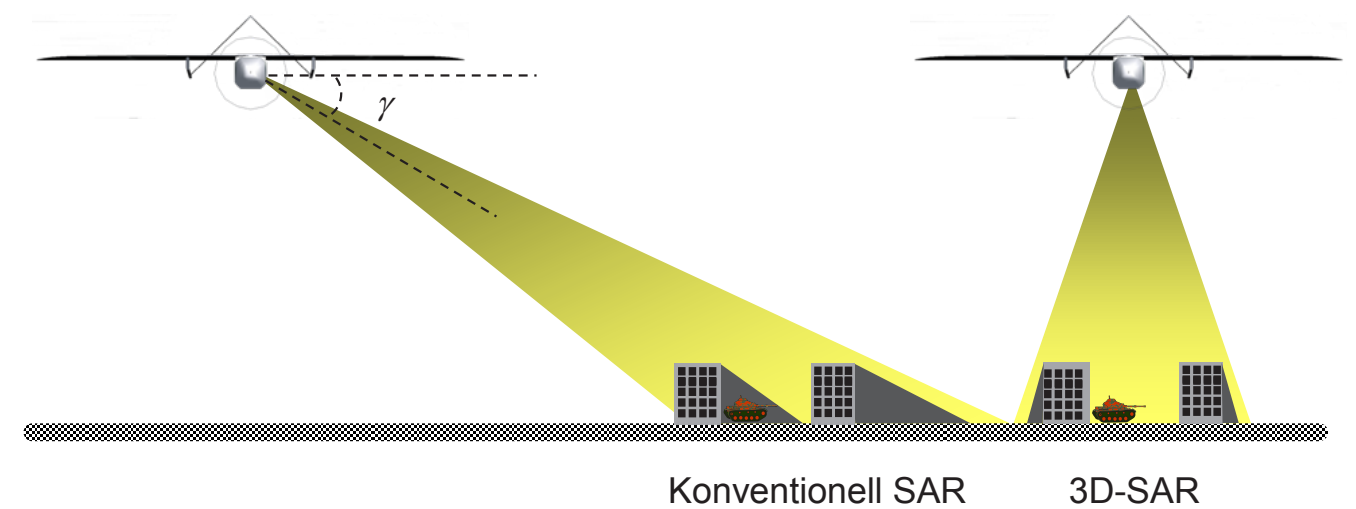


P. GRAHN, A. NELANDER, A. GUSTAFSSON



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.

P. Grahn, A. Nelander, A. Gustafsson

Mikrovågssystem för 3D-markspaning

Sammanfattning och tillämpningar

Titel	Mikrovågssystem för 3D-markspaning - sammanfattning och tillämpningar
Title	Microwave systems for 3D ground surveillance - summary and applications
Rapportnr/Report no	FOI-R--3322--SE
Rapporttyp Report Type	Användarrapport User report
Sidor/Pages	33 p
Månad/Month	december/December
Utgivningsår/Year	2011
ISSN	ISSN 1650-1942
Kund/Customer	FM/The Swedish Armed Forces
Projektnr/Project no	E53045
Godkänd av/Approved by	Magnus Jändel

FOI, Totalförsvarets Forskningsinstitut

Avdelningen för Informationssystem

Box 1165

581 11 Linköping

FOI, Swedish Defence Research Agency

Information Systems

Box 1165

SE-581 11 Linköping

Sammanfattning

Vilka nya förmågor tillför 3D-avbildande och multifunktionell radar för att lokalisera, klassificera och få verkansverifiering mot markmål i svår miljö? Det är den övergripande frågeställningen för projektet Mikrovågssystem för 3D-markspaning.

Projektet har pågått under 2009-2011 och har studerat området på flera fronter med målsättning att forska kring möjligheterna och nyttan med vertikal 3D-SAR och multifunktionella mikrovågssystem.

Teknikerna förväntas på olika sätt bidra till att möta kravbilderna från exempelvis styrkor i internationella insatser som numera vanligen opererar i urbana miljöer. 3D-SAR bidrar med en förenklad informationsinhämtning och en ökad uppdateringstakt av lägesbilden medan flexibla multifunktionssystem med allväders-kapacitet är ett attraktivt alternativ då antalet sensorer som förbanden kan medföra från Sverige är begränsat. För plattformar där tillgången på utrymme, lastförmåga och energiförsörjning är starkt begränsad, exempelvis för små UAV:er, bedömer vi att multifunktionssensorer är speciellt attraktiva.

Projektet medfinansierar flera andra projekt, vilket har bidragit till ett stort mervärde för projektet då vi inte bara får en utökad verksamhet inom respektive område, men även tillgång till nya kontaktnät och får ta del av den nya kunskapen i samarbetsprojekten. Vi ser detta som ett mycket bra led för att upprätthålla och utveckla vår kompetens inom de områden där vi verkar. Dessutom finns det exempel på kostnader för exempelvis mjuk- och hårdvara kan delas eller till och med fås helt gratis.

Den här rapporten fokuserar på behoven av tekniken och nyttan med systemen. Ett antal typsituationer beskrivs där vi bedömer att nya mikrovågsbaserade sensorer har potential till att underlätta situationen för FM på uppdrag i en insatssituation. Rapporten sammanfattar även vår forskning inom området och våra tekniska framsteg under perioden 2009-2011.

Nyckelord:

3D-SAR, MIMO, utglesade, gruppantennar, multifunktion, AESA, PESA, UAV, energisnåla, kompakta, urbana miljöer, internationella insatser, radar, sensorer

Summary

Which new capabilities does 3D imaging and multifunctional radar give in terms of localisation, classification and weapon effects analysis regarding ground targets in difficult environments? This is the general question the project Microwave systems for 3D ground surveillance deals with.

The period for the project has been 2009-2011 and it has studied the area from several different angles with the aim set to studies of the capabilities of vertical 3D-SAR and multifunctional radar sensors.

The sensors in mind are expected to meet the demands set by for example troops in international missions where operations in urban environments are common. 3D-SAR helps to make the information gathering easier and increases the update speed of the situation awareness, while flexible multifunctional systems with all-weather capacity is an attractive alternative when the amount of sensors the forces can bring from Sweden is limited. The use of multifunctional sensors, we believe, is especially attractive for platforms with very limited space, payload and power availability.

The project cofinance several other projects, which have contributed to a significant added value to the project in terms of an added work effort to the project, but also an increase in the networking area and insight in the projects that are cofinanced. This helps us to keep and increase our competence in the areas we operate in. There are also examples where software or hardware costs can be shared or even received for free.

Keywords:

3D-SAR, MIMO, sparse, phased arrays, multifunction, AESA, PESA, UAV, energy starved, compact, urban environments, international missions, radar, sensors

Innehållsförteckning

1	Inledning och verksamhet	7
2	Scenarier och behovsbild	9
2.1	Urban miljö	9
2.2	Vegetationsmiljö	9
2.3	Verkansverifiering	10
2.4	Skydd mot IED:er	10
2.4.1	Sensorer och funktioner	10
2.5	Skydd av gruppering långt från huvudcamp	11
2.5.1	Provisoriskt nattläger	11
2.5.2	Förhandsplanering	11
2.5.3	Upprättande av skydd för nattläger	11
2.5.4	Brytande av nattläger	12
2.6	Skottdetektor vid eldöverfall	12
2.6.1	Sensorer och funktioner	12
3	Tekniska framsteg inom projektet	14
3.1	3D-SAR	14
3.2	Arkitekturer för kompakta mikrovågssystem	16
3.3	Systemanalys	18
3.4	Antennteknik	18
3.5	Simulering	19
4	Systemförslag	20
4.1	Radarsensorer för flygtillämpningar	21
4.1.1	UAV-buren 3D-SAR	21
4.1.2	UAV-buren SAR	21
4.1.3	Radarsatellit	21
4.1.4	Övriga radarsensorer	21
4.2	Radarsensorer för marktillämpningar	21
4.2.1	Områdesövervakningsradar	21
4.2.2	Alertradar	22
4.2.3	Sniper detection radar	22
4.2.4	Stridsfältsradar	22
4.2.5	LV-radar, X-band	22
4.2.6	LV-radar, C-band	23
4.2.7	AESA-radar, S-band	23
4.2.8	Multifunktionsradar	23

5	Taktisk användning	24
5.1	3D-SAR	24
5.2	Övriga radarsystem.....	25
6	Medfinansierade projekt	26
6.1	MEMS-4-MMIC	26
6.2	SPREWS.....	26
6.3	Multi Purpose Human Finder	27
6.4	NANOTEC.....	27
7	Framtida utsikter och slutord	28
7.1	Framtida utsikter	28
7.2	Slutord	28
8	Leveranser	29
8.1	Milstolpar	29
8.2	FOI rapporter och memon.....	29
8.3	Konferensartiklar	30
8.4	Övriga publikationer	32
9	Referenser	33

1 Inledning och verksamhet

Vilka nya förmågor tillför 3D-avbildande och multifunktionell radar för att lokalisera, klassificera och få verkansverifiering mot markmål i svår miljö? Det är den övergripande frågeställningen för projektet Mikrovågssystem för 3D-markspaning.

Projektet har pågått under åren 2009-2011 och har studerat området på flera fronter med målsättning att forska kring möjligheterna och nyttan med vertikal 3D-SAR (Syntetisk AperturRadar) och multifunktionella mikrovågssystem.

Teknikerna förväntas på olika sätt bidra till att möta kravbilden från exempelvis styrkor i internationella insatser som numera vanligen opererar i urbana miljöer.

3D-SAR bidrar med en förenklad informationsinhämtning och en ökad uppdateringstakt av lägesbilden genom dess nedåttittande geometri. Konventionell (2D) SAR är sidtittande och begränsas därför kraftigt av skuggningseffekter bakom exempelvis hus och för att få upplösning i 3D krävs multipla överflygningar, vilket både tar tid och ökar risken för upptäckt och bekämpning.

Upplösningen för 3D-SAR sker i SAR-led genom förflyttning längs x-axeln, tvärs förflyttningen (y-led) genom en gruppantenn och i djupled (z-led) genom radarns frekvenssvep. Utmaningen ligger i den ofta mycket stora antennlängd och tillhörande många antennelement i tvärsriktningen som krävs för många applikationer för att nå en tillräcklig upplösning tvärs flygriktningen. Koncept för uttunnade antennarrayer studeras därför [1] och en mätuppställning för valideringsmätningar av koncepten, men även för att utvärdera och demonstrera möjligheterna med 3D-SAR, har utvecklats.

Flexibla multifunktionssystem, exempelvis i gruppantennutförande, med allväderskapacitet är ett attraktivt alternativ då antalet sensorer som förbanden kan medföra från Sverige är begränsat. För plattformar där tillgången på utrymme, lastförmåga och energiförsörjning är starkt begränsad, exempelvis för små UAV:er, tror vi att multifunktionssensorer där samma antennsystem kan utföra flera olika funktioner, är speciellt attraktiva. De funktioner vi främst har i åtanke för multifunktionssystemet är markmålspaning, Ground Moving Target Indicator (GMTI), spaning mot luftmål (grov- och finsökning) och kommunikation. Målsättningen har varit att klarlägga tekniska förutsättningar för mikrovågssensorer vars funktion och egenskaper kan anpassas till den varierande behovsbilden i omvärlden.

Projektet medfinansierar flera andra projekt, vilket har bidragit till ett stort mervärde för projektet då vi fått en utökad verksamhet inom respektive område, men även tillgång till nya kontaktnät och fått ta del av kunskapen i samarbetsprojekten. Vi ser detta som ett mycket bra led för att upprätthålla och utveckla vår kompetens inom de områden där vi verkar. Projektet har mycket goda erfarenheter av internationell samverkan där en relativt liten insats från FOIs sida ger ett stort mervärde genom att vi tar del av resultat från våra partners och i förekommande fall även delar tillverkningskostnader eller får delta helt gratis i tillverkningsomgångar.

Inom EU FP7-projektet MEMS-4-MMIC (MikroElektriska Mekaniska System och Monolithic Microwave Integrated Circuits) studerar vi vinsten ur ett systemperspektiv med att integrera MEMS-komponenter tillsammans med integrerade kretsar såsom förstärkare och fasskiftare [2]. Hittills framkomna mätresultat är lovande och indikerar nyttan med den nya MEMS-tekniken i form av mycket låga uppmätta förluster och brusfaktorer, vilket öppnar möjligheten att förenkla arkitekturen för gruppantennsystem väsentligt.

EDA projektet SPREWS (Signal Processing for Radar and Electronic Warfare Systems) startade i februari 2009 och FOIs insats finansieras helt av FM med in-kind bidrag via FoT-projekt. Projekt Mikrovågssystem för 3D-markspaning finansierar FOIs deltagande i delprojektet SP1 "Clutter suppression using STAP for radar modes with ambiguous waveforms" som behandlar signalbehandling i flygburen radar för att undertrycka

markklotter med adaptiv filtrering i rum och tid: STAP (Space-Time Adaptive Processing) där vi har varit ansvariga för två leveranser inom arbetspaketet.

VINNOVA-projektet Multi Purpose Human Finder har som mål att ta fram en produkt för upptäckt av människor i rasmassor. En gruppantenn med styrd lob i både sändning och mottagning används och kan därför ge både avstånds och riktningssinformation om placeringen av människor i rasmassor.

Verksamheten i projektet har varit uppdelat i fyra områden enligt nedan:

- Systemstudier och simulering där STAP-baserade signalbehandlingsmetoder studerats för detektion av rörliga markmål. Verksamheten inom SPREWS har även ingått under den här rubriken. Vi har även studerat behoven av flexibla mikrovågssensorer i internationella operationer.
- Teknik för nedåttittande 3D-SAR där ett experimentsystem för 3D-SAR tagits fram och mätningar för att verifiera koncept för uttunnade och kompakta gruppantennar utförts. 3D-SAR bilder har simulerats för att komplettera mätresultaten.
- Arkitekturer för kompakta multifunktionsantennar i gruppantennutförande där betydelsen av lågförlustig switchteknik ur ett arkitekturperspektiv har studerats. Verifiering av prestanda har skett genom design och mätningar på framtagen hårdvara. Även simuleringar kopplade till mätningarna har utförts. En stor del av aktiviteterna har skett inom medfinansieringsprojektet MEMS-4-MMIC.
- Antennteknik där en facetterade och en mjukt krökt gruppantenn tagits fram och utvärderats. Koncept för mycket bredbandiga gruppantennar har också studerats.

Den här rapporten fokuserar på behoven av tekniken och nyttan med systemen i en operativ miljö. Rapporten sammanfattar även vår forskning inom området och våra tekniska framsteg under perioden 2009-2011.

Kapitel 1 (det här kapitlet) ger en inledning till ämnesområdet och sammanfattar verksamhet och uppnådda resultat under projektet. En guide för övriga delar av rapporten ges också.

I kapitel 2 beskrivs ett antal typsituationer där vi bedömer att nya mikrovågsbaserade sensorer har potential till att underlätta situationen för FM på uppdrag i en insatssituation.

Kapitel 3 ger en bild av de tekniska framstegen och de uppnådda forskningsresultaten inom projektet.

I kapitel 4 presenteras systemförslag där nya mikrovågsbaserade sensorer ingår.

Kapitel 5 beskriver den taktiska användningen av de system vi studerar ur en operativ synvinkel.

En beskrivning av de medfinansierade projekten ges i kapitel 6.

Kapitel 7 behandlar framtida utsikter och slutord där projektmedarbetarna presenteras.

Slutligen listas projektets milstolpar och leveranser i kapitel 8.

2 Scenarier och behovsbild

Nedan beskrivs ett antal typsituationer där vi bedömer att nya mikrovågsbaserade sensorer har potential till att underlätta situationen för FM på uppdrag i en insatssituation [3].

2.1 Urban miljö

Den urbana miljön är komplicerad därför att det är mycket som händer och sker och som är helt normalt. Denna normalbild i kombination med att de flesta typer av situationer kan förekomma i den urbana miljön, ofta i mindre skala jämfört med på landsbygden. Ett spaningssystem behöver av denna anledning med stor säkerhet kunna upptäcka avvikelser mot normalbilden. Ett annat karakteristiskt drag hos stadsmiljön är att stora förändringar sker snabbt liksom att det finns stora risker för att intressanta objekt tillfälligt skymms vid spaning med konventionella spaningstekniker såsom elektrooptik och SAR (Syntetisk AperturRadar). En sensor med 3D-SAR funktionalitet (som studerats i projektet) förväntas vara till stor nytta i urbana miljöer då tekniken bidrar till att reducera dessa skymningseffekter genom dess nedåttittande geometri.

Önskvärda företeelser som ett spaningssystem bör kunna hantera dygnet runt är t.ex:

- ▲ Fånga fordonsrörelser som skiljer sig från normalbilden på en mängd olika sätt.
- ▲ Fånga förändringar i flödet av fordon.
- ▲ Fånga förändringar i flödet av människor.
- ▲ Fånga statiska oanmälda förändringar i utvalda områden eller längs med utvalda trafikleder. 3D-förmåga för att minska falsklarmrisk.
- ▲ Följa utpekade fordon en längre tid för att följa upp förehavanden. I detta ligger att karakterisera eller klassa fordon samt återupptäcka dem efter att ha tappat följning.
- ▲ Kunna fastställa vad som skedde före en händelse, efter det att händelsen inträffat s.k. "back-tracking".

Dessa önskemål kan inte med känd teknik adresseras av ett enda enskilt spaningssystem. De bör hanteras av flera spaningssystem som sammansatts till ett större. Viktigt blir då att samverkan fungerar på ett smidigt och robust sätt mellan de ingående systemen.

En systemkomponent är ett radarsystem som momentant kan avbilda ett markområde även i höjdd. Det får stor betydelse eftersom det kan se skillnad på företeelser i och över markplanet samtidigt som det kan verka i mörker och måttlig nederbörd. Tredimensionell (3D) SAR kan mäta små höjdskillnader momentant och kan fås att mäta in rörliga objekt, men uppdateringstakten bestäms av hur den flygande plattformen rör sig.

2.2 Vegetationsmiljö

Vid spaning över områden med tät vegetation är det viktigt att upptäcka objekt som kommer av mänsklig aktivitet under vegetationstaket, dessutom över stora områden. Är dessutom terrängen mycket kuperad samtidigt som den är beklädd med tät fuktig vegetation blir inte problemet enklare. I dagsläget finns det en spaningsteknik som kan hantera detta, skillnadsanalys på lågfrekvent bredbandig VHF-SAR (CARABAS), men inte utan problem i en del fall. Brant terräng orsakar problem med belysningsskugga mm och mål som rör sig blir diffusa eller försvinner helt, dessutom gör dess långa våglängd att objekt mindre än personbils storlek inte syns bra. SAR som sänder på mikrovågsfrekvenser kommer inte att se objekt under vegetationstaket utan endast i gläntor, förmågan mot rörliga objekt är dock något bättre.

Ett komplement till VHF-SAR som efter invisning kan användas även i brant terräng och som har viss förmåga till att tränga ner under vegetationen skulle därför vara bra att ta till. 3D-SAR har potential till detta om man kan göra ett sådant system på UHF-bandet eller ännu lägre i frekvens.

2.3 Verkansverifiering

En speciell tillämpning är den spaning som bedrivs efter det att en militär insats genomförs i syfte att verifiera att insatsen fått avsedd effekt. Optiska kamerasystem har svårt att tränga igenom damm, rök och brand som ofta råder på dessa platser. Konventionella SAR-system har svårt att avgöra om en bro eller hus raserats eller ej eftersom man inte kan mäta lokala höjdförändringar. 3D-SAR skulle däremot kunna fungera väl i en sådan situation då eld, rök och damm inte har så stor inverkan samtidigt som små lokala höjdskillnader kan detekteras.

2.4 Skydd mot IED:er

Var finns IED:er? Riskanalys och planering för IED-hot bör göras i förväg via kartläggning och inhämtning av underrättelseinformation, men 100% säkerhet kan aldrig nås. Ofta finns IED:er på väl valda platser så att största möjliga verkan nås, t.ex. vid trång passage nära intill eller under en väg, t.ex. bro, flod, ravin eller närliggande bebyggelse/vägbank etc. Avståndet är ofta mycket kort, <5 m, för att uppnå stor verkan med explosionen. Platser med få alternativa vägval, gott synfält för eldöverfall, dålig övervakning, bra flyktvägar som underlättar för en angripare att komma undan etc. är också högst rimliga kandidater.

I IED-händelsens akuta fas måste truppen arbeta på ett korrekt sätt med säkerhet och skydd för att minska risken för eventuella ytterligare förluster. Det betyder höjd beredskap mot t.ex. eldöverfall eller ytterligare IED-hot.

Händelseförloppet bör om möjligt dokumenteras (utfall, agerande, insamlade sensordata, kommunikation mm.) och redovisas för inblandade så att lärdomar dras och anpassning av taktik görs inför framtida uppgifter.

Typiska händelser att försöka fånga upp i förväg och samband med IED-hot kan vara:

- 1) Fordon som stannar kort stund
- 2) Föremål som lämnas kvar
- 3) Nya indikationer bredvid en väg, höjder, skog eller annan strategisk punkt
- 4) Fordonsgrupper som stannar oväntat
- 5) Fordonsrörelser under förbjuden tid eller på avlysta områden
- 6) Personrörelser nära väg

2.4.1 Sensorer och funktioner

I ett förhandsskede bör kartläggning och inhämtning av underrättelseinformation göras så att en normalbild fås över aktiviteter i området. Detta arbete kan ta tid (dagar-veckor-månader). Optiska sensorsystem kan med fördel kombineras med radarsystem för att få allväderskapacitet.

I SAR-bilder från satellit, flygplan eller UAV kan förändringsdetektion utnyttjas, för att automatiskt upptäcka nytillkomna eller försvunna objekt inom aktuellt område, jämfört med motsvarande normalbild. Den aktuella bilden subtraheras från normalbilden, och nytillkomna objekt framträder.

Det är önskvärt med en tillräckligt hög uppdateringstakt av förändringsbilderna. Med ett tillgängligt radarsatellitesystem kan en uppdateringstakt ca en gång per dygn fås över större områden (t.ex. 100 km x 100 km) med en upplösning på ett par meter. För mera redundans, uthållighet och högre uppdateringstakter (flera gånger per dygn), högre upplösning (<1 m) i några mindre avgränsade områden, t.ex. 10 km x 10 km krävs flera samverkande avbildande radarsystem i t.ex. satellit, flygplan eller UAV.

Förändringar ungefär likas stora som bildupplösningen kan automatiskt detekteras i SAR-bilder via förändringsdetektion. Dessa förändringar behöver sedan följas upp närmare t.ex. via mera högupplösande optiska sensorer eller med manuell inspektion.

Medelstora UAV:er med optiska eller radarbaserade sensorer kan användas för att flyga strax före en patrullerande kolonn av fordon och leta efter potentiella hot. På samma sätt kan markbundna förarlösa fordon (UGV) användas eller köras nära objekt eller vägvägnitt man vill studera närmare.

I samband med ett IED-hot vill man ha en mycket god bild av den närmaste omgivningen och eventuella rörelser av fordon och personer. Truppen vill veta var dessa potentiellt farliga personer och fordon finns. I händelse av beskjutning vill man snarast veta riktning och position till skytten. Dessa funktioner kan lösas med olika slags mindre radarsystem på egna fordon. De måste snabbt kunna driftsättas och förmedla relevant information till alla i truppen.

En liten UAV bedöms kunna tas med av förbandet. UAV:n kan då snabbt (sekunder till minuter) skickas upp i en akut situation. Detta bedöms kunna göra stor nytta för att få bättre överblick över möjliga hot i det närmaste området. Typisk aktionstid i luften blir omkring en timme.

2.5 Skydd av gruppering långt från huvudcamp

I kapitlet har vi valt att fokusera på de behov som föreligger vid nattläger.

2.5.1 Provisoriskt nattläger

En mindre grupp ute på uppdrag nödgas slå provisoriskt nattläger i lantbygdsterräng långt ifrån huvudcampen. Ca 3-4 fordon och 10-12 personer antas ingå i gruppen. Med sig har gruppen ett begränsat antal radarsensorer, t.ex. alertradar, stridsfältssradar och sniper detection radar för att uppmärksamma intrång och lokalisera riktning vid beskjutning.

2.5.2 Förhandsplanering

I förväg kan inhämtning av underrättelser, t.ex. via SAR-bilder från satellit eller UAV (gärna med 3D-funktionalitet av den typ vi studerat i projektet) visa på flera alternativa platser lämpliga för nattläger, likaså om vissa områden bör undvikas. Tillgång till information om hotbild, terrängens beskaffenhet, vegetation och topografi, rörelser av trupper och fordon är viktiga komponenter i sådana förberedelser. Med bra förhandsinformation kan bättre, mera okonventionella och oförutsedda platser väljas, kanske mera vid sidan av huvudrutten. Detta ger säkrare nattläger.

2.5.3 Upprättande av skydd för nattläger

Här är rutiner viktiga för att snabbt få förstärkt skydd, både med sensorer och med vapen. Alla system måste vara tillförlitliga och snabbt kunna sättas i drift, utan för mycket intellektuell möda och tidspillan. Syftet med intrångssensorerna bör vara att ge mera och tryggare nattro för fler soldater än i frånvaro av sensorer.

Radarsystem, exempelvis i gruppantennutförande för elektrisk lobstyrning, som sitter permanent på fordonen kan även i ett inledningsskede utnyttjas för att detektera rörelser av

objekt i närheten. Runt platsen för nattläger placeras förslagsvis flera alertradarsystem i en ring med ungefär samma avstånd till centrum för att få förvarning vid närmande från alla riktningar. Dessa alertradarsystem består av en liten enkel effektsnål rörelsedetekterande radar med liten vinkeldiskrimineringsförmåga i kombination med en akustisk sensor och en Pan Till Zoom- (PTZ) kamera för att minska falsklarmrisken.

Detta kan kompletteras med skottlokaliseringsradar, med fördel i form av flera mindre facetterade gruppantennor, placerade i olika sektorer för att lokalisera riktningar vid beskjutning samt stridsfältsradar för bevakning av öppnare områden på avstånd upp till ca 10 km.

Vid strategiska platser som vägar intill eller upp mot nattlägret kan man placera enkla radarsensorer för att detektera fordonsrörelser. De kan kompletteras med PTZ-kameror för att få mera information om vad som närmar sig.

Vid starkt hot kan en större radar placeras i närheten av nattlägret för mera överblick på marken och förvarning om hot från luften. En sådan kommer dock att kräva ett extra fordon och extra bemanning.

2.5.4 Brytande av nattläger

Det är viktigt att kunna bryta nattlägret snabbt med personal, fordon, sensorer och utrustning. Även här behövs rutiner och planering för uppbrott, gärna med flera alternativ för fortsatt rutt. Tids och säkerhetsvinster bör finnas med sensorer permanent monterade på fordon. Sådana sensorer kan användas även i inledande och avslutande skeenden av ett nattläger.

2.6 Skottdetektor vid eldöverfall

Denna typsituation inträffar då en liten grupp fordon (2-4) är ute på uppdrag utanför hemmabasen.

Vi har tre olika fall:

1. Landsväg. Beskjutning sker från en eller ett fåtal automatkarbiner (AK-47) i syfte att terrorisera och skrämma bort vår grupp. Beskjutningen sker från skyddad position relativt långt bort (ca 100 m) och snett bakifrån eller från sidan. Många skott kommer att missa. Inga andra människor finns i närheten.
2. Landsväg. Hinder har byggts i form av en trasig bil uppställd efter kurva. Beskjutningen från ett flertal automatkarbiner från relativt nära håll (<50 m) börjar när våra fordon stannar upp. Syftet är att slå ut vår grupp. Attackgruppen har skydd i form av några klippblock och buskage samt har färdats till platsen i en Toyota-pickup som står uppställd i närheten. Inga andra människor finns i närheten.
3. Inne i mindre stad. Syftet är samma som i (2), men utförs i mindre stad. Attackgruppen har skydd i två byggnader bredvid den större gata som vår grupp färdas på. Hindret denna gång utgörs av kärror. Attackgruppens närvaro indikeras av att ovanligt lite folk är i rörelse just på denna gata.

2.6.1 Sensorer och funktioner

Fordonsgruppen har tillgång till spaningsunderrättelsematerial som visar tänkbara överfalls-platser, där man bör se upp lite extra. Gruppens första och sista fordon är försedda med skottlokaliseringsradar (i gruppantennutförande, se avsnitt 2.5.3 ovan), som kan detektera och indikera huvudriktning på skott. Med finns också en laserbaserad detektor för att upptäcka optik som är riktad mot fordonsgruppen t.ex. kikare eller kikarsikten. Denna optikspanare har arbetsmoder för att också blända ett sikte vid behov. Alla sensorerna samverkar så att en detektion i någon av sensorerna visar övriga var

detektionen skett. Samtliga skottlokaliseringsradarsystem som finns på olika fordon i kolonnen kan samarbeta för trianguleringsberäkningar av skyttar. Viktigt för detta scenario är att attackgrupperna snabbt lokaliseras och att svarseld kan riktas mot dessa. I det första fallet kan man inte avgöra om attacken var riktad mot oss eller om det handlade om förlupna kulor efter bara en enda detektion. En respons bör därför vänta något. I de övriga fallen är det avgörande om relativt tung svarseld kan riktas mot angriparna snabbt.

3 Tekniska framsteg inom projektet

Under perioden 2009-2011 har projektet studerat teknik och tekniska möjligheter för mikrovågssystem för 3D-markspaning. Koncept för 3D-SAR har tagits fram och metoder att reducera komplexitet, effektförbrukning och kostnad för radarsystem har studerats. Antennstudier och systemsimulering har också bedrivits inom ramen för projektet. Nedan följer en kortfattad beskrivning av de tekniska framstegen under projektiden. En utförligare beskrivning av projektverksamheten finns att läsa i referenserna [4] och [5].

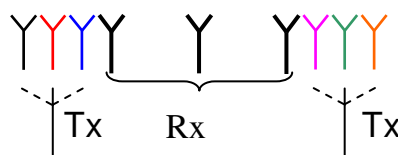
3.1 3D-SAR

Vertikal 3D-SAR förväntas ge kraftigt förbättrad förmåga för snabb avbildning av exempelvis urbana miljöer. Dagens konventionella sidtittande teknik brottas med stora skuggningsproblem genom dess sidtittande geometri. En vertikal SAR ger även upplösning i höjddled samtidigt som skuggningseffekterna reduceras väsentligt, vilket förväntas leda till en betydande ökad förmåga vid underrättelseinhämtning i urbana miljöer.

3D-SAR ger upplösning i tre dimensioner, i x-led (SAR-led) genom förflyttningen i flygriktningen, i y-led (vinkelrätt mot flygriktningen) genom en gruppantenn och i z-led (höjddled) genom en frekvenssvepande radarsignal till exempel med Frequency Modulated Continuous Wave teknik (FMCW). Till skillnad från traditionell SAR ges alltså även upplösning i höjddled och dessutom är betraktningens vinkel för 3D-SAR rakt ovanifrån, vilket reducerar problem med skuggning av föremål bakom exempelvis höga byggnader. Kombinationen av dessa attraktiva egenskaper förväntas ge väsentligt förbättrade möjligheter till underrättelseinhämtning i urbana miljöer i jämförelse med den teknik som finns tillgänglig idag.

En mycket stor antennlängd och tillhörande många antennelement krävs dock normalt i y-led för att nå tillräcklig upplösning tvärs flygriktningen. Koncept för uttunnade antennarrayer i kombination med multipla sändarpositioner studeras därför och en mätuppställning [6] har tagits fram för valideringsmätningar av koncepten, men också för att utvärdera och demonstrera möjligheterna med 3D-SAR. Figur 1 visar en schematisk bild över de uttunnade mottagararkitekturerna som studerats.

Uttunnad arkitektur med två Tx arrayer



Motsvarande syntetisk mottagararray



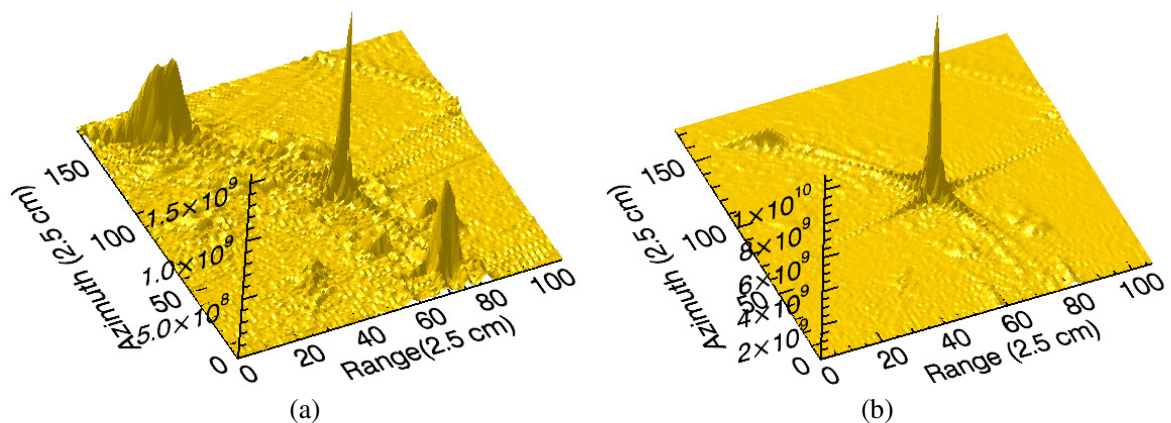
Motsvarande konventionell mottagararray



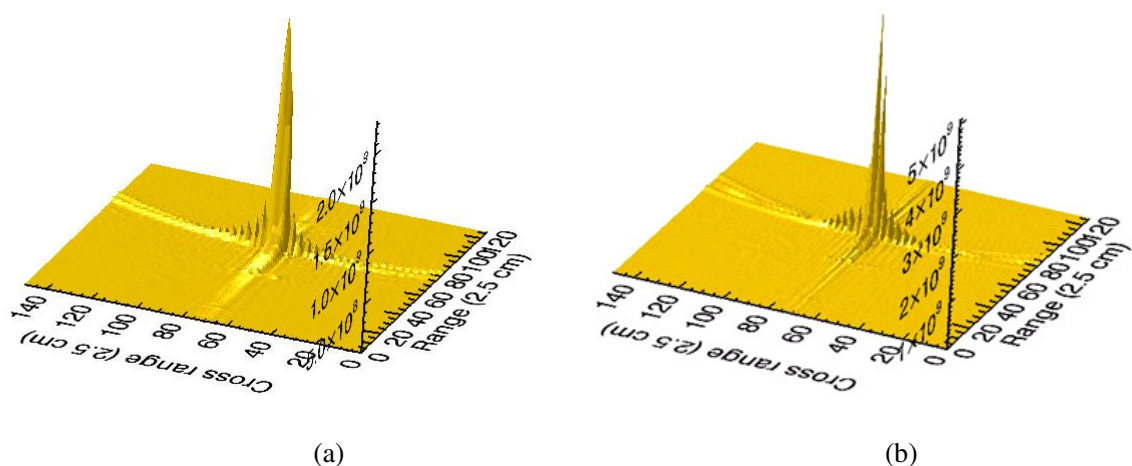
Figur 1: Illustration av uttunnade antennarrayer. Fysiska mottagarantennerna visas i svart färg och syntetiska mottagarantennpositioner med streckad stil. Färgen på de syntetiska antennerna är samma som dess motsvarande sändarantenn.

Resultat från den första mätkampanjen där konceptet ”uttunnade mottagararrayer genom multipla sändarpositioner” studerades sammanfattas i [7] och visar att konceptet fungerar väl. I försöket valde vi en mätgeometri med sändare vid 7 olika positioner (en sändare aktiv i taget och dess positioner separerade med avståndet $\lambda/2$) på ena sidan om den uttunnade mottagararrayen. Figur 2 visar mätresultat summerat för alla mottagarpositioner (utglesad array med elementavstånd $7\lambda/2$) i kombination med en av sändarpositionerna (a) respektive alla 7 sändarpositionerna (b). Figuren visar att gallerlober uppkommer då resultatet från endast en sändarposition används, detta på grund av den utglesade mottagararrayen. Gallerloberna försvinner dock i stort sett då resultatet från alla sändarpositioner summeras. Resultatet kan ses som en verifiering av att konceptet med uttunnade mottagararrayer i kombination med sändararrayer (elementavstånd $\lambda/2$) fungerar.

Vidare har vi studerat en arkitektur med sändare på båda sidor om mottagararrayen, vilket förväntas ge en högre upplösning utan att öka arrayens fysiska storlek nämnvärt. Figur 3 visar mätresultatet, för en mätning av två hörnreflektorer, summerat för alla mottagarpositioner kombinerat med en sändararray på ena sidan om mottagararrayen (a) respektive sändararrayer på båda sidor (b). Den högre upplösningen i figur (b) kan ses genom att den visar de två målen separerade, till skillnad från i (a) där endast ett mål ses.



Figur 2: Mätresultat summerat för alla mottagarpositioner och för en sändarposition (a) respektive för alla 7 sändarpositioner (b).



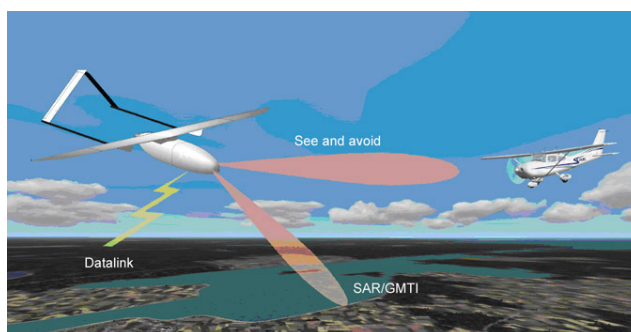
Figur 3: Mätresultat summerat för alla mottagarpositioner och för en sändararray på en sida om mottagararrayen (a) och summerat för sändararrayer på båda sidor om mottagararrayen (b).

Mätresultaten i figur 3 demonstrerar möjligheterna att kraftigt minska det antal mottagarkanaler som krävs för en gruppantenn. Kostnaden för antennen förväntas därmed reduceras väsentligt jämfört med konventionella antennkonfigurationer. Det bör dock nämnas att en mätning med sändararrayer tar betydligt längre tid i anspråk då mätning måste ske med en sändarposition i taget jämfört med den konventionella fullt bestyckade antennen med endast en sändare. Mätresultaten i figur 2 och 3 publicerades vid radarkonferensen under den Europeiska mikrovågsveckan i Manchester i oktober 2011 [8].

3.2 Arkitekturer för kompakta mikrovågssystem

Inom verksamheten för arkitekturer studeras kompakta, effektsnåla och kostnadseffektiva systemkoncept för mikrovågssystem med multifunktionsförmåga (samma system används för flera olika funktioner) med syfte att stödja försvarsmaktens behov vid anskaffning av billiga, kompakta allväderssensorer för informationsinhämtning. Ett av tillämpningsområdena för den typen av sensorer är taktiska obemannade farkoster (UAV:er) med olika förmågor relaterat till informationsinsamling, spaning och målföljning för i huvudsak skydd av internationella förband. Svenska flygvapnet har visat intresse för UAV:er och exempelvis har ett flertal enheter av en taktisk UAV modell AAI RQ-7 Shadow beställts [9].

Förmågor vi studerat inkluderar Se-och-undvika-funktion och olika typer av spaningsfunktion samt kommunikationslänk. Som applikationsexempel har vi valt en taktisk UAV där tillgången av DC-effekt, lastvikt och utrymme är högst begränsat. Figur 4 illustrerar en taktisk UAV utrustad med en konform multifunktionsantenn.

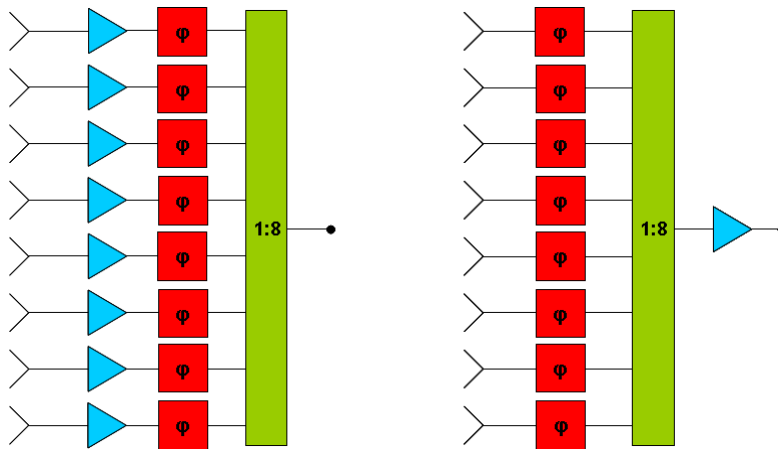


Figur 4: Illustration av en taktisk UAV utrustad med en konform multifunktionsantenn.

Multifunktionssystemet kan realiseras på olika sätt. Den vanligaste arkitekturen är den så kallade AESA-arkitekturen (Aktiv Elektriskt Styrd Antenn), vilken ger god prestanda, men är en både dyr och komplex arkitektur eftersom en förstärkare (och en fasskiftare) per antennelement krävs. Vi har studerat alternativa arkitekturer där kravet på en förstärkare per antennelement lättats på och ersätts med en förstärkare per grupp av antennelement (subarray), en så kallad PESA-arkitektur (Passiv ESA). Kravet på en fasskiftare per antennelement kvarstår för att kunna styra antennen elektriskt. För att fortfarande uppnå god prestanda för systemet krävs nu låga fasskiftarförluster i och med att fasvidarelementen kommer i direkt anslutning till antennelementen, vilket inte är lika viktigt i AESA-fallet.

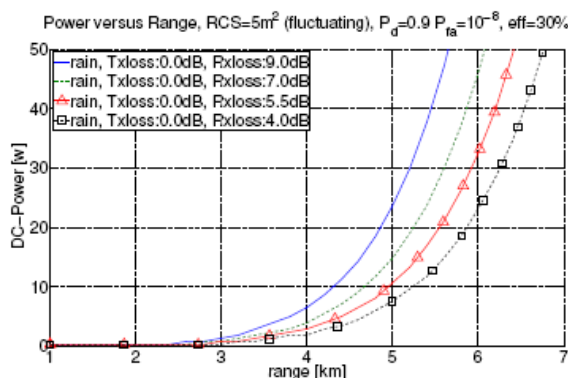
Fasskiftare med den nya MEMS-tekniken (Micro Electric Mechanical Systems) [10] förväntas ha betydligt lägre förluster jämfört med den vanligt förekommande transistorbaserade tekniken och öppnar då möjligheten för den billigare och mindre komplexa PESA-arkitekturen. I figur 5 visas schematiskt AESA och PESA arkitekturerna för mottagarfallet. I sändarfallet är förenklingen med en PESA arkitektur jämfört med en

av typen AESA inte lika stor på grund av svårigheten att generera hög effekt per enskild transistor.

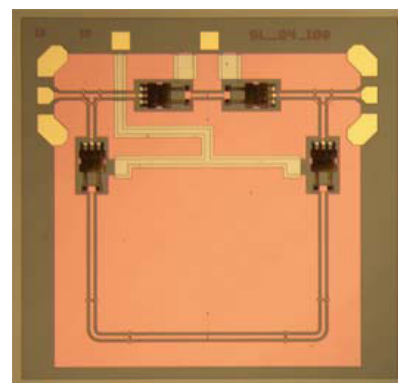


Figur 5: Schematisk bild av två olika RF front-end arkitekturer (enbart mottagarfallet visas här): AESA (till vänster) som resulterar i en högre grad av flexibilitet och generellt sett också bättre prestanda men till priset av högre komplexitet och kostnad samt PESA (till höger) med lägre komplexitet.

Hur låga förluster krävs av fasskiftarna för att PESA ska vara ett attraktivt alternativ till AESA? I figur 6 visas simulerad DC-effekt för sändarfallet som funktion av olika fasskiftarförluster för att kunna uppnå ett visst önskat upptäcktsavstånd. I detta fall antas en AESA front-end arkitektur i sändarfallet samt PESA i mottagarfallet. 2.0 dB, 3.5 dB 5.0 dB resp 7.0 dB förluster för fasskiftaren antas i figuren. Från grafen ses att vid förluster lägre än c:a 4 dB uppnås en räckvidd på mer än 5 km, vilket anses nödvändigt [2].



(a)



(b)

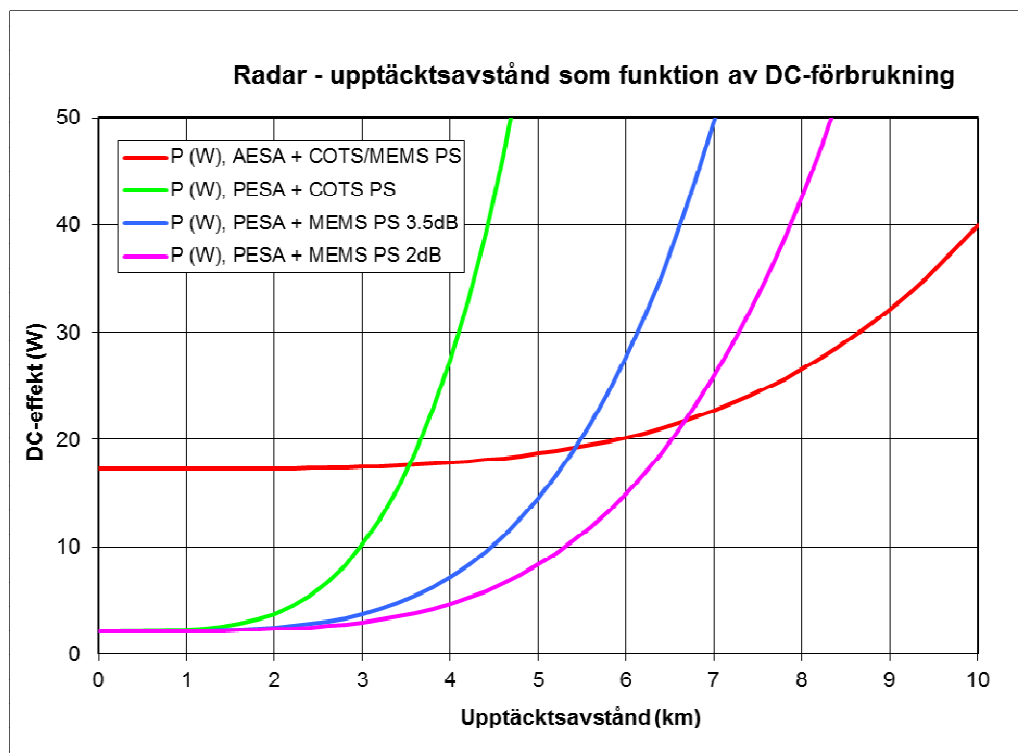
Figur 6: (a) Uppskattad effektförbrukning (för sändaren) för ett givet upptäcktsavstånd i kraftigt regn vid fasvridare med 2.0 dB, 3.5 dB, 5.0 dB resp 7.0 dB förlust och (b) foto av en 24 GHz 1-bitars RF MEMS fasvridare tillverkad i en GaAs MMIC-process.

Vi har även studerat radararkitekturer där både sändar och mottagarsidan realiserar i AESA respektive PESA utförande. Med en antagen effektförbrukning för varje förstärkare på mottagarsidan kommer effektförbrukningen för mottagaren i AESA-utförande kräva mer effekt än för mottagaren i PESA-utförande på grund av det färre antal förstärkare som ingår. En högre uteffekt på sändarsidan kan då fås utan att den totala effektförbrukningen

för radarn ökas. Därmed finns det effektutrymme till att kompensera för PESA-arkitektursens ökade förluster på sändarsidan och den högre brusfaktor på mottagarsidan.

Utgående från radarekvationen har vi gjort en uppskattning av den sammanlagda effektförbrukningen som funktion av upptäcktsavstånd för en se och undvika funktion med AESA (sändare och mottagare) respektive PESA arkitektur (sändare och mottagare).

Resultatet av jämförelsen presenteras i figur 7 och visar på möjligheterna att vid ovanstående förutsättningar i kombination med korta räckvidder kunna övergå från en AESA- till en PESA-arkitektur utan att behöva acceptera en sämre radarprestanda för en se-undvika radarfunktion.



Figur 7: Beräknat upptäcktsavstånd som funktion av effektförbrukning för en AESA respektive PESA baserad (på både sändare och mottagarsidan) radar med Commercial Off The Shelf (COTS)-komponenter (5 dB förluster) respektive MEMS-baserade fasskiftare (2 respektive 3.5 dB förluster). En gruppantenn med 1728 st antennelement samt en subarraystorlek på 8 element per subarray för PESA-arkitekturen samt radarfrekvensen 35 GHz har antagits i studien.

3.3 Systemanalys

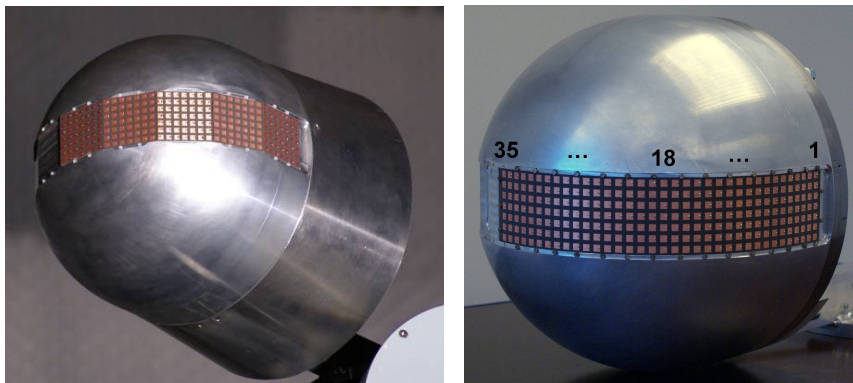
Vår verksamhet inom systemanalys har i huvudsak skett inom samarbetsprojektet SPREWS, se kapitel 6.2, som sammanfattas i [11]. Dessutom har vi gjort studier av sensorbehov för trupper i internationella insatser. Den aktiviteten redovisas till stor del i det här dokumentet i kapitel 2 och kapitel 4. I referens [3] dokumenteras tidigare arbete inom området vilket vi tagit del av i vårt arbete.

3.4 Antennteknik

För att undersöka möjligheterna att integrera tunna antenner på små flygburna plattformar samt demonstrera konform gruppantennteknologi så korrekt som möjligt, utan att bygga

ett fullskaligt antennsystem, har vi tidigare designat och byggt en struktur på vilken konforma gruppantennar kan monteras och utvärderas experimentellt [12]. Plattformen representerar en nosdel på en UAV eller pod, se figur 8.

Två olika antenner har tillverkats och utvärderats, dels en fasetterad gruppantenn och dels en mjukt krökt gruppantenn. Antennerna bestod av likadana antennelement anpassade för frekvensområdet 16 – 18 GHz. Resultatet från de experimentella utvärderingarna av antennerna [13] visar att de skillnader i strålningsegenskaper som kan noteras till största delen sannolikt kan relateras till osäkerheter vid tillverkningen snarare än fundamentala skillnader mellan mjukt krökta och fasetterade gruppantennar. Ett konferensbidrag [14] som sammanfattar den experimentella utvärderingen av den mjukt krökta gruppantennen skickades in till European Conference on Antennas and Propagation 2010 (EuCAP 2010) och presenterades muntligt på konferensen.



Figur 8: Modell av en UAV-nos (ø 30 cm) med en fasetterad gruppantenn (vänster) och med en mjukt krökt gruppantenn (höger). Gruppantennerna består av totalt 35×7 identiska element.

Utöver ovanstående arbete har vi även genomfört bredare studier syftande till kompetensuppbyggnad. Exempelvis har vi undersökt antenndiagramsyntes med den numeriska optimeringsmetoden kallad Particle Swarm Optimization (PSO) samt även undersökt två olika typer av antennelement vilka har potential att användas i mycket bredbandiga gruppantennar, strömytegruppantennar samt notchelement. Studierna har bedrivits genom en kombination av litteraturstudier samt elektromagnetiska simuleringar och syftat till förbättrade konstruktionsverktyg för antenner samt ökad kunskap om alternativa antennlösningar.

Även antenner integrerade i kläder har studerats. Arbetet har nyligen startat och resultat från den verksamheten kommer att redovisas i senare rapporteringar.

3.5 Simulering

Syftet med verksamheten har varit att studera tekniker för att få hög radarprestanda (detektionssannolikhet och inmättningsnoggrannhet) trots störande interferens, speciellt markklotter med tillämpning mot UAV-buren radar för spaning mot markmål.

Vi har bland annat undersökt hur delantennindelning (subarrays) hos plana och konforma gruppantennar i framåttittande och sidtittande radar påverkar förmågan att undertrycka markklotter. Ett resultat vi kommit fram till är att fasetterade och mjukt konforma halvcyklindriska antenner inte visar på några väsentliga skillnader avseende klotterundertryckning. Vilken utformning som är bäst av plana och konforma antenner beror av flera faktorer. Vi kunde dock konstatera att en utformning med överlappande delantennar hade bättre prestanda än oregelbundna utformningsalternativ. Ett konferensbidrag [15] om detta presenterades under 2010.

4 Systemförslag

Flexibla multifunktionssystem och sensorer för internationella insatser har studerats. Systemförslagen bygger på nya mikrovågsbaserade sensorer med allväderskapacitet. Dessa är ett attraktivt alternativ då antalet sensorer som förbanden kan medföra från Sverige är begränsat. För plattformar där tillgången på utrymme, lastförmåga och energiförsörjning är starkt begränsad är multifunktionssystem där samma antensystem används för flera olika funktioner speciellt attraktiva. Målsättningen har varit att klarlägga tekniska förutsättningar för mikrovågssensorer vars funktion och egenskaper kan anpassas till en varierande behovsbild från omvärlden.

Sensorsystem för internationella insatser kan bestå av radarsystem, kamerasystem, lasersystem, akustiska och seismiska sensorer. Detta kapitel behandlar enbart radarsystem av olika slag. Olika framtida radarsystem för internationella insatser kan vara:

- Multifunktionsradar med några tiotals km räckvidd
- Spaningsradar av olika räckviddsklasser
- Stridsfältsradar av olika slag med några km räckvidd
- Flygplan, helikopter eller UAV med högupplösande SAR-sensor
- Kontinuerlig tillgång till information från högupplösande radarsatelliter

Två klasser av tillämpningar av radarsensorer för insatsstyrkornas sensorsystem kan definieras. Den första är för skydd av fasta objekt och områden som till exempel skydd av egen bas (Camp Protection) eller skydd av flyktingläger. Skyddsobjektet eller områdets storlek och innehåll kan variera. Den andra tillämpningen är skydd av insatsstyrkorna under förflyttning eller andra operationer. Detta gäller både fordon och trupp på landsbygden eller i urban miljö. Ett antal olika radartyper och förmågor för sensorsystemen har föreslagits enligt följande [16], [17]:

- Detektering av personer och fordon på nära håll och skydd mot vapen
 - Områdesövervakning: rörelsedetektering, klassificering, räckvidd ca 500 m
 - Alertradar: rörelsedetektering, klassificering, alarm, räckvidd ca 150 m
 - Sniper detection radar: detektering av kula, inmätning av målbana, beräkning av avskjutnings- och nedslagpunkter, räckvidd 2 km
 - Stridsfältsradar med några km räckvidd
 - UAV med högupplösande 3D-SAR sensor
- Detektering av personer, fordon och flygplan på längre håll och skydd mot vapen
 - Områdesövervakning: rörelsedetektering, klassificering, räckvidd 10 km
 - LV-radar: X-band med RAM förmåga, räckvidd 5-20 km
 - LV-radar: C-band med RAM förmåga, räckvidd 20-100 km
 - Större AESA-radar: S-band med RAM förmåga, räckvidd 50-200 km
 - Multifunktionsradar med några tiotals km räckvidd
 - Flygplan, helikopter eller UAV med högupplösande SAR-sensor
 - Högupplösande radarsatelliter

4.1 Radarsensorer för flygtillämpningar

4.1.1 UAV-buren 3D-SAR

Radarn har nedåtriktad stråkavsökning med 50 m/s och stråkbredd 0.5 km vid 1 km flyghöjd. Antennen är nedåtriktad och lobbredden i flygriktningen är 30° och tvärs flygriktningen 60°. Radarn arbetar vid 35 GHz med SAR och FMCW-vågformer med 1 W medeluteffekt (se avsnitt 3.1). Avståndsupplösningen är 0.1 m och sidoupplösningen i flygriktningen är 0.1 m och sidoupplösningen tvärs flygriktningen är 1 m. Räckvidden är 1 km mot 0.01 m² målyta mot bakgrunden -25 dBm²/m² och positionsnoggrannheten är 1 m.

Radarn används främst för detektering av fasta markmål och för skillnadsdetektering av rörliga markmål.

4.1.2 UAV-buren SAR

Radarn har stråkavsökning med 100 m/s och stråkbredd 1 km vid 1 km flyghöjd. Antennen är sidtittande riktad mot stråket och lobbredden i sida är 6° och i höjd 12°. Radarn arbetar vid 15 GHz med SAR vågformer och 10 W medeluteffekt. Avståndsupplösningen är 0.1 m och azimutupplösningen är 0.1 m. Räckvidden är 5 km mot 0.001 m² målyta mot bakgrunden -25 dBm²/m² och positionsnoggrannheten är 1 m.

Radarn används främst för detektering av fasta markmål och för skillnadsdetektering av rörliga markmål.

4.1.3 Radarsatellit

Radarn har stråkavsökning med 8 km/s och stråkbredd 10 km vid 500 km flyghöjd. Antennen är sidtittande och riktad mot stråket och lobbredden i sida är 1° och i höjd 4°. Radarn arbetar vid 10 GHz med SAR vågformer och 1 kW medeluteffekt. Avståndsupplösningen är 1 m och azimutupplösningen är 1 m. Räckvidden är 600 km mot 3 m² målyta mot bakgrunden -10 dBm²/m² och positionsnoggrannheten är 1 m.

Radarn används främst för detektering av fasta markmål och för skillnadsdetektering av rörliga markmål.

4.1.4 Övriga radarsensorer

Ett antal andra radarsensorer skulle kunna ingå i insatsstyrkornas sensorsystem. Lågfrekvens SAR skulle vara värdefullt för att få vegetationsgenomträngning och förbättrad skillnadsdetektering av rörliga markmål. Flygburen spaningsradar behövs om hotet innehåller avancerade flygplan.

4.2 Radarsensorer för marktillämpningar

4.2.1 Områdesövervakningsradar

Radarn har mekanisk avsökning med roterande antenn med 30 rpm (varv per minut) och lobbredden i sida är 1° och i höjd 14°. Radarn arbetar vid 77 GHz med FMCW och 0.01 W uteffekt. Avståndsupplösningen är 2 m och dopplerupplösningen är 0.5 m/s. Räckvidden är 1 km mot 1 m² målyta med 0.5 Hz uppdateringstakt och positionsnoggrannheten är 1 m.

Radarn används för övervakning av personer och fordon inom ett område. Den höga frekvensen ger möjlighet till hög upplösning i vinkel, avstånd och doppler vilket är viktigt för denna typ av radar.

4.2.2 Alertradar

Radarn har fasettantennor med 16 stirrande lobar och lobbredden i sida är 30° och i höjd 30°. Radarn arbetar vid 25 GHz med FMCW och 1 mW uteffekt per sändarlob. Avståndsupplösningen är 10 m och dopplerupplösningen är 0.05 m/s. Räckvidden är 0.2 km mot 1 m² målyta med 10 Hz uppdateringstakt och positionsnoggrannheten är 5 m.

Radarn används för detektering av rörelser från vapen, personer och fordon inom ett område för utpekning av elektrooptiska sensorer för klassificering och hotvärdering. Radarn detekterar och styr ut en kamera mot föremålet som konfirmerar, identifierar och följer målet. De stirrande lobarerna ger hög dopplerupplösning som kan användas för detektering av små och långsamma rörelser.

Områdesövervakningsradarn med räckvidden 1 km kan användas för större öppna ytor medan alertradar med fördel av sitt låga pris, sin låga vikt och sin låga effektförbrukning kan användas för täckning av mindre ytor.

4.2.3 Sniper detection radar

Radarn, exempelvis i gruppantennutförande för möjlighet till elektriskt styrbar lob, har en eller flera antennytor med bred sändarlob och flera smala mottagarlober med digital lobformning. Synfältet i sida är 90° och i höjd 30° per antennyta. Radarn arbetar vid 10 GHz och antennytan har storleken 0.5 m x 0.3 m. Räckvidden är 2 km mot finkalibriga projektiler med 50 Hz uppdateringstakt. Avståndsnoggrannheten är 1 m och vinkelnoggrannheten är 0.2°. Radarn kan vara personburen med en antennyta för sektortäckning eller fordonsburen med fyra antennytor för runtomtäckning.

Radarn används för detektering av kula, inmätning av målbana, beräkning av avskjutnings- och nedslagpunkter. Det är svårt att koppla radarn till ett snabbt reaktivt skydd, men den kan däremot vid beskjutning omedelbart tala om var skytten sitter och vilket hans mål var. Detta kan verka avskräckande för det ger möjlighet till omedelbar bekämpning och dessutom möjlighet till att omedelbart skaffa sig ett lämpligt skydd mot en ny attack.

4.2.4 Stridsfältsradar

Radarn har mekanisk sektoravsökning med 30°/s över maximalt ±180° och lobbredden i sida är 2° och i höjd 4°. Radarn arbetar vid 15 GHz med pulsdopplervågformer och 1 W medeluteffekt. Avståndsupplösningen är 15 m och dopplerupplösningen är 0.2 m/s. Räckvidden är 15 km mot 1 m² målyta med 0.1 Hz uppdateringstakt och positionsnoggrannheten är 10 m. Radarn kan följa och rikta antennen mot upptäckta mål för att utföra klassificering med doppleranalys.

Radarn används främst för detektering av personer och fordon i rörelse. Räckvidden kommer huvudsakligen att begränsas av terräng, vegetation och byggnader.

4.2.5 LV-radar, X-band

Radarn har mekanisk avsökning med roterande antenn med 60 rpm. Antennen har en bred sändarlob och flera smala mottagarlober med digital lobformning i elevation. Vid mottagning är lobbredden i sida på 2° och i höjd 4°. Radarn arbetar vid 10 GHz med pulsdopplervågformer och 10 W medeluteffekt. Avståndsupplösningen är 30 m och dopplerupplösningen är 10 m/s. Räckvidden är 20 km mot 1 m² målyta med 1 Hz uppdateringstakt och positionsnoggrannheten är 10 m.

Radarn används främst för detektering och följning av luftmål som flygplan och helikoptrar men även RAM (Rocket Artillery Mortar) projektiler.

4.2.6 LV-radar, C-band

Radarn har mekanisk avsökning med roterande antenn med 60 rpm. Antennen har en bred sändarlob och flera smala mottagarlober med digital lobformning i elevation. Vid mottagning är lobbredden i sida på 2° och i höjd 4°. Radarn arbetar vid 5 GHz med pulsdopplervågformer och 1 kW medeluteffekt. Avståndsupplösningen är 30 m och dopplerupplösningen är 20 m/s. Räckvidden är 100 km mot 1 m² målyta med 1 Hz uppdateringstakt och positionsnoggrannheten är 50 m.

Radarn används främst för detektering och följning av luftmål som flygplan och helikoptrar men även RAM projektiler.

4.2.7 AESA-radar, S-band

Radarn har mekanisk avsökning med roterande AESA gruppantenn med 60 rpm. Antennen har en bred sändarlob och flera smala mottagarlober med digital lobformning i elevation. Vid mottagning är lobbredden i sida på 2° och i höjd 4°. Radarn arbetar vid 3 GHz med pulsdopplervågformer och 10 kW medeluteffekt. Avståndsupplösningen är 30 m och dopplerupplösningen är 30 m/s. Räckvidden är 200 km mot 1 m² målyta med 1 Hz uppdateringstakt och positionsnoggrannheten är 100 m.

Radarn används främst för detektering och följning av luftmål som flygplan och helikoptrar men även RAM projektiler.

4.2.8 Multifunktionsradar

Radarn har mekanisk avsökning med roterande bredbandig AESA gruppantenn med 60 rpm. Antennen har en bred sändarlob och flera smala mottagarlober med digital lobformning i elevation. Vid mottagning är lobbredden i sida på 1- 2° och i höjd 2-4°. Radarn arbetar vid 8-16 GHz med pulsdopplervågformer och 1 kW medeluteffekt. Avstånds-upplösningen är 30 m och dopplerupplösningen är 10 m/s. Räckvidden är 60 km mot 1 m² målyta med 1 Hz uppdateringstakt och positionsnoggrannheten är 30 m.

Radarn används främst för detektering och följning av luftmål som flygplan och helikoptrar men även RAM projektiler.

5 Taktisk användning

5.1 3D-SAR

Ett 3D-SAR-system kommer mycket sällan att användas självständigt under en operation utan användningen kommer att utgöras av spaningsuppdrag i en dynamisk kedja av uppdrag till olika spaningssystem så att operationens mål uppnås i slutändan. Det betyder att en del uppdrag återkommer med mer eller mindre jämna tidsintervall och andra bara vid specifika behov.

En typisk sådan kedja kan se ut enligt följande:

- ▲ Spaning med satellitburen SAR över ett större område t.ex en stad med omnejd med cirka ett dygns mellanrum under en vecka eller längre period. Detta ger oss en statisk normalbild över området. Vi kan titta på skillnader mellan bilderna och identifiera områden med många och/eller täta ändringar eller områden med oförklarad aktivitet eller oförklarad avsaknad av aktivitet.
- ▲ Spaning med satellitburna högupplösande kameror, både visuellt och i IR-bandet över områden som t.ex visar stor eller för liten aktivitet. Detta ger oss en förfinad normalbild samt större möjlighet att hitta misstänkt aktivitet. Molnighet eller stor luftfuktighet gör dock att tillgängligheten i vissa områden blir låg.
- ▲ Spaning med UAV-buren 3D-SAR över mindre utpekade områden i det större området. Syftet är att förfinas skillnadsdetektionsbilden så att vi kan sortera bort ointressanta företeelser på grund av mindre skuggor från byggnader mm och genom att diskriminera i höjd eller kanske i hastighet. Detta upprepas med intervall från några timmar ner till omkring 10 minuter. Vi kommer då att få en förbättrad bild av flödet av fordon och människor.
- ▲ Följning med UAV-burna kameror mot enskilda objekt som befunnits intressanta. Syftet här är att följa enskilda objekt över tid samt lära sig känna igen eller återigenkänna objekten samt invisa eventuella verkanssystem eller göra verkansverifiering. I princip ett uppdrag per objekt blir nödvändigt även om det ibland går att göra samordningsvinster i form av att en UAV kan se flera följda objekt samtidigt.

Denna kedja förutsätter att invisning sker av efterföljande system liksom att invisande system kan dra nytta av resultat från invisat system t.ex för att ändra spaningsschemat. När man planerar operationen planeras också hur spaning ska bedrivas i stort, detaljplanering sker senare. Hänsyn behöver t.ex tas till om man vill spana obemärkt eller ej, vilken tid på året och dygnet vi befinner oss eller hur hotet mot spaningsplattformarna ser ut.

Om man vill ha hög uppdateringstakt krävs att man med en plattform flyger över samma område ofta, vilket kräver en kort patrullbana, och som får konsekvensen att varje plattform täcker en mindre yta eftersom avspanad yta per tidsenhet är konstant. Ett annat sätt att få hög uppdateringstakt är att låta flera system samverka genom att ligga i patrullbana efter varandra, men det kräver en hög kommunikationsbandbredd för att en dataprocessningsenhet skall kunna utnyttja data som samlats in från samtliga plattformar. Man kan då uppnå en högre uppdateringstakt men risken för kommunikationsstörningar äventyrar resultatet i sin helhet.

Ett framtida 3D-SAR-system skulle kunna bli en trång resurs då datakvaliteten är relativt hög men avspanad yta per tidsenhet är lägre än för konventionell SAR men högre än för motsvarande plattform försedd med optiska sensorer.

5.2 Övriga radarsystem

Ett fordonsburet skottlokaliseringssystem måste vara automatiserat till stor del samt mycket robust. Det ska ju kunna ge invisning till moteld, vilket bland annat ställer krav på att riktningsdata snabbt överförs till en mobil enhet, exempelvis en modern mobiltelefon, hos varje skytt som snabbt ska kunna ge moteld, helst före en eventuell träff. Funktionstester behöver också vara automatiserade samt att larm måste signalera då funktionsstörningar föreligger.

En insatsstyrka ute på uppdrag behöver ha med sig cirka 10 alertradarenheter, se avsnitt 2.5.3, för att åstadkomma ett intrångsskydd. Dessa måste vara enkla att placera ut, snabba att driftsätta och enkla att handha i övrigt. Detta leder till att kommunikationen mellan enheterna och basen behöver vara självkonfigurerande och robust. Energiförbrukningen behöver vara låg för att långa driftstider ska kunna uppnås och batterier behöver laddas automatiskt under transporterna. Funktionstester som uppmärksammar operatör vid driftstörning ska också inkluderas. Själva radarenheterna behöver vara utformade för svår visuell upptäckt genom att likna något naturligt t.ex en buske.

6 Medfinansierade projekt

Projektet har mycket goda erfarenheter av internationell samverkan där en relativt liten insats ger ett stort mervärde genom att vi tar del av resultat från våra partners och i förekommande fall även delar tillverkningskostnader eller får delta helt gratis i tillverkningsomgångar.

Samverkan har skett med EDA-projektet SPREWS (Signal Processing for Radar and Electronic Warfare Systems), EU FP7-projekten MEMS-4-MMIC (MikroElektriska Mekaniska System för Monolithic Microwave Integrated Circuits) och NANOTEC (NANOstructured materials and RF-MEMS RFIC/MMIC TECHNOLOGIES for highly adaptive and reliable microwave to mm-wave systems) samt VINNOVA projektet Multi Purpose Human Finder. Vi har även upprätthållt ett informationsutbyte inom området vertikal 3D-SAR med ONERA i Frankrike.

6.1 MEMS-4-MMIC

Målet med projektet MEMS-4-MMIC är att integrera MEMS-komponenter tillsammans med integrerade kretsar såsom förstärkare och fasskiftare och därmed uppnå betydligt lägre förluster och därigenom förbättrad prestanda jämfört med dagens tillgängliga kommersiella teknologi.

Projekt Mikrovågssystem för 3D-markspaning ansvarar för medfinansieringen av FOIs del inom MEMS-4-MMIC, där vår roll i huvudsak är att studera nyttan av MEMS-baserade (låg förlustiga) fasskiftare, switchar och fördelningsnät med perspektiv mot multifunktionsantennsystem (Se-undvika, kommunikation och SAR-GMTI, se avsnitt 1).

Simuleringar och mätningar på tillverkade kretsar visar på mycket lovande resultat och indikerar nyttan med den nya MEMS-tekniken i form av mycket låga uppmätta förluster och brusfaktorer, vilket öppnar möjligheten att förenkla arkitekturen väsentligt för gruppantennsystem, se kapitel 3.2. Vi har fått vara med i teknologins framkant och fått ta del av de modernaste tillverkningsprocesserna av integrerade kretsar och dessutom fått våra designer tillverka helt gratis. Som exempel på resultat har vi utvecklat och fått tillverkad en switch kombinerad med två olika lågbrusförstärkare med en uppmätt brusfaktor på 2.4 dB, vilket demonstrerar i praktiken de låga brusfaktorer vi förväntat oss med MEMS-tekniken och dessutom öppnar möjligheten för nya arkitekturer för radar, se kapitel 3.2.

6.2 SPREWS

EDA projektet SPREWS (Signal Processing for Radar and Electronic Warfare Systems) startade i februari 2009 och avslutas under januari 2012. Projektet leds av Saab (EDS, SBD) med medverkan från FOI, Eldis Tjeckien, Elettronica Italien, Selex SI Italien, Università la Sapienza Italien, Thales NL Nederländerna, TNO Nederländerna, Thales Air Systems Frankrike och Thales Airborne Systems Frankrike. Projektet finansieras till 50% av respektive MoD och med 50% egenfinansiering. För FOI finansieras projektet helt av FM med in-kind bidrag via FoT-projekt.

FOI deltar i fyra delprojekt inom SPREWS och inom Mikrovågssystem för 3D-markspaning deltar vi i delprojektet SP1 "Clutter suppression using STAP for radar modes with ambiguous waveforms". Detta delprojekt leds av Saab EDS med FOI, Thales Airborne Systems och Selex SI som övriga medverkande parter. Arbetsuppgifterna har delats upp i arbetspaket med ansvariga organisationer för aktiviteter och leveranser. FOI har varit ansvariga för två leveranser (se ref. 15 i kapitel 8.2) och fått ta aktiv del i övriga partners arbete inom delprojektet, som behandlar signalbehandling i flygburen radar för att undertrycka markklotter med adaptiv filtrering i rum och tid: STAP (Space-Time Adaptive Processing). Detta förväntas bli en standardmetod för framtida flygburen radar i

stridsflygplan, spaningsflygplan och UAV:er. Projektet är i sin slutfas och har löpt under tre år med avrapportering av milstolpar varje halvår. De två leveranserna som FOI varit ansvariga för och levererat är dels *Identification and high level modelling of the relevant sources of imperfections and errors* och dels *Assessment of the tolerable levels of imperfections/errors from a system performance perspective*, se ref. 3 och 14 kapitel 8.2.

Vi ser tydligt nyttan med att delta i SPREWS genom den stora kompetens och nyvunnen forskningskunskap vi får tillgång till genom en relativt blygsam insats från FOIs sida. Projektet kommer att öka kunskaperna hos samtliga deltagare. Vi får kunskaper om de andra delprojekten inom SPREWS, samarbetet ökar vårt kontaktnät och vi kan därigenom också möjliggöra andra typer av samarbeten inom Europa och EDA.

6.3 Multi Purpose Human Finder

VINNOVA-projektet Multi Purpose Human Finder är ett samarbete mellan Cinside, Novelda (Norge) och FOI och har som mål att ta fram en produkt för att upptäcka människor i rasmassor. Projektet började i mars 2011 och planeras pågå till mars 2013. Målet med projektet är att utveckla en gruppantenn med styrd lob i både sändning och mottagning [18] och därigenom få tillgång till både avstånds och riktningsinformation om placering av människor i rasmassor. FOI ansvarar för framtagandet av gruppantennen. Nyttan för FOI är, förutom att vi får erfarenheten att ta fram en ny gruppantenn, att vi lär oss mer om se-igenom tekniken, men även systemarbete. Vi ökar även vårt kontaktnät och öppnar därmed möjligheten till nya uppdrag i framtiden genom kontakterna med Cinside och Novelda.

6.4 NANOTEC

EU FP7-projektet NANOTEC (NANOstructured materials and RF-MEMS RFIC/MMIC TEChnologies for highly adaptive and reliable microwave to mm-wave systems) är inriktat mot att förbättra känsligheten för system för passiv avbildning vid frekvenser kring 100 GHz. Projektet startade i september 2011 och planeras pågå under tre år. FOIs roll i projektet är att studera delsystemlösningar som ger en förbättrad prestanda jämfört med dagens teknik. I projektet finns även slutanvändare och kretstillverkare med, vilket ger en stimulerande arbetsmiljö genom den direktkoppling vi får mellan tillverkare och användare. Vårt deltagande i projektet ger nytta för FOI genom att vi får ta del av den senaste utvecklingen inom området, får ökad kunskap om delsystemlösningar vid de aktuella frekvenserna och lär oss mer om passiv avbildning. Dessutom ökar vi vårt kontaktnät och öppnar därmed möjligheten till nya uppdrag i framtiden genom kontakterna med övriga projektparter.

7 Framtida utsikter och slutord

7.1 Framtida utsikter

Behovet av flexibla mikrovågssystem är fortsatt stort, inte minst med tanke på att ämnesområdet är flitigt förekommande i utlysningarna inom EU:s forskningsprogram. Projektnresultaten utgör en god plattform till flera relaterade projekt, däribland EU FP7-projekten MEMS-4-MMIC och NANOTEC, men även kommande försvarsmaktsprojektet multifunktionella gruppantennar.

Under projektiden ser vi speciellt en stor utveckling inom området förenklade arkitekturer och den så kallade PESA-arkitekturen (se avsnitt 3.2) visas allt större intresse internationellt. Även STAP (se avsnitt 6.2) metoder, 3D-SAR (avsnitt 3.1) och RF-MEMS (se avsnitt 3.2) har visats stort intresse internationellt. Exempelvis har de första fullskaliga prototyper av radarsystem där MEMS ingår [19] börjat komma i bruk.

7.2 Slutord

Följande personer har arbetat i projektet under projektiden 2009-2011:

Patrick Andersson	Per-Olov Frörlind	Lars Kroon	Anna Pohl
Wiwianne Asp	Per Grahn	Stig Leijon	Carl Samuelsson
Svante Björklund	Ronny Gunnarsson	Robert Malmqvist	Jan Svedin
Tomas Boman	Andreas Gustafsson	Anders Nelander	Qamar Ul-Wahab
Börje Carlegrim	Magnus Gustafsson	Amer Nezirovic	
Gunnar Filipsson	Mikael Karlsson	Lars Pettersson	

Projektarbetet har resulterat i ny kunskap och förbättrad insikt i området. Resultaten är huvudsakligen dokumenterade i FOI-rapporter och FOI-memon eller som vetenskapliga artiklar och konferensartiklar. Kunskapen har spritts, både skriftligen (rapporter) och muntligen (seminarier och föredragningar), till försvarsindustri, FMV, FM och till forskarvärlden via konferenser. Vi ser stor nytta med vår forskning och är hoppfulla att kunna vidareutveckla området i framtiden, inte minst med tanke på det stora intresset omvärlden visar för tekniken exempelvis i EU:s program för forskning och utveckling där FOI i nuläget arbetar med flera pågående/kommande projekt inom området.

8 Leveranser

Projektet har levererat forskningsresultat till kunden (FM) i form av milstolpar, men även till forskarvärlden genom deltagande och presentationer vid konferenser, både nationellt och internationellt. Kundleveranser, se kap. 8.1, har skett skriftligt, men även muntligt genom föredragningar av projektresultat inför kund. I kapitel 8.1-8.4 sammanställs projektets leveranser.

8.1 Milstolpar

2009-03-20	Statusrapport för MFA-simulatore (1 i kap. 8.2)
2009-06-10	Försöksuppställning för validering av 3D-SAR (2 i kap. 8.2)
2009-09-20	Inskickat konferensbidrag inom området konforma antenner (4 i kap. 8.2)
2009-12-01	Mikrovågssystem för 3D-markspaning - Årsrapport 2009 (6 i kap. 8.2)
2010-06-10	Erfarenheter från inledande mätningar med mätsystem för 3D-SAR (7 i kap. 8.2)
2010-09-20	Radararkitekturer med lågförlustig switchteknik (10 i kap. 8.2)
2010-12-01	Statusrapport i projektet "Mikrovågssystem för 3D-markspaning" (12 i kap. 8.2)
2011-03-20	SPREWS lägesrapport (15 i kap. 8.2)
2011-12-01	Kundseminarium (17 i kap. 8.2)
2011-12-01	Slutrapport. FOI Användarrapport (det här dokumentet, 19 i kap. 8.2)

8.2 FOI rapporter och memon

FOI särtryck redovisas i nästa avsnitt (8.3).

1. T. Boman, "*Statusrapport för MFA-simulatore*", FOI Memo 2766.
2. A. Gustafsson, P. Andersson, P. O. Fröling, J. Svedin, "*Försöksuppställning för validering av 3D-SAR*", FOI Memo 2843.
3. T. Boman, "*Modelling of system hardware imperfections*", FOI SH--0034--SE.
4. R. Gunnarsson, "*Redovisning av milstolpe kv3 2009 för projekt Mikrovågssystem för 3D-markspaning, E53045*", FOI Memo 2921 (bilaga FOI-S--3393--SE).
5. L. Pettersson, A. Gustafsson, P. O. Fröling, J. Svedin, "*System concepts for 3D-radar*", FOI-D--0337--SE.
6. A. Gustafsson et. al, "*Årsrapport 2009 Mikrovågssystem för 3D-markspaning*", FOI Memo 2973.
7. P. O. Fröling, B. Carlegrim, P. Andersson, S. Leijon, T. Boman, "*Erfarenheter från inledande mätningar med mätsystem för 3D-SAR*", FOI-R--3009--SE.
8. S. Björklund, "*Discussion about the Hot Clutter Suppression Condition by Abramovich et.al.*", FOI-D---0360--SE.

9. S. Björklund, P. Grahm, A. Nelander, M. I. Pettersson, "A Study of Rank and Other Properties of Hot Clutter by Spatial Data", FOI-D--0353--SE.
10. R. Malmqvist, C. Samuelsson, A. Gustafsson, "Phased Array Antenna Architectures", FOI-R--3038--SE.
11. A. Pohl, J. O. Ousbäck, "Radarmålareamätningar", FOI-R--3082--SE.
12. A. Gustafsson, "Statusrapport i projektet Mikrovågssystem för 3D-markspaning", FOI Memo 3371.
13. A. Gustafsson et. al., "Årsrapport 2010", FOI-D--0383--SE.
14. A. Nelander, S. Björklund, "Quantitative analysis of the detection performance in the presence of system hardware imperfections", FOI SH--0047--SE.
15. S. Björklund, T. Boman, A. Nelander, "SPREWS lägesrapport", FOI Memo 3522.
16. L. G. Huss, A. Gustafsson, "Gruppantenn för personsökning i rasmassor", FOI Memo 3607, juni 2011.
17. A. Gustafsson, "Seminarium hos kund som utgör milstolpe kv4 2011 för projekt Mikrovågssystem för 3D-markspaning", FOI Memo 3770.
18. L. Pettersson et. al., "Experimental evaluation of two Ku-band conformal arrays", FOI-R-3323--SE.
19. P. Grahm A. Nelander och A. Gustafsson, "Mikrovågssystem för 3D-markspaning - sammanfattning och tillämpningar", FOI-R--3322--SE.

8.3 Konferensartiklar

S. Björklund, "Space-Time Adaptive Processing with a Half-Cylinder Faceted Conformal Antenna", International Radar Conference, RADAR 2009, Bordeaux, France, 12-16 October 2009 (FOI-S--3250--SE).

S. Björklund, A. Nelander, "A Fast-Time STAP for Clutter Suppression between Transmitter and Receiver in Bistatic Radar", International Radar Conference, RADAR 2009, Bordeaux, France, 12-16 October 2009 (FOI-S--3252--SE).

R. Malmqvist et. al., "A 20 GHz antenna integrated RF MEMS based router and switching networks made on quartz", Smart systems integration conference 2009, 10-11 March 2009, Brussels, Belgium (FOI-S--3143--SE).

P. O. Frölind et. al., "Experimental system and simulations of a Vertical SAR," Proceedings of the GigaHertz Symposium, Lund, Sweden, 9-10 March 2010, pp. 7-7 (FOI-S--3453--SE).

L. Pettersson et. al., "Experimental investigation of a smoothly curved antenna array on a UAV-nose mock-up," Proceedings of the European Conference on Antennas & Propagation, EuCAP2010, Barcelona, Spain, 12-16 April 2010 (FOI-S--3393--SE).

S. Björklund, T. Boman, A. Nelander, "Clutter Properties for STAP with Smooth and Faceted Cylindrical Conformal Antennas," Proceedings of the 2010 IEEE International Radar Conference, Washington DC, USA, 10-14 May 2010 (FOI-S--3573--SE).

T. Boman, R. Malmqvist, C. Samuelsson, A. Gustafsson, R. Baggen, "*Antenna RF-system simulation including hardware artifacts*," Proceedings of the European Conference on Antennas & Propagation, EuCAP2010, Barcelona, Spain, 12-16 April 2010 (FOI-S--3441--SE).

R. Malmqvist, C. Samuelsson, D. Smith, T. Vähä-Heikkilä, R. Baggen, "*Switched LNAs using GaAs MMIC based RF MEMS switches*," Int. Semiconductor Conf., CAS 2010, pp. 283-286, 11-13 October 2010, Sinaia, Romania (FOI-S--3583--SE).

R. Malmqvist, C. Samuelsson, B. Carlegrim, P. Rantakari, T. Vähä-Heikkilä, A. Rydberg, J. Varis, "*Ka-band RF MEMS phase shifters for energy starved millimetre-wave radar sensors*," Int. Semiconductor Conf., CAS 2010, pp. 283-286, 11-13 October 2010, Sinaia, Romania (FOI-S--3584--SE).

R. Malmqvist, C. Samuelsson, W. Simon, P. Rantakari, D. Smith, M. Lahdes, M. Lahti, T. Vähä-Heikkilä, J. Varis, R. Baggen, "*Design, packaging and reliability aspects of RF MEMS circuits fabricated using a GaAs MMIC foundry process technology*," 40th European Microwave Conf., EuMC2010, pp. 85-88, 28-30 September 2010, Paris, France (FOI-S--3585--SE).

R. Malmqvist, C. Samuelsson, P. Rantakari, H. Zirath, D. Smith, T. Vähä-Heikkilä, R. Baggen, "*GaAs MMIC based RF MEMS switches for highly integrated switched LNA redundancy networks*," 11th Int. Symp. on RF MEMS and RF Microsystems, MEMSWAVE2010, 28 June-1 July 2010, Ontranto, Italy (FOI-S--3586--SE).

R. Malmqvist, R. Baggen, W. Simon, T. Vähä-Heikkilä, D. Smith, "*MEMS-4-MMIC advances in combined GaAs MEMS-MMIC technology*," 14th Int. Symp. on Antenna technology and applied electro-magnetics, ANTEM 2010, 5-9 July 2010, Ottawa, Canada (FOI-S--3587--SE).

A. Gustafsson, P. O. Fröling, L. Pettersson, B. Carlegrim, J. Svedin, "*Measurements of Sparse and Compact Phased Array Antenna Architectures*," Proceedings of the 8th European Radar Conference, 12-14 October 2011, Manchester, UK (FOI-S--3832--SE).

R. Malmqvist, C. Samuelsson, A. Gustafsson, D. Smith, T. Vähä-Heikkilä, R. Baggen, "*Monolithic integration of millimeter-wave RF-MEMS switch circuits and LNAs using a GaAs MMIC foundry process technology*," Proceedings of the 2011 IEEE MTT-S Int. Workshop series on millimeter wave integration technologies (IMWS2011), pp. 148-151, Sitges, Spain 15-16 sept., 2011 (FOI-S--3922--SE).

R. Malmqvist, C. Samuelsson, W. Simon, D. Smith, P. Rantakari, T. Vähä-Heikkilä, S. Reyaz, J. Varis, R. Baggen, "*Reconfigurable wideband LNAs using ohmic contact and capacitive RF-MEMS switching circuits*," Proceedings of the 6th European Microwave Integrated Circuits Conference (EUMIC 2011), pp. 160-163, 10-11 October 2011, Manchester, UK (FOI-S--3923--SE).

H. R. Khan, Q. Wahab, "*A 24 GHz class-A power amplifier in 0.13um CMOS technology*," Proceedings of the INCASE Conference 2011, pp. 314-317, (FOI-S--3935--SE).

R. Malmqvist, C. Samuelsson, A. Gustafsson, D. Smith, T. Vähä-Heikkilä, R. Baggen, "*Reconfigurable RF-MEMS circuits and low noise amplifiers fabricated using a GaAs MMIC foundry process technology*," Proceedings of the 12th Int. Symp. On RF MEMS and RF Microsystems (MEMSWAVE2011), Athens, Greece, 27-29 June, 2011 (FOI-S--3924--SE).

8.4 Övriga publikationer

A. Nelander, “*Continuous Coded Waveforms for Noise Radar*”, Chapter 49 in *Principles of Waveform Diversity and Design*, M. C. Wicks, E. L. Mokole, Eds. Raleigh, NC, SciTech Publishing, 2010, pp. 795-800, (FOI-S--3470--SE).

IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, Back cover and text, IEEE Aerospace and Electronic System Magazine, vol. 26, no. 3, March 2011.

M. Johansson, K. Kirr, A. S. Kovalev, L. Kroon, “*Gap and out-gap soliton in modulated systems of finite length: exact solutions in the slowly varying envelope limit*”, *Physica Scripta*, vol. 83, no. 6, 2011 (FOI-S--3703--SE).

P. Rantakari, R. Malmqvist, C. Samuelsson, R. Leblanc, D. Smith, R. Johnsson, W. Simon, J. Saijets, R. Baggen, T. Vähä-Heikkiä, “*Wide-band radio frequency micro electro-mechanical systems switches and switching networks using a gallium arsenide monolithic microwave-integrated circuits foundry process technology*”, *Proceedings of the IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 5, no 8, pp. 948-955, 2011 (FOI-S--3921--SE).

M. Asghar, F. Iqbal, S. M. Faraz, Q. Wahab, M. Syväjärvi, “*Study of deep level defects in doped and semi-insulating n-6H-SiC epilayers grown by sublimation method*,” *Physica B*, doi:10.1016/j.physb.2011.08.036 (FOI-S--3938--SE).

S. M. Faraz, N. H. Alvi, A. Henry, O. Nur, M. Willander, Q. Wahab, “*Annealing effects on electrical and optical properties of n-ZnO/p-Si heterojunction diodes*,” *Advanced Materials Research, Trans. Tech. Pub.*, vol 324, 2011, pp. 233-236, (FOI-S--3936--SE).

H. R. Khan, A. Raheem Qureshi, Q. Wahab, “*A fully integrated class-E power amplifier in 0.13 um CMOS technology*,” *IEEE Trans. Circuit and Systems*, pp. 410-413, 2011, (FOI-S--3937--SE).

9 Referenser

- [1] L. Pettersson, A. Gustafsson, P.O. Frörlind, J. Svedin, “*System concepts for 3D-radar*”, FOI-D--0337--SE, 2009.
- [2] R. Malmqvist, C. Samuelsson, A. Gustafsson, “*Phased Array Antenna Architectures*”, FOI-R--3038--SE, 2010.
- [3] P. Grahm, A. Nelander, “*Analys av radarförmågor under en internationell insats*”, FOI Memo 2577, 2008.
- [4] A. Gustafsson et. al, “*Årsrapport 2009 Mikrovågssystem för 3D-markspaning*”, FOI Memo 2973, 2009.
- [5] A. Gustafsson et. al, “*Mikrovågssystem för 3D-markspaning 2010*”, FOI-D--0383--SE, 2010.
- [6] A. Gustafsson, P. Andersson, P. O. Frörlind, J. Svedin, “*Försöksuppställning för validering av 3D-SAR*”, FOI Memo 2843, 2009.
- [7] P.O. Frörlind, B. Carlegrim, P. Andersson, S. Leijon, T. Boman, “*Erfarenheter från inledande mätningar med mätsystem för 3D-SAR*”, FOI-R--3009--SE, 2010.
- [8] A. Gustafsson, P. O. Frörlind, L. Pettersson, B. Carlegrim, J. Svedin, “*Measurements of Sparse and Compact Phased Array Antenna Architectures*,” Proceedings of the 8th European Radar Conference, 12-14 October 2011, Manchester, UK.
- [9] http://www.forsvarsmakten.se/upload/dokumentfiler/Huvuddokument_delarsredovisning_2010.pdf (111128).
- [10] http://en.wikipedia.org/wiki/RF_MEMS (111123)
- [11] S. Björklund, T. Boman, A. Nelander, “*SPREWS lägesrapport*”, FOI Memo 3522, 2011.
- [12] A. Gustafsson et. al., “*Flexibla Mikrovågssystem - Slutrapport*”, FOI-R--2623--SE, 2008.
- [13] L. Pettersson et. al., “*Experimental evaluation of two Ku-band conformal arrays*”, FOI R--3323--SE, 2011.
- [14] L. Pettersson et. al., “*Experimental investigation of a smoothly curved antenna array on a UAV-nose mock-up*,” Proceedings of the European Conference on Antennas & Propagation, EuCAP2010, Barcelona, Spain, 12-16 April 2010.
- [15] S. Björklund, T. Boman, A. Nelander, “*Clutter Properties for STAP with Smooth and Faceted Cylindrical Conformal Antennas*,” Proceedings of the 2010 IEEE International Radar Conference , Washington DC, USA, 10-14 May, 2010.
- [16] A. Nelander, P. Grahm, J. Rasmusson, M. Andersson, “*Optimering av radarsystem för insatsförsvar*”, FOI Memo 3229, 2010.
- [17] A. Nelander, P. Grahm, J. Rasmusson, M. Andersson, “*Värdering av radarsystem för insatsförsvar*”, FOI Memo 3230, 2010.
- [18] L. G. Huss, A. Gustafsson, “*Gruppantenn för personsökning i rasmassor*”, FOI Memo 3607, 2011.
- [19] J. J. Maciel et al, “*MEMS electronically steerable antennas for fire control radars*”, IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, vol 22, no. 11, November. 2007, pp. 17-20.