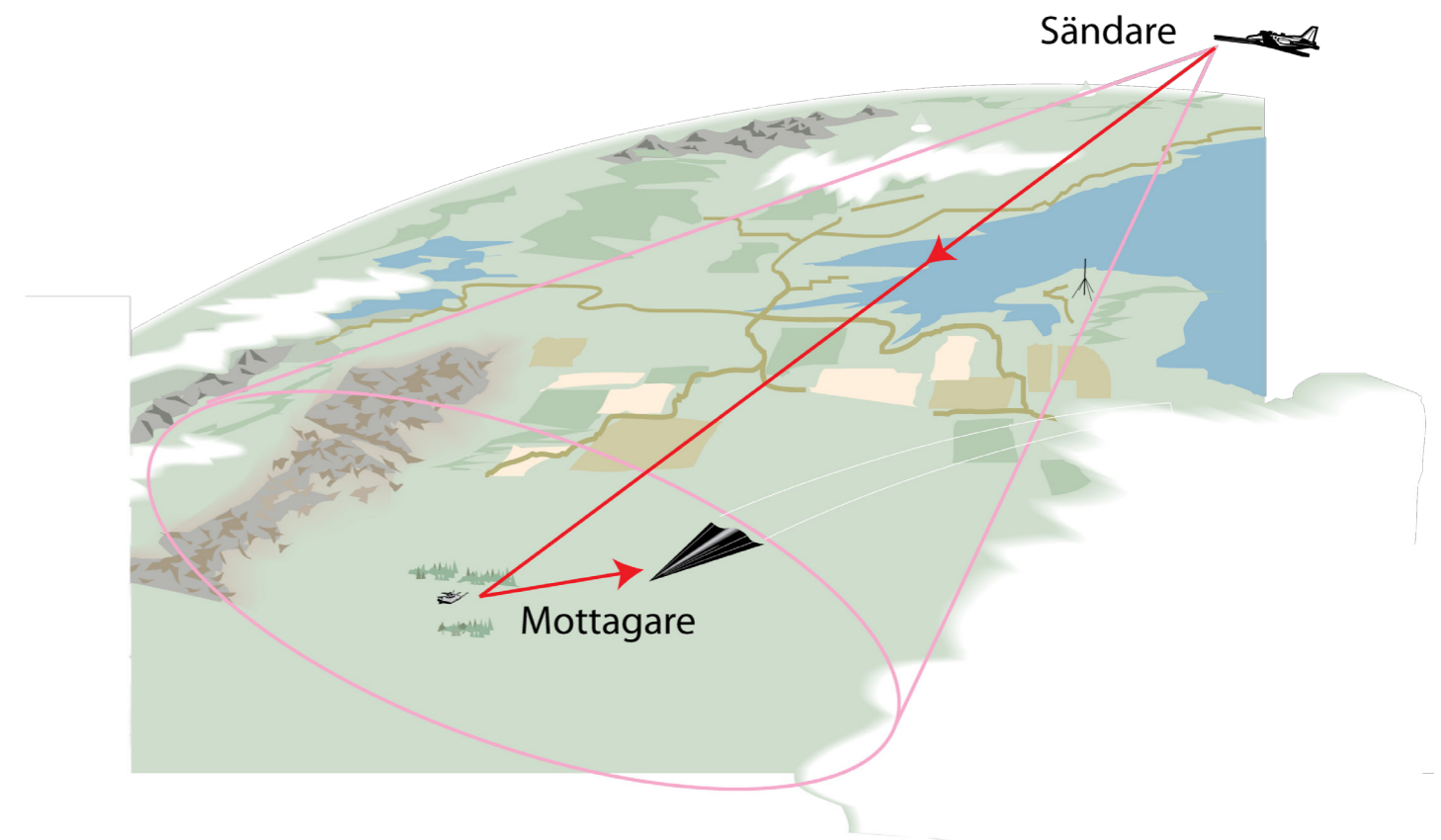


LARS ULANDER



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.

Lars Ulander

Bistatisk SAR för urban miljö

Slutrapport

| | |
|-------------------------|---|
| Titel | Bistatisk SAR för urban miljö, slutrapport |
| Title | Bistatic SAR for urban environments, final report |
| Rapportnr/Report no | FOI-R--3341--SE |
| Rapporttyp/ Report Type | Användarrapport / User report |
| Sidor/Pages | 21 p |
| Månad/Month | December |
| Utgivningsår/Year | 2011 |
| ISSN | ISSN 1650-1942 |
| Kund/Customer | FM |
| Projektnr/Project no | E53052 |
| Godkänd av/Approved by | Magnus Jändel |

| | |
|---|--------------------------------------|
| FOI, Totalförsvarets Forskningsinstitut | FOI, Swedish Defence Research Agency |
| Avdelningen för Informationssystem | Information Systems |
| Box 1165 | Box 1165 |
| 581 11 Linköping | SE-581 11 Linköping |

Sammanfattning

Forskningsprojektet *Bistatisk SAR för urban miljö* har under perioden 2009-2011 studerat och undersökt ett avbildande system för markspaning som bygger på två samverkande radarsystem med sändare och mottagare på olika plattformar. SAR ("Synthetic Aperture Radar") används för att generera högupplösande radarbilder av marken och har i projektet generaliserats till bistatiska geometrier.

Projektet har inom ramen för ett bilateralt samarbete med Frankrike utvecklat ett bistatiskt SAR-system och utvärderat det genom praktiska flygförsök med målspel på marken. Rapporten beskriver principerna bakom tekniken och hur den kan användas för markspaning. Både fördelar och nackdelar jämfört med konventionell (monostatisk) SAR-teknik diskuteras. En fördel med bistatisk SAR är att mottagaren är passiv vilket reducerar risken att bli upptäckt och utsatt för motåtgärder. Sändaren, däremot, är utsatt för denna risk men kan placeras på stort avstånd från målområdet. En nackdel med bistatisk SAR som påpekas är att systemet kräver koordinering och synkronisering mellan ingående plattformar vilket måste bemästras i ett operativt sammanhang.

Ett viktigt forskningsresultat från projektet är att vi har visat att bistatisk geometri kan utnyttjas för att underlätta målupptäckt. Rapporten ger exempel från urban och skogsklädd terräng.

I samarbete med industrin har projektet deltagit i en inledande utveckling av ett radarsystem avsedd för en liten helikopter. Radarsystemet har verifierats på mark och med flygprov. En vidareutveckling av systemet skulle göra det lämpligt som mottagare i ett bistatiskt system.

Rapporten diskuterar slutligen behov av framtida forskning inom bistatisk radar med tillämpning på mark-, sjö- och luftspaning.

Nyckelord: radar, SAR, bistatisk, markspaning

Summary

The research project *Bistatic SAR for urban environments* has studied and investigated an imaging radar system for ground surveillance during 2009-2011. The system is based on using two separated platforms, one for transmission and one for reception. SAR ("Synthetic Aperture Radar") is used for generating high-resolution radar images of the ground which has been generalised in the project to bistatic geometries.

The project has, in a bilateral research cooperation with France, developed and evaluated bistatic SAR through airborne experiments with ground target deployments. The report describes the principles of the system and how it can be used for ground surveillance. Both advantages and disadvantages compared to conventional (monostatic) SAR are discussed. An advantage of bistatic SAR is that the receiver is passive which reduces the risk of being detected and subject to counter measures. The transmitter, however, is subject to such risk but it can be moved away and positioned at a large distance from the theatre. A disadvantage with bistatic SAR which is pointed out is that coordination and synchronisation between platforms is required and must be handled in an operational scenario.

An important research result is that we have been able to show that the bistatic geometry can be used to improve ground target detection. Examples in the report are given for urban and forest-covered terrain.

The project has participated in an initial development of a radar system for a small helicopter together with industry. The radar has been verified on the ground and during flight tests. A further development of the system would make it suitable as a receiver in a bistatic system.

The report also discusses the need for future research within the area of bistatic radar with applications to ground, sea and air surveillance.

Keywords: Radar, SAR, bistatic, ground surveillance

Innehållsförteckning

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Sammanfattande resultat | 7 |
| 2 | Marklägesbild | 9 |
| 3 | Bistatisk radar | 11 |
| 4 | Bistatisk SAR | 12 |
| 5 | Lågfrekvent bistatisk SAR | 13 |
| 6 | Experimentell utvärdering | 15 |
| 7 | Diskussion och slutsatser | 17 |
| 8 | Referenser | 18 |
| | Appendix: Aktiviteter inom SIMCLAIRS 2009-2011 | 21 |

1 Sammanfattande resultat

Inom projektet *Bistatisk SAR för urban miljö* har vi under tre år studerat och undersökt en alternativ form av radar för högupplösande markspaning som bygger på två samverkande system. Större delen av projektet har genomförts inom ett bilateralt forsknings-samarbete med Frankrike [29] där vi utvecklat och testat ett bistatiskt SAR-system på två flygplan. Systemet provades och utvärderades under ett gemensamt flygförsök hösten 2010 över ett område i Kvarn norr om Linköping. Vi har även deltagit i ett annat internationellt samarbete tillsammans med industrier i Sverige, Frankrike och Storbritannien [22]. Det har resulterat i en radar för en liten helikopter som är en lämplig plattform för en mottagare i ett bistatiskt system.

Slutrapporten har som syfte att sammanfatta forskningsresultaten ur ett användarperspektiv. Fokus ligger på resultat framkomna under samarbetet med Frankrike [1][5][12][13][15]. Resultaten från samarbetet kring helikopterradarn sammanfattas separat i Appendix. En publiceringslista återfinns också i kapitel 8.

Bistatisk radar skiljer sig från monostatisk radar genom att sändare och mottagare är placerade på separerade plattformar. Fördelen med detta arrangemang är att mottagaren inte sänder röjande radarsignaler vilket minimerar risken att bli upptäckt av signalspaning och därmed utsatt för motmedel. Hotbilden mot sändaren kan reduceras i ett bistatiskt system genom att flytta den längre bort från intresseområdet. Man kan till och med tänka sig att sändaren placeras i en satellit som ligger i omloppsbanan kring jorden på hög höjd. Längre avstånd till sändaren innebär dock att mottagaren måste flyttas närmare målområdet för att undvika försämrade resultat. Ett kortare avstånd från mottagaren till målområdet kan dock förmodligen accepteras i många fall eftersom den är passiv och inte sänder. Ytterligare en fördel är att ”exponeringstiden” minskar på kortare avstånd, d.v.s. den tid det tar att samla in tillräckligt med radarekon för att generera en SAR-bild (se vidare i nästa stycke).

SAR (”Synthetic Aperture Radar”) är en teknik för att alstra högupplösande radarbilder för markspaning. Den bygger på principen att sända ut radarsignaler och ta emot radarekon med en antenn som förflyttar sig utefter en bana. Effekten blir att samma mål kommer att registreras många gånger och med olika geometri p.g.a. antennens förflyttning. Tiden som antennen belyser ett visst mål kallas integrationstid och motsvarar exponeringstiden i en vanlig kamera. En högupplöst SAR-bild skapas sedan med datoralgoritmer som liknar de som används för tomografi i medicinska tillämpningar. Resultatet blir en radarbild där målen kan detekteras förutsatt att deras signatur avviker tillräckligt mycket från omgivningen. En viktig egenskap är upplösningen i SAR-bilden d.v.s. den minsta separation som krävs för att två mål ska kunna särskiljas. Upplösningen begränsas tvärs flygriktningen av radarsignalens bandbredd och i flygriktningen av våglängd och aperturvinkel, d.v.s. den vinkel som antennen sveper upp sedd från det avbildade målet.

I många fall är det radarekon från omgivande föremål, s.k. radarklotter, som sätter gränsen för vilka mål som detekteras. Mål med svagare radareko är därför svårare att detektera i förhållande till bakgrunden. Om målen flyttar på sig så kan man lättare upptäcka dem genom att upprepa samma SAR-avbildning flera gånger och subtrahera bilderna med varandra, s.k. förändringsdetektion. Nackdelen är att flera överflygningar är nödvändiga.

Bistatisk SAR innebär nya möjligheter jämfört med monostatisk SAR för att minska radarklotter i bilderna och därmed underlätta upptäckt av svaga mål. Vi har i projektet undersökt hur klotter från skogsklädd terräng och från byggnader i urban terräng påverkas av den bistatiska geometrin.

En av de största utmaningarna i projektet har varit att anpassa två befintliga monostatiska flygburna SAR-system så att de kan samverka bistatiskt och generera bistatiska SAR-bilder. Det är i teorin en enkel princip men betydligt svårare att åstadkomma i praktiken p.g.a. höga krav på stabilitet, dynamik och datatakt hos mottagaren.

Tre viktiga förutsättningar ska vara uppfyllda för att generera bistatiska SAR-bilder med hög kvalitet:

1. Den utsända vågformen består av radarpulser med *hög effekt* och vars frekvensinnehåll har *stor bandbredd* utan kraftiga variationer i amplitud. Denna egenskap hos vågformen minimerar bruset i SAR-bilderna.
2. *Positionen* av de två antennerna mäts kontinuerligt med hög noggrannhet och att sändarantennens position kan överföras till mottagaren eftersom den behövs för att generera SAR-bilder. Kommunikationen kan utformas på olika sätt, t.ex. genom att använda en skyddad länk med låg dataakt eller genom att överföra informationen med radiosignaler på det sätt som görs i GPS-systemet.
3. Sändaren och mottagaren har gemensam uppfattning om *tiden*, d.v.s. de har tillgång till samma tidsreferens. Det sätt som vi valt att använda i projektet bygger på att använda GPS-signaler som referens. För generering av SAR-bilder har dock noggrannheten inte visat sig vara tillräckligt bra utan vi har även registrerat direktsignalen från sändaren. Användningen av GPS-signaler är förmodligen inte acceptabelt i ett operativt system eftersom de är relativt lättstörda. Ett alternativt sätt vore därför att i ett operativt system enbart använda direktsignalen som synkronisering mellan sändaren och mottagaren. Detta är en viktig utmaning för framtida projekt.

Det är egentligen inte nödvändigt att synkronisera systemen enligt det valda sättet. Utan synkronisering måste dock mottagarna arbeta kontinuerligt med två antennpolarisationer. Detta är en möjlig lösning men kräver utveckling av mottagare och metoder för hantering av stora datamängder.

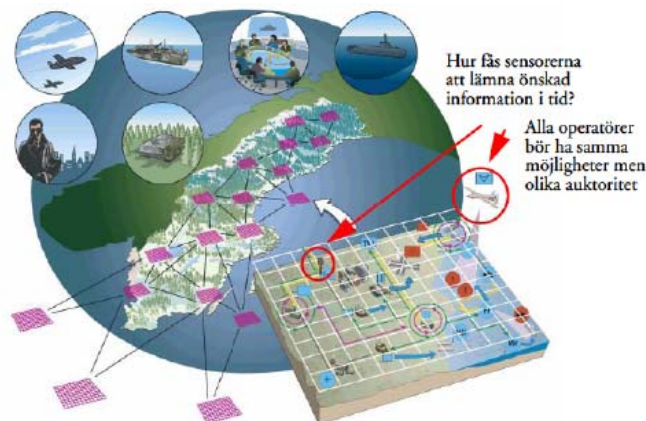
Projektet har gett värdefulla insikter hur ett bistatiskt SAR-system ska utformas i ett framtida operativt system samt vilka problem och prestanda som kan förväntas. Det hade inte varit möjligt utan det bilaterala samarbetet med Frankrike som möjliggjorde praktiska flygförsök med två SAR-system.

Resultaten pekar på att fortsatt forskning inom området är viktig om bistatisk radar ska kunna omsättas i framtida system. Ett viktigt område att studera är metoder för synkronisering av sändare och mottagare. Ett annat viktigt område är att utveckla och demonstrera system där mottagaren är placerad på en liten och billig plattform. Flera mottagare skulle också kunna samverka med samma sändare. Andra viktiga områden är att studera och undersöka möjligheterna med icke-kooperativ sändare samt utveckla metoder för samtidig upptäckt av rörliga mål.

Projektet har huvudsakligen varit inriktad på markspaning vilket främst är av intresse för armén. Framtida forskning bör breddas och inkludera tillämpningar även för marinen och flyget. Bistatisk radar öppnar intressanta möjligheter eftersom det är känt att målytan hos signaturanpassade (smygteknik) objekt ökar för lämpliga bistatiska geometrier vilket torde ge bättre förutsättningar för upptäckt och positionering.

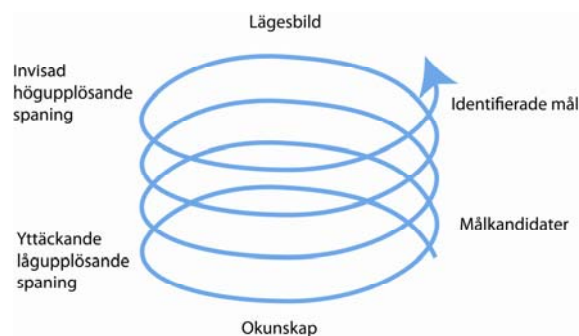
2 Marklägesbild

FOI har i ett antal tidigare projekt (se exempelvis [20][23][24]) studerat sensor- och ledningssystem för gemensamma lägesbilder. De exemplifierar den framtida beslutsprocessen från insamling av underrättelser till beslut. Med gemensam lägesbild avses att den underliggande informationen är gemensam. Sammanlagringen och presentation däremot beror på det sammanhang som informationen är avsedd för. I framtiden kommer sammanställningen av information att till stor del att skötas av datafusionssystem i ett distribuerat nätverk, se Figur 1. Datafusion kommer att behövas på olika nivåer inom beslutsprocessen, d.v.s. för att få fram beslutsunderlag för operativ ledning på divisions-/brigadnivå och ända ned till stridstaktiskt nivå. Även styrningen av sensorerna kommer förmodligen att utföras i nätverket.



Figur 1. Illustration av ett exempel på ledningssystem för gemensam lägesbild där många sensorer är anslutna till ett nätverk och där även sensorstyrningen sköts via nätverket. Bilden är hämtad från [23].

Önskemål om stor yttäckning, väderberoende, uthållighet, korta ledtider och liten felfrekvens ställer mycket stora krav på de ingående sensorerna. Det finns ingen sensortyp som enskilt klarar alla informationsbehov och olika typer kompletterar varandra [24]. Ett sätt att strukturera sensorsystemen är att organisera dem i nivåer med olika upplösning och med förmåga att kunna fokusera och växla mellan nivåer och olika sensorkombinationer. En organisationsmodell utgår från den s.k. informationsspiralen, se Figur 2, där den lägsta nivån består av sensorer som ger en grov bild över stora områden, följt av sensorer på högre nivåer med alltmer detaljer och där successivt mer tid läggs på allt mindre områden. Avvägningen mellan yttäckning och detaljinformation avgörs för varje insats beroende på behov och tillgängliga resurser.



Figur 2. Illustration av informationsspiralen från okunskap till lägesbild. På de lägre nivåerna återfinns väderberoende och uthålliga sensorer med stor yttäckningsförmåga medan de högre nivåerna består av invisade högupplösande sensorer. Notera att man kan ansluta till olika ställen på spiralen beroende på förkunskap och insatsens behov.

Hotbilden påverkar självklart också valet av sensortyper. En kvalificerad motståndare kommer att utnyttja olika metoder för att bekämpa eller minska möjligheterna till insamling av underrättelser, t.ex. genom att utnyttja elektronisk krigföring. I dessa situationer är det därför viktigt att minska risken för att våra system blir upptäckta av motståndaren.

I projektet "Bistatisk SAR för urban miljö" har fokus varit på att utveckla kunskap om och användning av bistatiska SAR-system som är en ny typ av sensor för markspaning. Denna sensortyp hamnar naturligen på de lägre nivåerna i informationsspiralen eftersom den i stor utsträckning är väderoberoende och har förmåga att täcka stora områden på kort tid. Förmågan till måligenkänning är dock begränsad.

SAR är en teknik som används för markspaning från en rörlig plattform och som typiskt producerar radarbilder med meter- eller dm-upplösning. Kännetecknade för tekniken är att den i princip är oberoende av väder och upplösningen är dessutom oberoende av avståndet mellan plattformen och det avbildade målområdet, d.v.s. samma bildupplösning kan erhållas från en rörlig plattform på marken, i luften från flygplan eller i rymden från satellit. En förutsättning för tekniken är att avbildade objekt är stilla under inmätningen. Rörliga objekt kan också avbildas men kräver speciell teknik för filtrering och fokusering [16].

SAR-tekniken med dess för- och nackdelar beskrivs mer detaljerat i avsnitt 4. En nackdel med radar, som är ett aktivt sensorsystem, är att signaler sänds ut från plattformen vilka kan uppsnappas av motståndarsidan och användas för att sätta in motmedel. Ett passivt sensorsystem vore därför önskvärt för att undgå upptäckt. Det finns för närvarande mycket få exempel på passiva radarsystem, d.v.s. radarmottagare som utnyttjar, parasiterar på, utsända radiosignaler avsedda för andra tjänster såsom kommunikation, TV och navigation [33]. Passiv radar har i dagsläget sämre prestanda än motsvarande aktiva. Ett mer närliggande alternativ är bistatisk radar, d.v.s. radarsystem som har sändare och mottagare separerade på olika plattformar. Fördelen med bistatisk radar jämfört med passiv radar är att sändsignalen kan utformas för optimala radarprestanda. Bistatisk radar beskrivs i avsnitt 3.

I projektet har vi studerat kombinationen av lågfrekvent SAR och bistatisk radar som öppnar nya tillämpningar och förmågor genom sina unika egenskaper. Förutom att minska sårbarheten i en hotsituation som nämnts ovan så ger lågfrekvent bistatisk SAR också nya möjligheter på andra sätt, t.ex. för att minska exponeringstiden och för att öka mål-bakgrund-kontrast. Detta diskuteras vidare i avsnitt 5.

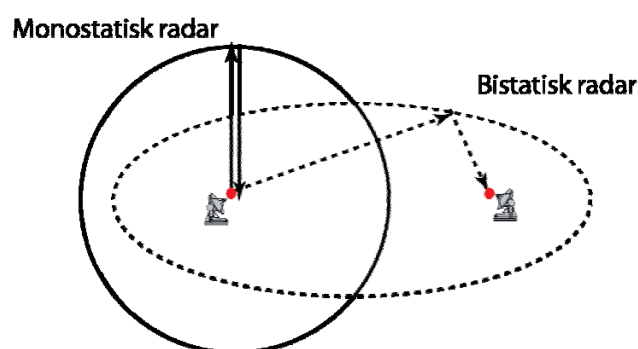
3 Bistatisk radar

Radar ("Radio detection and ranging") utvecklades för drygt sjuttio år sedan och är alltså en av de allra viktigaste militära teknologierna [28][36][37]. Redan i inledningsskedet av andra världskriget demonstrerades långräckviddig spaning med allväderkapacitet mot flygplan och därmed förmåga till tidig förvarning mot luftangrepp. Radar utvecklades snabbt under de kommande decennierna och är numera en omistlig del för militära operationer i alla arenor (mark, sjö, luft, och rymd).

Radarteknikens snabba genomslag startade omedelbart utveckling av motmedel. Elektronisk störning, signalsökande robotar och signaturanpassning är exempel på åtgärder som utvecklats genom åren. Nya radarmoder har också utvecklats som svar på motmedlen, t.ex. störtåliga vågformer, adaptiv sidlobsundertryckning och gruppantenner.

Monostatisk radar är den dominerade typen av radarteknik, d.v.s. där sändaren och mottagaren är placerade på samma plats och ofta utnyttjar samma antenn. Systemet sänder ut radarsignaler med hög effekt och tar emot det svaga radarekots från reflekterande objekt. Radarsignalen är ofta en kort puls vilket innebär att avståndet till ett objekt kan beräknas som tidsskillnaden mellan sändning och mottagning multiplicerat med halva ljushastigheten. Det reflekterande objektet kan därför anses befinna sig på en sfär med antennen i centrum (se Figur 3). Genom att använda en smal antennlob för att mäta vinkeln till radarekots kan sedan objektets position bestämmas.

I en *bistatisk radar*, däremot, är sändare och mottagare geometriskt separerade. På liknande sätt som för monostatisk radar kan objektets position bestämmas genom att kombinera tidsskillnaden mellan sändning och mottagning med riktning information från antennerna. Bistatisk radar har använts för speciella tillämpningar ända sedan radar togs i bruk. Det främsta skälet att använda bistatisk radar är att mottagaren är tyst och inte sänder ut radiosignaler. Ett annat viktigt skäl är att vikt och effektförbrukning minskar på mottagarplattformen. Ytterligare ett skäl att använda bistatisk radar är att radarmålytan ibland är högre för bistatiska geometrier jämfört med monostatiska. Exempel på befintliga operativa bistatiska radarsystem är semi-aktiv radar i målsökare, bistatisk radar för övervakning av rymden samt bistatisk SAR för jordobservation.

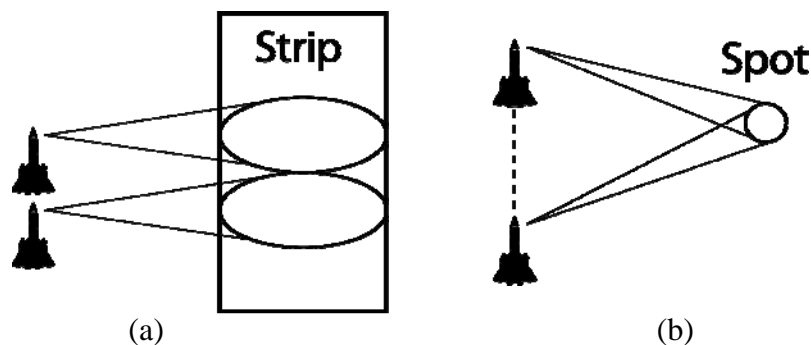


Figur 3. Illustration av mono- och bistatisk radar. Monostatisk radar sänder ut radarsignaler och tar emot ekot på samma plats, medan sändare och mottagare i en bistatisk radar är geometriskt åtskilda.

4 Bistatisk SAR

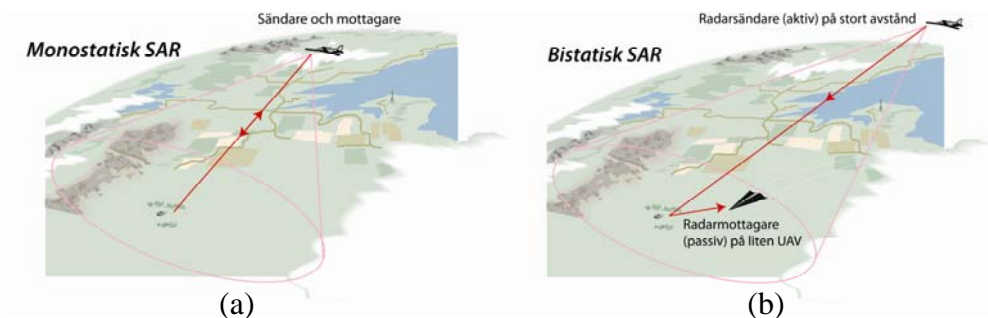
SAR är en teknik som utvecklades på 1950-talet för högupplösande markspaning [28]. Principen bygger på att låta en radar med liten antenn förflytta sig utefter en bana samtidigt som den sänder ut radarsignaler och tar emot radarekon. Ett reflekterande objekt kommer följaktligen att registreras åtskilliga gånger med varierande vinkel. Tiden som objektet finns registrerad i radardata kallas integrationstid och den totala vinkelförändringen kallas aperturvinkel. Radardata omvandlas till SAR-bilder genom speciella signalbehandlingsmetoder som är beräkningskrävande. På senare år har snabba och generella algoritmer utvecklats [30].

Upplösningen i SAR-bilden bestäms av signalens *bandbredd*, *våglängd* och *aperturvinkel* [28]. Tvärs flygbanan, radiell riktning, bestäms upplösningen av pulsens bredd som i sin tur begränsas av signalbandbredden. Längs flygbanan bestäms upplösningen av signalens våglängd dividerad med dubbla aperturvinkel. En konsekvens av detta är att upplösningen i en SAR-bild är oberoende av avståndet till det avbildade området, d.v.s. en SAR-bild från satellit ger samma upplösning som från ett flygplan. Förutsättningen är att satelliten måste förflytta sig en betydligt längre sträcka än flygplanet för att åstadkomma samma aperturvinkel. Idag finns SAR-system som kan avbilda marken från satellit eller flyg med en upplösning av ca 10 cm.



Figur 4. Illustration av SAR-principen för markspaning. En flygradar belyser ett markområde med radarsignaler och tar emot radarekon allteftersom plattformen rör sig utefter en bana. Radardata omvandlas till en SAR-bild av marken med hjälp av datoralgoritmer. Man brukar skilja på (a) fast antenn med kontinuerligt bildstråk, och (b) störrande antenn som ger begränsad bildyta.

SAR-tekniken kan också användas med bistatisk geometri för markspaning. Sändare och mottagare separeras då på olika plattformar som illustreras i Figur 5. För en militär tillämpning är det en fördel om sändaren placeras på stort avstånd från målområdet medan mottagaren kan flyga på kortare avstånd eftersom den är passiv och inte löper samma risk att bli upptäckt. Upplösningen i bistatisk SAR bestäms av andra men liknande parametrar jämfört med monostatisk SAR [32].



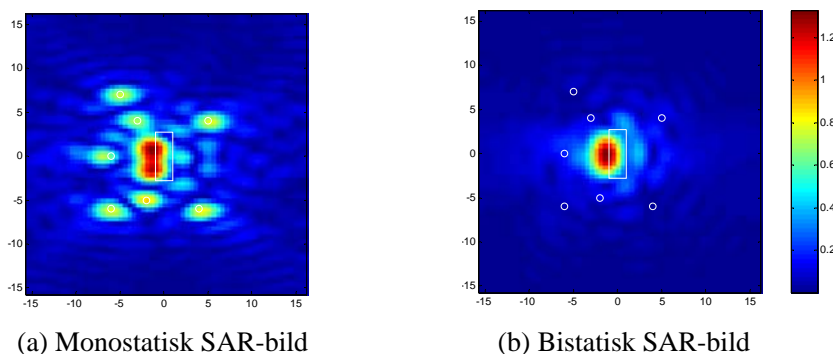
Figur 5. Illustration av (a) monostatisk och (b) bistatisk SAR. I (b) visas ett exempel där den passiva mottagaren (radiotyst) flyger nära målområdet medan den aktiva sändaren är placerad på stort avstånd för att undvika bekämpning.

5 Lågfrekvent bistatisk SAR

SAR-tekniken har använts inom ett mycket stort frekvensband, 20 MHz – 100 GHz eller från kortvåg till mm-vågor. Projektet har valt att studera relativt låga frekvenser eftersom målsättningen har varit att undersöka förmågan att upptäcka dolda mål i urban och i skogsklädd terräng. Tidigare forskning har visat att frekvenser under 1 GHz är lämpliga för dessa tillämpningar [18][21].

Flera studier har undersökt förmågan att upptäcka och positionera dolda mål i tät skog med monostatisk SAR. Slutsatsen är att bäst prestanda för större fordon, terrängbilar, fås inom frekvensbandet 20-90 MHz, medan frekvenser inom bandet 200-500 MHz ger bättre resultat för mindre objekt. För ännu högre frekvenser avtar förmågan att tränga in i skogen p.g.a. dämpning i vegetationen. Radarklottret från den omgivande skogen är relativt hög för monostatisk radar så att upptäcktsförmågan i en enskild SAR-bild är relativt begränsad. Klottret kan reduceras genom att subtrahera bilder tagna vid olika tidpunkter med resultatet att målförändringar upptäcks mycket lättare [11][14][35]. Nackdelen är givetvis att förändringsdetektion förutsätter flera överflygningar. En annan möjlighet är att flyga i en cirkel runt målområdet vilket normalt minskar klottret [4].

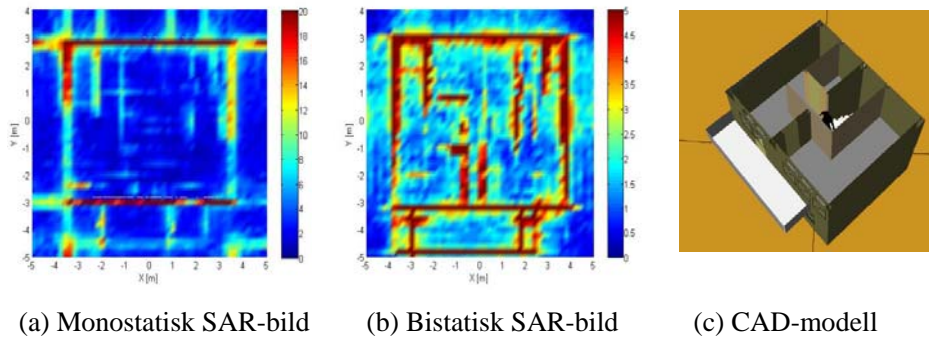
Vi har tidigare beskrivit en alternativ metod för att reducera skogsklotter genom att utnyttja lågfrekvent bistatisk SAR [34]. Idén bygger på att radarekot från ett träd på låga frekvenser ofta domineras av en hörnreflektion mellan marken och trädstammen. För monostatisk SAR ger den maximal reflektivitet när marken och stammen bildar en rät vinkel. I en bistatisk geometri där sändare och mottagare separerats med en elevationsvinkel så bryts symmetrin och hörnreflektionen avtar i styrka. Vi har demonstrerat effekten både i simuleringar, se Figur 6, och även i praktiska mätningar [10]. I projektet är det dock första gången som vi har studerat fenomenet i en bistatisk konfiguration med två flygburna SAR-system.



Figur 6. Simuleringar av (a) monostatisk och (b) bistatisk lågfrekvent SAR-bild av terrängbil, position enligt vit rektangel, omgiven av sju stycken träd, positionerade enligt de vita ringarna. Resultaten visar att radarekot från träden minskar genom att välja lämplig bistatisk geometri [34]. Frekvensband: 20-90 MHz, infallsvinkel: 60°, bistatisk elevationsvinkel: 20°. Positionsskalan på SAR-bilderna är graderade i meter och färgskalan är graderad i målyta (m²).

Endast ett fåtal studier i den öppna litteraturen har diskuterat möjligheten att avbilda byggnaders interiörer med SAR-teknik. Ett exempel är en amerikansk studie finansierad av DARPA [18]. FOI har tidigare studerat om bistatisk SAR kan användas för att förbättra avbildning av byggnaders interiörer på låga frekvenser [25]. En komplikation är att byggnader ofta har armeringsjärn i sin konstruktion vilket begränsar möjligheterna för radarvågen att tränga igenom. Beräkningar har dock visat att det trots allt finns goda möjligheter till penetration inom bandet 0.3-3 GHz för typiska strukturer [26][27]. För lägre frekvenser spärrar armeringsjärnet effektivt radiovågen och för högre frekvenser ökar successivt dämpningen i övrigt väggmaterial. Exempel på simuleringar av mono- och bistatiska SAR-bilder visas i Figur 7. Det bör noteras att penetrationsförmågan inte påverkas av om det är mono- eller bistatisk geometri. Däremot pekar simuleringarna på att

radarekot från de yttre husväggarna kan reduceras genom att välja lämplig bistatisk geometri och att därmed interiören med innerväggar blir lättare att urskilja. I projektet är det första gången som bistatiska SAR-försök genomförts för att studera möjligheterna att avbilda byggnaders interiörer.



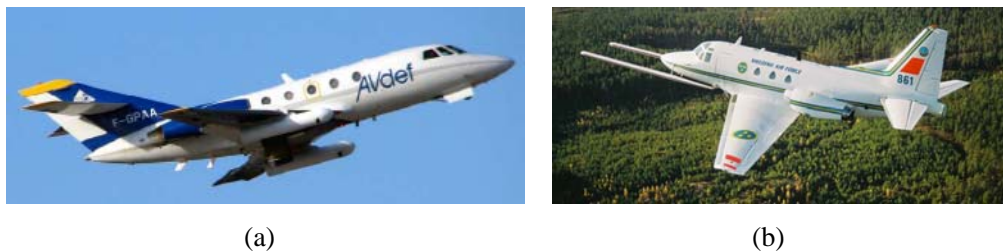
Figur 7. Simuleringar av (a) monostatisk och (b) bistatisk SAR-bild av en huskropp [25]. CAD-modellen av huset visas i (c). Frekvensband: 0.3-3 GHz, infallsvinkel: 60° , aperturvinkel: 30° (fyra ortogonala riktningar är sammanlagrade i bilderna).

6 Experimentell utvärdering

Utveckling av mätsystem

Genom ett bilateralt forskningssamarbete med Frankrike har ett bistatiskt SAR-system utvecklats och verifierats. Systemet är baserat på det franska radarsystemet SETHI [19], utvecklat av ONERA och installerat i Falcon 20, och det svenska radarsystemet LORA [31], utvecklat av FOI och installerat i FMV:s Saberliner. Systemet använder det gemensamma frekvensbandet 220-460 MHz.

En av de största utmaningarna i projektet har varit att utveckla en fungerande metod för synkronisering av de två radarsystemen. Båda systemen har därför upgraderats med nya oscillatorer som är faslåsta till GPS-systemets 1-PPS-signal ("1 pulse-per-second") [5]. Detta innebär i praktiken att de två radarsystemen är synkroniserade med samma tidsreferens. Fasdriften i oscillatorerna visade sig dock kräva korrektioner bildframställningen. Korrektionerna beräknades genom att mäta in direktsignalen från den sändande enheten i kombination med avståndet mellan flygplanen som beräknades från GPS-data. Ytterligare detaljer om simulering, uppdatering, anpassning och verifiering av systemen återfinns i [1][2][3][13][15].



Figur 8. De två flygplan som användes i bistatiska SAR-försök: (a) Franska Falcon 20 med radarantennerna integrerade i podar under vingarna, (b) FMV:s TP86 Saberliner med radarantennerna i bommarna på ömse sidor och framför nosen.

Resultat från flygförsök

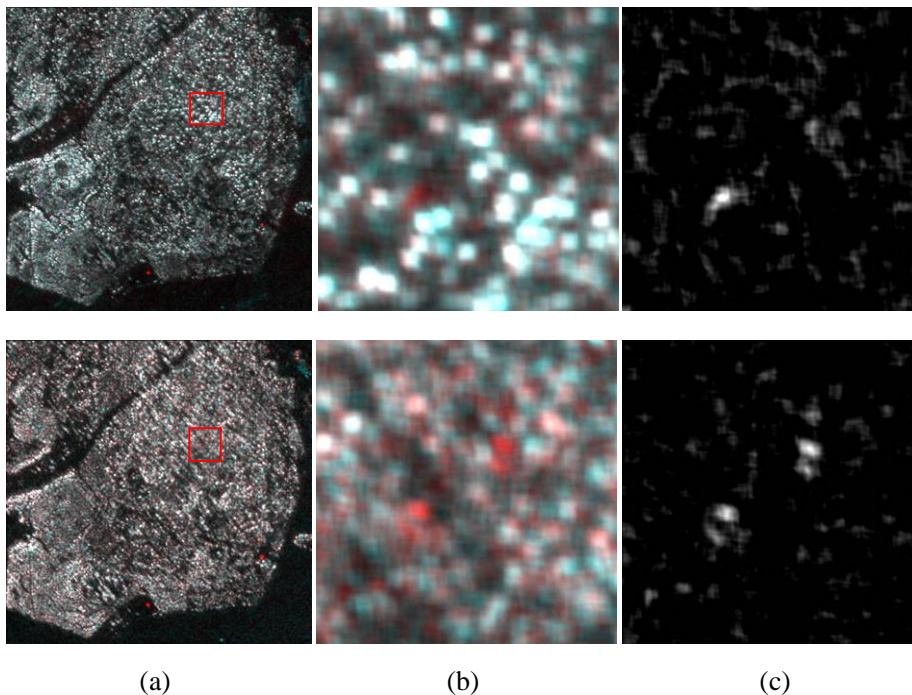
Två flygförsök genomfördes inom ramen för det bilaterala samarbetet, ett första flygtest 2009 [6] och en omfattande mätkampanj 2010 [8]. Resultaten från det första testet visade att bistatiska SAR-bilder kunde genereras [1]. Bildkvaliteten blev dock inte optimal vilket föranledde åtgärder [12].

Huvudområdet för mätkampanjen 2010 var Kvarn som ligger inom Prästtomta skjutfält ca 30 km nordväst om Linköping. Ett omfattande målspel hade förberetts inkluderande olika typer fordon på öppna fält och dolda i skog, stillastående och promenerande människor samt IED-atrappor ("Improvised Explosive Devices") [15]. Dessutom utnyttjades byggnader som var under uppförande i Kvarn för att träna strid i bebyggelse, SIB. Tyvärr visade sig SIB-området inte tillgängligt för att sätta ut egna målspel p.g.a. att byggnadsarbeten fortfarande pågick. Konsekvensen blev att utvärderingen av SAR-tekniken i urban terräng blev begränsad till några enstaka exempel.

Resultat från mätkampanjen 2010 beskrivs i [15] och vi nöjer oss här med att ge två illustrativa exempel. Det första är från målspelet med fordon dolda i tät skog och det andra är från område med byggnader.

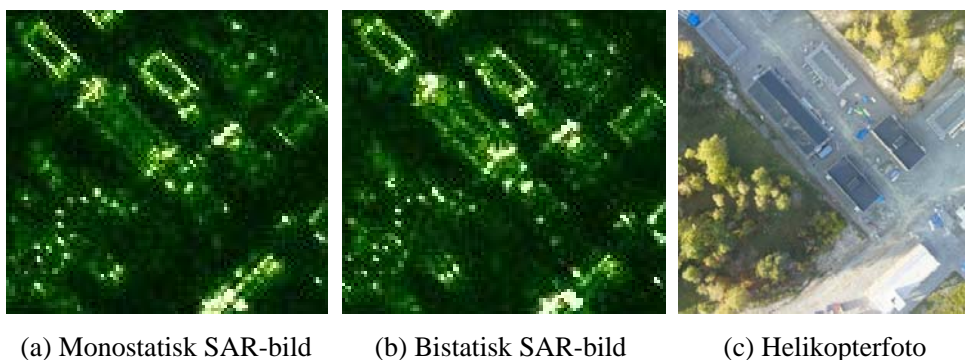
I Figur 9 visas ett exempel på hur ett område med två terrängbilar dolda i tät skog avbildas i monostatisk respektive bistatisk SAR. För att tydliggöra resultaten har två SAR-bilder från två olika målspel kombinerats i röd respektive turkos färg. Samma radareko i båda SAR-bilderna blir således grått i bilden. Till vänster visas ett 600 m x 600 m stort skogsområde där ett flertal fordon är utplacerade. Flera fordon syns tydligt med röd eller turkos färg medan andra är svårare att urskilja. I mittenbilden visas en inzoomning av ett

område som innehåller två stycken fordon, terrängbil 30. Notera att dessa endast är urskiljbara i den bistatiska SAR-bilden och att de effektivt döljs av starka radarekon från träden i den monostatiska SAR-bilden. På samma sätt framträder de tydligare i den bistatiska förändringsbilden till höger jämfört med den monostatiska.



Figur 9. Exempel från mätkampanj 2010 i Kvarn. Övre raden: Monostatisk SAR. Undre raden: Bistatisk SAR. (a) och (b) visar en färgkombination av två SAR-bilder från olika tidpunkter i rött respektive turkost, medan (c) visar en förändringsbild i svartvitt. Den röda kvadraten i (a) avgränsar bildområdet som visas i (b) and (c).

Figur 10 är ett exempel som visar att bistatisk SAR kan ge bättre avbildning av interiören i en byggnad. Både den mono- och bistatiska SAR-bilden tyder på att radarvågen penetrerar inuti byggnaden. Anledningen till att vi kan dra den slutsatsen är att radarvågen infaller från övre högra hörnet och att båda gavlarna är tydligt synliga. Att reflexen från den bortre väggen är stark tyder på att radarvågen penetrerar och utsätts för en hörnreflektion mellan mark och vägg. Notera också att en metallisk ramp med trappa framträder tydligare i den bistatiska SAR-bilden jämfört med den monostatiska bilden.



Figur 10. Exempel från mätkampanj 2010 i Kvarn. Bilderna visar ett 100 m x 100 m utsnitt av SIB-området. Byggnaden i mitten är under uppförande men har tak och ytterväggar klara. (a) Monostatisk SAR-bild, (b) bistatisk SAR-bild, och (c) helikopterfoto. Notera att reflexen från båda gavlarna syns tydligt vilket tyder på att radarvågen penetrerar inuti byggnaden. Den synliga strukturen utefter taknocken är en reflektion från en metallisk ramp med trappa som finns inuti byggnaden.

7 Diskussion och slutsatser

Ett bistatiskt SAR-system har realiserats genom att uppgradera ett svenskt och ett franskt SAR-system. Det bistatiska systemet har testats och utvärderats genom gemensamma flygförsök. En av de största utmaningarna i projektet har varit att utveckla en metod så att båda systemen har en gemensam tidsreferens. Den valda metoden baseras på GPS-tid vilket har fördelen att vara tillgänglig i princip överallt och att GPS också används för positionering av de två systemen. Nackdelen är att metoden förmodligen inte kan användas i ett militärt operativt system eftersom GPS är störkänsligt. En viktig uppgift för framtida projekt är således att utveckla alternativa metoder för både positionering och gemensam tidsreferens som är oberoende av GPS.

Utvärderingen av de praktiska flygförsöken har visat att de bistatiska SAR-bilderna är i paritet med de monostatiska SAR-bilderna avseende bildkvalité. Denna slutsats är en betydande framgång för projektet. Resultaten pekar också på att bistatisk SAR kan ge ökad mål-bakgrund-kontrast i både urban och skogsklädd terräng. De visade exemplen förklaras av att hörnreflektioner mellan horisontell mark och vertikala trädstammar eller husväggar som ger ett starkt radareko i monostatisk geometri försvagas i bistatisk geometri med separation av sändare och mottagare i elevation.

Resultat och kunskap från projektet pekar på att bistatisk SAR är en viktig framtida spaningsteknik som försvarsmakten kan ha stor nytta av. Speciellt intressant är en konfiguration där sändaren placeras på stort avstånd från målområdet medan små plattformar med passiva mottagare kan operera nära målområdet. Det kortare avståndet innebär kortare ledtider genom att integrationstiden minskar. Flera mottagare kan dessutom samtidigt utnyttja en och samma sändare.

Projektet har också tillsammans med industrin deltagit i utvecklingen och verifieringen av en SAR som integrerats i en liten helikopter. Det framtagna SAR-systemet är monostatiskt och kan uppgraderas till att fungera som mottagare i ett bistatiskt SAR-system.

Vi bedömer det som viktigt att forskningen inom bistatisk radar fortsätter. Det finns flera viktiga forskningsuppgifter inom området, bl.a.

- Utveckling av metoder för synkronisering utan GPS.
- Utveckling av metoder för positionering utan GPS. Exempel på ansatser är autofokus eller SLAM ("Simultaneous localisation and mapping").
- Undersökning av möjligheter att använda icke-kooperativa sändare, t.ex. digital-TV. Metoder har tidigare utvecklats för att filtrera bort oönskade radiosignaler (se t.ex. [17]) och en förstudie, som genomfördes på FOI för ett antal år sedan, pekar på möjligheterna att istället använda liknande signaler som sändsignaler [33].
- Utveckla system och metoder för att upptäcka rörliga lågsignaturmål med bistatisk radar. Denna uppgift är speciellt intressant för sjö- och luftbevakning.
- Mätkampanjer för att undersöka mål- och bakgrundssignaturer i nya scenarier.

8 Referenser

Producerat i projektet "Bistatisk SAR för urban miljö" 2009-2011

- [1] R. Baqué, P. Dreuillet, O. Ruault du Plessis, H. Cantalloube, L. Ulander, G. Stenström, T. Jonsson, A. Gustavsson, "LORAMBis: a bistatic VHF/UHF SAR experiment for FOPEN," IEEE International Radar Conference 2010, held in Washington D.C., 10-14 May 2010, pp. 832-837, 2010.
- [2] P. Follo, R. Gunnarsson, J. Rasmusson, "Simulering av bistatisk radarfunktion," FOI Memo 2764, Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI), 2009
- [3] P.-O. Fröling, B. Flood, D. Murdin, L. Ulander, "Simulation of bistatic SAR. Preparations for joint airborne experiments 2010," FOI-R--3005--SE, Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI), 2010.
- [4] P.-O. Fröling, A. Gustavsson, M. Lundberg, 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, in press
- [5] T. Jonsson, G. Stenström, "Synchronization tests with LORA and SETHI SAR sensors," FOI Memo 2830, Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI), 2009.
- [6] L.M.H. Ulander, A. Gustavsson, T. Jonsson, G. Stenström, "Bistatic SAR Campaign 2009, Experiment Plan," FOI-R--2779--SE, Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI), 2009.
- [7] L.M.H. Ulander, "Bistatic SAR for urban environments, Annual report 2009," FOI-R--2885--SE, Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI), 2009.
- [8] L. Ulander, "Experimentplan 2010," FOI Memo 3134, Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI), 2010.
- [9] L. Ulander, A. Gustavsson, "Bistatisk SAR för urban miljö, Årsrapport 2010," FOI-R--3105--SE, Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI), 2010.
- [10] L.M.H. Ulander, A. Barmettler, B. Flood, P.-O. Fröling, A. Gustavsson, T. Jonsson, E. Meier, J. Rasmusson, G. Stenström, "Signal-to-clutter ratio enhancement in bistatic very high frequency (VHF)-band SAR images of truck vehicles in forested and urban terrain," IET Radar, Sonar and Navigation, vol. 4, no. 3, pp. 438-448, 2010.
- [11] L.M.H. Ulander, B. Flood, P.-O. Fröling, A. Gustavsson, T. Jonsson, B. Larsson, M. Lundberg, D. Murdin G. Stenström, "Change detection of vehicle-sized targets in forest concealment using VHF- and UHF-band SAR," IEEE International Radar Conference 2010, held in Washington D.C., 10-14 May 2010, pp. 1054-1059, 2010.
- [12] L.M.H. Ulander, P.-O. Fröling, A. Gustavsson, D. Murdin, G. Stenström, "Fast factorized back-projection for bistatic SAR processing," Proc. EUSAR 2010, 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Aachen, Germany, 7-10 June 2010, pp. 1002-1005, 2010.
- [13] L.M.H. Ulander, R. Baqué, H. Cantalloube, P. Dreuillet, B. Flood, P.-O. Fröling, A. Gustavsson, T. Jonsson, B. Larsson, D. Murdin, R. Ragnarsson, O. Ruault du Plessis, G. Stenström, "Observations of clutter suppression in bistatic VHF/UHF-band synthetic-aperture radar," Proc. Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery XVIII, held in Orlando, FL, 25 - 29 April 2011, Proc. of SPIE Vol. 8051, 80510H, 2011.
- [14] L.M.H. Ulander, B. Flood, P.-O. Fröling, A. Gustavsson, T. Jonsson, B. Larsson, M. Lundberg, D. Murdin, G. Stenström, "Change detection of vehicle-sized targets

in forest concealment using VHF- and UHF-band SAR,” IEEE AES Systems Magazine, vol. 26, no., 7, pp. 30-36, July 2011.

- [15] L.M.H. Ulander, B. Flood, P.-O. Frörlind, A. Gustavsson, T. Jonsson, B. Larsson, M. Lundberg, D. Murdin, R. Ragnarsson, G. Stenström, P. Dreuillet, P. Martineau, O. Ruault du Plessis, and B. Vaizan, ”Joint Bistatic Low Frequency Airborne Radar Experiments,” FOI-R--3274--SE, Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI), 2011.
- [16] V.T. Vu, T.K. Sjögren, M.I. Pettersson, A. Gustavsson, L.M.H. Ulander, ”Detection of moving targets by focusing in UWB SAR - theory and experimental results,” IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 48, no. 10, pp. 3799-3815, 2010.
- [17] V.T. Vu, T.K. Sjögren, M.I. Pettersson, L. Håkansson, A. Gustavsson, L.M.H. Ulander, ”RFI Suppression In Ultrawideband SAR Using Adaptive Line Enhancer,” IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 7, no. 4, pp. 694-698, 2010.

Övriga referenser

- [18] E.J. Baranoski, ”Through-wall imaging: Historical perspective and future directions,” Journal of the Franklin Institute, vol. 345, no. 6, pp. 5173-5176, 2008.
- [19] G. Bonin, P. Dreuillet, ”The airborne SAR-system: SETHI. Airborne microwave remote sensing imaging system,” Proc. EUSAR 2008, 7th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Friedrichshafen, Germany, 2-5 June 2008, pp. 199-202, 2008.
- [20] T. Chevalier, M. Andersson, A. Gustavsson, J. Rasmusson, ”Lägesbildsunderlag inför insatser i urban miljö,” FOI-R--2385--SE, Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI), 2007.
- [21] M.E. Davies, Foliage Penetration Radar, ”Detection and Characterization of Objects Under Trees,” SciTech Publishing Inc., 2011.
- [22] ERG No 1 Contract, Research and Technology Project entitled ”Innovation and Technology (ITP) for Studies for Integrated Multifunction Compact Lightweight Airborne Radars and Systems” (SIMCLAIRS), Contract No B-0414-IAP2-ERG, European Defence Agency (EDA), 2009.
- [23] P. Grahn, F. Lantz, C. Grönvall, M. Herberthson, M. Ulvklo, D. Murdin, ”Sensorstyrning i NBF, slutrapport,” FOI-R--2397--SE, Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI), 2009.
- [24] P. Grahn (red.), P. Follo, C. Grönvall, G. Haapalahti, H. Habberstad, M. Karlsson, F. Näsström, J. Rasmusson, M. Ulvklo, ”SEMARK, Multipla sensorer för markläge,” FOI-R--2780--SE, Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI), 2009.
- [25] M. Gustafsson, L.M.H. Ulander, ”Monostatic and bistatic SAR-imaging study: Simulations using physical optics,” FOI-R--2560--SE, Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI), 2008.
- [26] M. Gustafsson, ”Reflection and transmission of reinforced concrete between 0-4 GHz: Calculations using FDTD,” FOI-R--2567--SE, Linköping, Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI), 2008.
- [27] A. Jänis, S. Nilsson, L.-G. Huss, M. Gustafsson, A. Sume, ”Through-the-wall imaging measurements and experimental characterization of wall materials,” Proc. Military Remote Sensing, London, UK, 27-28 October 2004, SPIE vol. 5613, pp. 67-75, 2004.
- [28] Sensorer, ”FOI orienterar om,” Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI), nr. 3, 2004

- [29] Technical Arrangement 4.5, "Joint Bistatic Low Frequency Airborne Radar Experiments," FOI Dnr 08-330, Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI), 2008.
- [30] L.M.H. Ulander, H. Hellsten, G. Stenström, "Synthetic-aperture radar processing using fast factorised back-projection," *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, vol. 39, no. 3, pp. 760-776, 2003.
- [31] L.M.H. Ulander, M. Blom, B. Flood, P. Follo, P.-O. Frörlind, A. Gustavsson, T. Jonsson, B. Larsson, D. Murdin, M. Pettersson, U. Rääf, 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.
- [32] L.M.H. Ulander, "Theoretical considerations of bi- and multistatic SAR," FOI-R--1334--SE, Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI), 2004
- [33] L.M.H. Ulander, B. Andersson, S. Björklund, P. Follo, P.-O. Frörlind, A. Gustavsson, G. Haapalahti, A. Nelander, "Förstudie: Parasiterande och Passiv Radar," FOI-R--2015--SE, Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI), 2006.
- [34] L.M.H. Ulander, T. Martin, "Bistatic ultra-wideband SAR for imaging of ground targets under foliage, *Proc. 2005 IEEE International Radar Conference*, Arlington, VA, 9-12 May 2005, pp. 419-423, 2005.
- [35] L.M.H. Ulander, M. Lundberg, W. Pierson, A. Gustavsson, "Change detection for low-frequency SAR ground surveillance," *IEE Proc.-Radar Sonar Navig.*, vol. 152, no. 6, pp. 413-420, 2005.
- [36] N.J. Willis, "Bistatic Radar," Artech House, 1991.
- [37] N.J. Willis, H.D. Griffiths (Eds.), "Advances in Bistatic Radar," SciTech Publishing Inc., 2007.

Appendix: Aktiviteter inom SIMCLAIRS 2009-2011

SIMCLAIRS ("Studies for Integrated Multifunction Compact Lightweight Airborne Radars and Systems") är ett EDA-projekt ("European Defence Agency", CapTech Sensor Systems, IAP2). Fas 1 av projektet löper under perioden 2009-2012 och genomförs av ett industrikonsortium bestående av THALES Systèmes Aéroportés (Frankrike), SAAB AB (Sverige), SELEX Sensors & Airborne Systems Ltd (UK) samt THALES UK Ltd (UK). FOI är associerad medlem till konsortiet och deltar i projektet som partner till SAAB.

FOI:s medverkan bedrivs inom projektet "Bistatisk SAR för urban miljö" med finansiering från Försvarsmakten. Inom SIMCLAIRS ingår också två öppna forskningsutlysningar. FOI medverkar i den ena tillsammans med Institutionen för Signaler och System på Chalmers i ett projekt som rör design av vågformer och signalbehandling för frekvenssamverkan mellan radar och kommunikation.

Målsättningen för SIMCLAIRS är att utveckla teknologier för radiofrekventa system på små obemannade flygfarkoster (UAV). Med radiofrekventa system avses SAR ("Synthetic Aperture Radar"), MTI ("Moving Target Indicator"), FOPEN ("FOliage PENetration") samt ESM ("Electronic Support Measures"). De tre förstnämnda är radarmoder för högupplösande markspaning och det sistnämnda är system för telekrig. Syftet är att utveckla teknologier som i fas 2 av projektet leder till realisering av system och demonstrationer under tidsperioden 2015-2020.

FOI:s arbete under perioden 2009-2011 har varit inriktat på att utveckla och verifiera ett litet SAR-system på VHF-bandet i samarbete med SAAB. En miniatyriserad prototyp CARABAS-3 har tagits fram av SAAB för integration på en liten helikopter, se Figur 11. FOI har genomfört verifiering av systemet, först på FOI-husets tak och sedan när systemet flugit i helikoptern. FOI har också varit ansvarig för signalbehandlingen av SAR-data.

Systemet har varit föremål för ett antal modifieringar men har nu testats över hela det operativa frekvensbandet. Referensmål i form av radarreflektorer har använts för att verifiera bandbredd och geometrisk upplösning. Under det avslutande året 2012 i fas 1 planeras nya flygprov för att utvärdera förmågan att detektera objekt under vegetationsmaskering samt detektion av föremål under mark.



Figur 11. (a) Illustration av prototypen för CARABAS-3 på liten helikopter enligt SAAB:s design. (b) Elektroniklåda för CARABAS-3 som innehåller radarstyrning, sändare, mottagare samt datalagring. Antenner, kablar samt sensorer för positionering (GPS och IMU) tillkommer vid installationen.