverkan under de fyra åren har reglerats genom avsedda medel från såväl FoT-projekten "Bistatisk och passiv radar" som "Bistatisk SAR för urban miljö" vilket avslutades 2011.

Målsättningen med SIMCLAIRS var att utveckla teknologier för radiofrekventa system på små obemannade flygfarkoster. Projektet var inriktat mot SAR, MTI<sup>10</sup>, FOPEN<sup>11</sup> samt ESM<sup>12</sup>. De tre förstnämnda är radarmoder för högupplösande markspaning från flygande plattformar medan det sistnämnda är en telekrigsfunktion.

FOI:s fokus inom SIMCLAIRS har varit framtagning av systemkrav och verifiering av CARABAS-3, som är Saabs helikopterburna SAR-system på VHF- och UHF-banden [41]. Inledningsvis genomfördes experimentella markprov med detta SAR-system monterat på en rälsbunden vagn som finns på taket till ett av FOI:s byggnader i Linköping [25]. Det första flygprovet med systemet installerat i helikopter genomfördes under hösten 2011 som den avslutande delen i certifieringsarbetet fram till ett flyggodkännande. Figur 5-1 visar ett foto taget vid det tillfället. Därefter påbörjades tillsammans med Saab planering och genomförande av helikopterburna försök i syfte att samla in SAR-data anpassade för analysarbete inom tre delområden:

- Verifiering av SAR-registrering med CARABAS-3 i helikopterburna mod. Under ett antal mätkampanjer har ett och samma markområde, nordost om Linköping vid Roxens södra strand, avbildats där olika typer av kalibreringsmål funnits utplacerade. Syftet har varit att möjliggöra uppskattningar av systemspecifika prestandamått.
- Försök med inriktning mot detektion av fordon i skogsbeklädd terräng, dvs den tillämpning som brukar benämnas FOPEN. Datainsamlingen genomfördes i detta fall nära FOI:s utomhusmätplats Lilla Gåra sydväst om Linköping. Ett antal olika fordonstyper placerades ut i skydd av skog med olika täthet liksom olika dominerande trädslag. Genom att byta positioner mellan skilda mättillfällen är det också möjligt att jämföra SAR-bilder med respektive utan fordon på en viss plats och därmed kunna utvärdera förändringsdetektion som en metod att öka upptäcktssannolikheten.
- En första inledande försöksomgång för att studera potentialen hos lågfrekvent SAR för detektion av underjordsmål. Ett mindre grustag vid Skuggebo sydväst om Lilla Gåra användes som mätplats, där ett antal SAR-registreringar gjordes innan några objekt grävts ner. Mätprogrammet upprepades sedan, efter att olika objekt placerats under markytan. Syftet var att använda förändringsdetektion för att detektera de svaga returerna som förväntades från dessa underjordsmål.

För den omfattande gemensamma verksamheten i direkt anslutning till prov och försök har FOI även haft en kompletterande separat beställning från Saab. FOI:s del inom SIMCLAIRS som rör analysarbetet av insamlat SAR-data under de olika mätkampanjerna

<sup>10</sup> MTI = "Moving Target Indicator, dvs. hastighetsfiltrering.

<sup>11</sup> FOPEN = FOIage PENetration

<sup>12</sup> ESM = Electronic Support Measures

med CARABAS-3 har rapporterats [26]. En sammanfattande översikt av FOI:s verksamhet under alla fyra åren med SIMCLAIRS finns redovisat [27]. Förutom arbetet med CARABAS-3 så har projektet gett FOI insyn i nya teknologier och delsystem, speciellt då bredbandiga komponenter såsom antenner, GaN-komponenter och snabba AD-omvandlare. Saab har nyligen publicerat de första preliminära resultaten kring detektion av underjordsmål baserade på mätningar gjorda efter att SIMCLAIRS avslutats [42].



Figur 5-1. Saabs SAR-system CARABAS-3 installerat på helikopter Schweizer 300 tillhörande Malmskogens Aerocenter AB. Antennsystemet fälls ner av radaroperatören efter start och återförs i parkeringsläge inför landning. Den sistnämnda positionen intas även automatiskt i händelse av spänningsbortfall. De två horisontella antennelementen utnyttjas vid mätningar på det lägre frekvensbandet och kan programmeras att samverka så att radarbelysning och mottagning kan styras mot höger eller vänster sida om helikoptern. För det högre frekvensbandet finns identiska antennelement på båda stödbenen och val av sida görs i detta fall genom att operatören aktiverar aktuell antenn. (Foto: Saab / Stefan Kalm).

Inom SIMCLAIRS har också ingått två öppna forskningsutlysningar där utvalda projekt från den första utlysningen startade under 2010 och från den andra under 2011. FOI medverkade och fick finansiering baserat på ett inlämnat förslag i samband med den första omgången. Arbetet har bedrivits som ett separat projekt under perioden 2010-2012 tillsammans med Chalmers och University of Bristol. Verksamheten har varit inriktad mot vågformer och signalbehandling för frekvenssamverkan mellan radar och kommunikation.

## 5.2 NATO SET-186 APRA

NATO SET-186, Airborne Passive Radars and their Applications (APRA), pågår 2012-2014. Syftet är att identifiera utmaningarna för flyg- eller rymdbaserade passiva radarsystem, både vad det gäller hårdvara och signalbehandling. Identifiering av användarkrav och utvärdering av föreslagna implementeringar med avseende på prestanda och användbarhet är en del av arbetet. De länder som är representerade i NATO SET-186 är Belgien, Frankrike, Italien, Polen, Portugal, Storbritannien, Sverige, Tjeckien, Turkiet och USA. Arbetet under de tre åren ska sammanfattas i en slutrapport.

Olika frågeställningar har studerats under arbetets gång vilka stimulerats av att gruppens medlemmar har stor bredd med både teknisk och militär bakgrund. Stor bredd är det också avseende de möjliga sändarsignaler som studeras, t.ex. radio, TV eller radar från såväl markbundna som satellitbaserade sändare. Arbetet har huvudsakligen varit inriktat på att utbyta information kring pågående forskningsverksamhet.

Gruppen har genomfört åtta möten, det senaste 17-18 november 2014 i Linköping.

NATO SET-186 närmar sig slutrapportering som ska vara färdig under första kvartalet 2015. Diskussion har förts om gruppens eventuella fortsättning men inget beslut har dock ännu tagits.

## 5.3 AIRBEAM

AIRBEAM är ett europeiskt projekt som beviljats medel inom EUs sjunde ramprogram för utveckling inom forskning och teknik (EU FP7). Projektets mål är att kombinera olika sensorer på skilda plattformstyper och visa på mervärden som kan uppnås för att skapa en förbättrad lägesbild vid naturkatastrofer i Europa. Bland scenarier finns skogsbränder, översvämningar, stormar och snöoväder men även gränsövervakning eller allvarligare industriutsläpp ingår som möjliga tillämpningar. Projektet AIRBEAM startade i januari 2012 och skall pågå under fyra år.

FOI är en part inom AIRBEAM och medverkar i fem av totalt tjugoåtta arbetspaket. FoT-projektet "Bistatisk och passiv radar" har medfinansierat FOI:s aktiviteter i det arbetspaket som har rubriken "Radar" och som dessutom leds av FOI. Under 2013 redovisades en milstolpe inom detta arbetspaket i form av en rapport där olika radarsensorer lämpliga för AIRBEAM har identifierats och finns översiktligt beskrivna [28].

Under 2014 har arbetet varit fokuserat på att identifiera lämpligt data som skall kunna användas under 2015 i arbetet med arbetspaketet som har rubriken "Ground simulation validation exercises". Datamängden skall vara registrerad med FOI:s lågfrekventa SAR system CARABAS-II eller LORA men, av kostnadsskäl, vara insamlat i samband med andra verksamheter än AIRBEAM. Tillämpningen som skall belysas med den aktuella datamängden rör storskaliga stormskador på skog. Som användare av resultat medverkar därför svenska Skogstyrelsen i det kommande arbetspaketet. Möjliga synergieffekter med registrerat SAR-data över aktuell markscen från någon av de senast uppskjutna radarsatelliterna, alternativt som är under projektering, kommer också att redovisas.

## 6 Publikationslista 2012-2014

### 6.1 Vetenskapliga artiklar (peer-review)

- [1] P.-O. Frölind, A. Gustavsson, M. Lundberg, and L.M.H. Ulander, "Circular aperture VHF-band synthetic aperture radar for detection of vehicles in forest concealment," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 50, no. 4, pp. 1329-1339, 2012.
- [2] T.K. Sjögren, V.T. Vu, M.I. Pettersson, A. Gustavsson, and L.M.H. Ulander, "Moving target relative speed estimation and refocusing in synthetic aperture radar images," *IEEE Transactions of Aerospace and Electronic Systems*, vol. 48, no. 3, pp. 2426-2436, 2012.
- [3] V.T. Vu, T.K. Sjögren, and M.I. Pettersson, "Phase error calculation for fast time-domain bistatic SAR algorithms," *IEEE Transactions of Aerospace and Electronic Systems*, vol. 49, no. 1, pp. 631-639, 2013.
- [4] V.T. Vu, T.K. Sjögren, and M.I. Pettersson, "Fast time-domain algorithms for UWB bistatic SAR processing," *IEEE Transactions of Aerospace and Electronic Systems*, vol. 49, no. 3, pp. 1982-1994, 2013.
- [5] T.K. Sjögren, V.T. Vu, M.I. Pettersson, F. Wang, D.J.G. Murdin, A. Gustavsson, and L.M.H. Ulander, "Suppression of clutter in multichannel SAR GMTI," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 52, no. 7, pp. 4005-4013, 2014.
- [6] V.T. Vu, T.K. Sjögren, and M.I. Pettersson, "Two-dimensional spectrum for BiSAR derivation based on Lagrange inversion theorem," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 11, no. 7, pp. 1210-1214, 2014.

### 6.2 Konferensartiklar

- [7] L.M.H. Ulander, B. Flood, P.-O. Frölind, A. Gustavsson, T. Jonsson, B. Larsson, D. Murdin, R. Ragnarsson, G. Stenström, R. Baqué, H. Cantalloube, P. Dreuillet, and O. Ruault du Plessis, "Suppression of clutter in bistatic VHF/UHF-band synthetic aperture radar," *Proc. RVK 2012*, Stockholm, Sweden, 6 March 2012, 1 p., 2012.
- [8] L.M.H. Ulander, P.-O. Frölind, A. Gustavsson, and G. Stenström, "Bistatic P-band SAR signatures of forests and vehicles," *Proc. IGARSS 2012, IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Munich, Germany, 22-27 July 2012, pp. 311-314, 2012.
- [9] A. Gustavsson, L.M.H. Ulander, B. Flood, P.-O. Frölind, T. Jonsson, B. Larsson, D. Murdin, R. Ragnarsson, J. Rasmusson, and G. Stenström, "Low frequency bistatic SAR measurements," *Proc. IGARSS 2012, IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Munich, Germany, 22-27 July 2012, pp. 315-318, 2012.
- [10] P.-O. Frölind, L.M.H. Ulander, A. Gustavsson, and G. Stenström, "VHF/UHF-band SAR imaging using circular tracks," *Proc. IGARSS 2012, IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Munich, Germany, 22-27 July 2012, pp. 7409-7411, 2012.
- [11] L.M.H. Ulander, B. Flood, P.-O. Frölind, A. Gustavsson, T. Jonsson, B. Larsson, G. Stenström, R. Ragnarsson, R. Baque, O. Ruault Du Plessis, G. Bonin, H. Oriot, and P. Dreuillet, "Bistatic VHF/UHF-band airborne SAR experiment," *Proc. Radar 2012, International Conference on Radar Systems*, Glasgow, UK, 22-25 Oct 2012, 6 pp., 2012.

- [12] M.I. Pettersson, T.K. Sjögren, and V.T. Vu, "An evaluation on moving target parameter estimation using synthetic aperture radar systems," *Proc. APSAR 2013, 4th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar*, Tsukuba, Japan, 23-27 September 2013, 4 pp., 2013.
- [13] T.K. Sjögren, V.T. Vu, M.I. Pettersson, D. Murdin, A. Gustavsson, L.M.H. Ulander, and F. Wang, "Forest clutter suppression for moving target detection in UHF dual channel SAR," *Proc. APSAR 2013, 4th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar*, Tsukuba, Japan, 23-27 September 2013, 4 pp., 2013.
- [14] T.K. Sjögren and L.M.H. Ulander, "HUMSAR – The potential of human detection under forest," *Proc. TAMSEC 2013, 3rd National Symposium on Technology and Methodology for Security and Crisis Management*, Kista, Sweden, 13-14 November 2013, p. 11, 2013.
- [15] T.K. Sjögren, L.M.H. Ulander, P.-O. Frölind, A. Gustavsson, G. Stenström, and T. Jonsson "Detection of moving humans in UHF wideband SAR," *Proc. Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery XXI*, SPIE vol. 9093, Baltimore, MD, 5-9 May 2014, pp. 90930M-1 - 90930M-10, 2014.
- [16] T.K. Sjögren, A. Gustavsson, P.-O. Frölind, T. Jonsson, G. Stenström, and L.M.H. Ulander, "Experimental results for human detection in UHF UWB SAR," *Proc. EUSAR 2014, 10th European Conference on Synthetic Aperture Radar*, Berlin, Germany, 3-5 June 2014, pp. 678-681, 2014.
- [17] L.M.H. Ulander, "Impulse response function for ultra-wideband SAR," *Proc. EUSAR 2014, 10th European Conference on Synthetic Aperture Radar*, Berlin, Germany, 3-5 June 2014, pp. 798-801, 2014.
- [18] L.M.H. Ulander, A. Gustavsson, T. Jonsson, R. Ragnarsson, and G. Stenström, "Development of CARINA bistatic VHF-band SAR," *Proc. RADAR'14, International Radar Conference 2014*, Lille, France, 13-17 October, 2014, 4 pp., 2014.

### 6.3 Rapporter och Memon

- [19] A. Gustavsson, "Experimentplan 2012," FOI Memo 3938, 2012.
- [20] L. Ulander, "Redovisning av milstolpe kv2 2012 för projekt bistatisk och passiv radar (inom AF.9220407)," FOI Memo 4014, 2012.
- [21] R. Ragnarsson, L. Ulander, T. Jonsson, och G. Stenström, "Bistatiskt mätsystem för VHF-bandet, Systembeskrivning," FOI-DH--0079--SE, 2012.
- [22] L. Ulander, "Redovisning av milstolpe kv3 2012 för projekt bistatisk och passiv radar (inom AF.9220407)," FOI Memo 4107, 2012.
- [23] L. Ulander, T. Jonsson, B. Larsson, R. Ragnarsson, och G. Stenström, "Specifikation av radarsystem för VHF-, UHF-, och S-band," FOI-DH--0084--SE, 2012.
- [24] L.M.H. Ulander, P.-O. Frölind, och A. Gustavsson, "Bistatisk och passiv radar, Årsrapport 2012," FOI-R--3588--SE, 2012.
- [25] R. Ragnarsson, G. Stenström, T. Jonsson, L. Ulander, and A. Gustavsson, "Verification of the CARABAS 3 VHF radar system," FOI-RH--1318--SE, 2013.
- [26] M. Lundberg, P.-O. Frölind, A. Gustavsson, G. Stenström, and L. Ulander, "CARABAS-3 flights 2012. Description and evaluation of collected data," FOI-RH--1350--SE, 2013.
- [27] L. Ulander, "Slutsummering av FOI-medverkan i SIMCLAIRS," FOI Memo H 1309, 2013.

- [28] A. Gustafsson, A. Gustavsson, R. Malmqvist, C. Savarino, E. Williams, and L. Brooker, "Specification of radar sensors for AIRBEAM scenarios," 2013.
- [29] L. Ulander och A. Gustavsson, "Bistatisk och passiv radar, Årsrapport 2013," FOI Memo 4704, 2013.
- [30] L. Ulander, "Redovisning av milstolpe kv1 2014 för projekt bistatisk och passiv radar, Försvarmaktens ref.nr. - AF.9220409," FOI Memo 4973, 2014.

## 7 Referenser

- [31] L.M.H. Ulander, B. Andersson, S. Björklund, P. Follo, P.-O. Frölind, A. Gustavsson, G. Haapalahti, och A. Nelander, "Förstudie: Parasiterande och passiv radar," FOI-R--2015--SE, 2006.
- [32] D. Gromek, P. Samczyński, K. Kulpa, J. Misiurewicz, and A. Gromek, "Analysis of range migration and Doppler history for an airborne passive bistatic SAR radar," *Proc. IRS 2014, 15th International Radar Symposium*, Gdansk, Poland, 16-18 June 2014, 6 pp., 2014.
- [33] D. Gromek, P. Samczyński, K. Kulpa, P. Krysik, and M. Malanowski, "Initial results of passive SAR imaging using a DVB-T based airborne receiver," *Proc. EuRAD 2014, 11th European Radar Conference*, Rome, Italy, 8-10 October 2014, pp. 137-140, 2014.
- [34] L.M.H. Ulander, M. Lundberg, W. Pierson, and A. Gustavsson, "Change detection for low-frequency SAR ground surveillance," *IEE Proceedings Radar, Sonar and Navigation*, vol. 152, no. 6, pp. 413-420, 2005.
- [35] P.-O. Frölind, A. Gustavsson, M. Lundberg, and L.M.H. Ulander, "Circular aperture VHF-band synthetic aperture radar for detection of vehicles in forest concealment," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 50, no. 4, pp. 1329-1339, 2012.
- [36] L.M.H. Ulander, M. Blom, B. Flood, P. Follo, P.-O. Frölind, A. Gustavsson, T. Jonsson, B. Larsson, D. Murdin, M. Pettersson, U. Rääf, and G. Stenström, "The VHF/UHF-band LORA SAR and GMTI system," *Proc. Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery X*, Orlando, FL, 21-23 April 2003, SPIE vol. 5095, pp. 206-215, 2003.
- [37] L.M.H. Ulander, H. Hellsten, and G. Stenström, "Synthetic-aperture radar processing using fast factorised back-projection," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 39, no. 3, pp. 760-776, 2003.
- [38] [www.pts.se/upload/Rapporter/Radio/2008/Planeringslosning-for-marksand-digital-tv-vhf-PTS-er-2008-16.pdf](http://www.pts.se/upload/Rapporter/Radio/2008/Planeringslosning-for-marksand-digital-tv-vhf-PTS-er-2008-16.pdf) (tillgänglig 2014-11-17).
- [39] R. Ragnarsson, T. Jonsson, B. Larsson, G. Stenström, och L. Ulander, "Radarsystemet MARINA-S. Systembeskrivning," FOI-D--0485--SE, 2012.
- [40] R. Ragnarsson, O. Steinvall, F. Berglund, L. Allard, B. Larsson, och A. Haglund, "Upptäckt av små sjösmål på ytan, Slutrapport," FOI-R--4022--SE, 2014.
- [41] [http://www.saabgroup.com/Global/Documents%20and%20Images/Temporary\\_files/234-0450\\_Carabas\\_A4\\_6-Sid\\_K6.pdf](http://www.saabgroup.com/Global/Documents%20and%20Images/Temporary_files/234-0450_Carabas_A4_6-Sid_K6.pdf) (tillgänglig 2014-11-17).
- [42] H. Hellsten, S. Sahlin, and P. Dammert, "Polarimetric subsurface SAR imaging. Outcome of theoretical development and CARABAS III tests," *Proc. RADAR'14, International Radar Conference 2014*, Lille, France, 13-17 October, 2014, 8 pp., 2014.



FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1000 anställda varav ungefär 800 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömning av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot och hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.



FOI  
Totalförsvarets forskningsinstitut  
164 90 Stockholm

Tel: 08-55 50 30 00  
Fax: 08-55 50 31 00

[www.foi.se](http://www.foi.se)