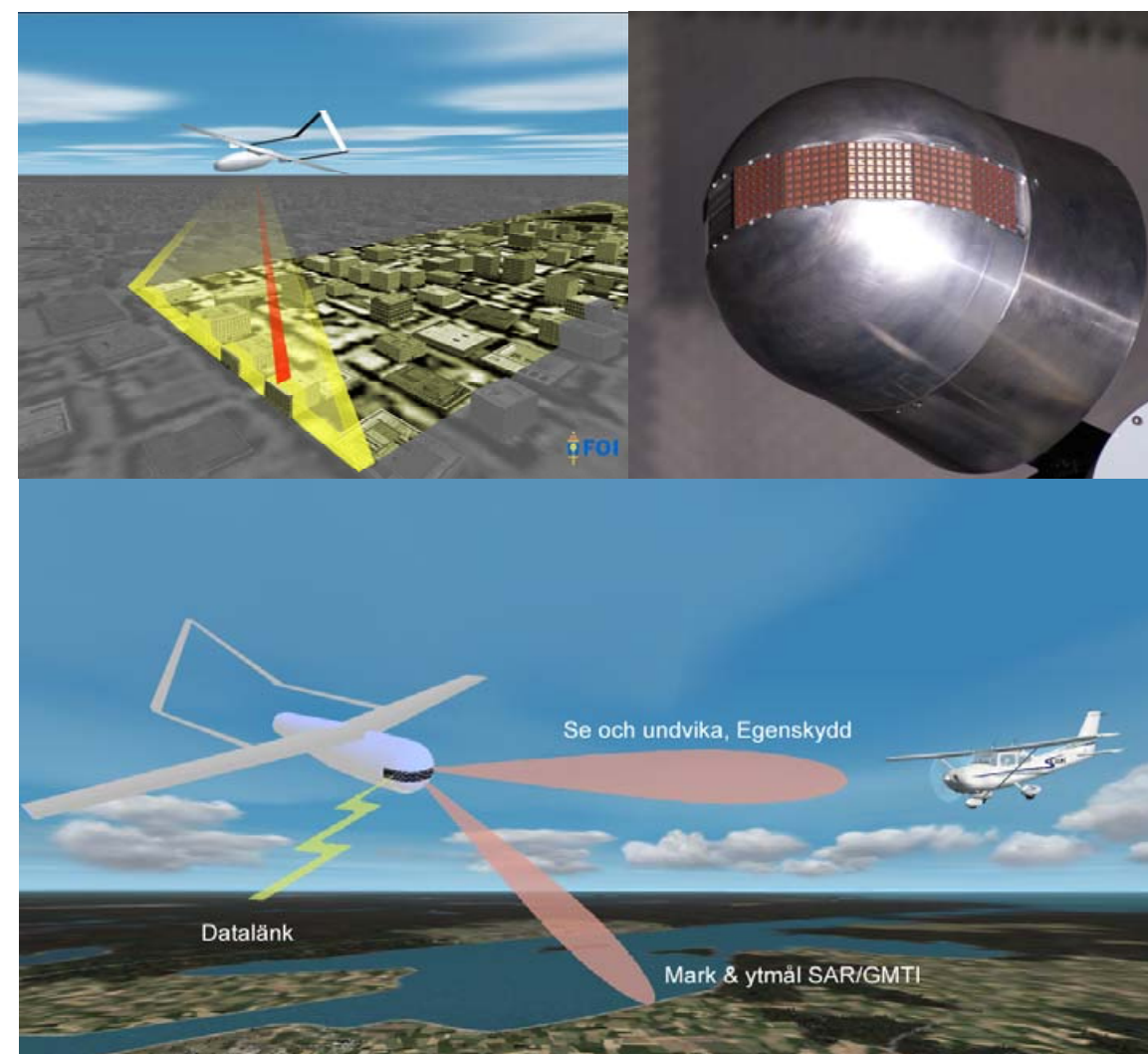


ANDREAS GUSTAFSSON (ED), TOMAS BOMAN, SVANTE BJÖRKLUND,
PER-OLOV FRÖLIND, PER GRAHN, RONNY GUNNARSSON, MAGNUS GUSTAFSSON,
ROBERT MALMQVIST, ANDERS NELANDER, LARS PETTERSSON, JAN SVEDIN



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.

Andreas Gustafsson (Ed)
Tomas Boman, Svante Björklund,
Per-Olov Frölind, Per Grahm,
Ronny Gunnarsson, Magnus Gustafsson,
Robert Malmqvist, Anders Nelander,
Lars Pettersson och Jan Svedin

Flexibla Mikrovågssystem - Slutrapport

Titel	Flexibla Mikrovågssystem - slutrapport
Title	Flexible Microwave Systems - Final report

Rapportnr/Report no	FOI-R--2623--SE
Rapporttyp Report Type	Användarrapport User report
Sidor/Pages	52 p
Månad/Month	December/December
Utgivningsår/Year	2008
ISSN	ISSN 1650-1942
Kund/Customer	FM
Forskningsområde Programme area	4. Sensorer och signaturanpassning 4. Sensors and Low Observables

Delområde Subcategory	42 Sensorer 42 Above surface Surveillance, Target acquisition and Reconnaissance
--------------------------	--

Projektnr/Project no	E3064
Godkänd av/Approved by	Lars Bohman

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

Projektet Flexibla Mikrovågssystem (MFLEX) har pågått under åren 2006-2008 och studerat och värderat teknik för flexibla och multifunktionella mikrovågssystem. Fokus har varit på radarteknik avsedd för små, autonoma farkoster, exempelvis UAv.

Projektet har belyst behov, värdering och systemaspekter, prestandasimuleringar, arkitekturval och konform antennintegration, men även identifierat nyckelkomponenter och teknologier.

Projektets resultat kan kortfattat sammanfattas med följande punkter

- Vid analys av behovsbild för radarförmågor i internationell insats konstateras behovet av UAV-burna SAR/GMTI-sensorer för spaning inom närområdet och radar för att detektera finkalibrig eld.
- Från studier av STAP-baserade signalbehandlingsmetoder för detektering av markmål dras slutsatsen att klotterundertryckningen är ett svårare problem för konforma antenner jämfört med linjära antenner.
- Nedåttittande 3D-SAR är en möjlig teknik för att skapa högupplösta radarbilder över urbana miljöer, utan betydande skuggningsproblem. Med multipla sändarpositioner kan antalet mottagarkanalerna som krävs reduceras, vilket bidrar till att göra systemen mer kostnadseffektiva.
- Analysen av förenklade arkitekturer för multifunktionssystem visar att med låga fasskiftarförluster är det möjligt att, med bibehållen hög prestanda, summera bidraget från flera antennelement i en gruppantenn utan att det krävs lågbrusförstärkare på varje element före summeringen. Detta bidrar till att göra systemen mer kostnadseffektiva.
- Framtagning och karakterisering av en fasetterad konform antenn inom projektet visar på möjligheten att skrovintegrera antennfunktionen med bibehållna goda antennegenskaper i form av antennndiagram och täckningsområde.

Projektet har genomförts i internationellt samarbete och resultatspridning har skett genom samarbeten, konferenspublikationer och föredragningar.

Nyckelord: antenn flexibel gruppantenn kommunikation konform multifunktion radar simulator urban 3D-SAR AESA GMTI PESA STAP

Summary

The Flexible Microwave Systems (MFLEX) project has run during the years 2006 to 2008. The project has studied and evaluated flexible, multifunctional microwave antenna systems. The project focus has been on radar technology for small, autonomous vehicles, for example UAVs.

Topics covered are system evaluation aspects, system performance simulations, architecture issues and conformal antenna integration. Key components and technologies have also been studied.

The project results are summarised in the following list

- Analysis of the need for radar functions in international operations points out the need for UAVs with SAR/GMTI-sensors for reconnaissance and radar for detection of gun fire.
- Studies of STAP-based signal processing methods for detection of ground targets indicate that clutter suppression is a more difficult problem for conformal antennas compared to linear antennas.
- Down-looking 3D-SAR is a possible technique to use for high resolution radar images over urban areas, with low shadowing effects. Using multiple transmit positions the number of receive channels needed can be reduced, which will make the systems more cost effective.
- The analysis of multi function system architectures with reduce complexity we show that by using low loss phase shifters it is possible, without significant loss in performance, to skip the demand on low noise amplifiers before the contribution from the antenna elements in an array antenna can be added together. This would make the systems more cost effective.
- The development and characterization of a faceted conformal antenna within the project demonstrates the possibilities for conformal antennas to assume the shape of a body and still remain antenna features in terms of antenna diagram and angle of coverage.

The project results have been spread by national and international cooperations, through conference publications and by seminars.

Keywords: antenna flexible array antenna communication conformal multifunction radar simulator urban 3D-SAR AESA GMTI PESA STAP

Innehållsförteckning

1	Projektsammanfattning	7
2	Inledning	9
2.1	Behovsbild.....	9
2.2	Relaterad verksamhet i omvärlden	9
2.3	Projektmålsättning	11
3	Projektets nytta	12
3.1	Nytta för försvaret	12
3.2	Samverkan med försvarsmyndigheter, försvarsindustri och högskola.....	13
3.3	Internationellt samarbete	13
3.4	Resultatspridning	14
4	Projektverksamhet och forskningsresultat	15
4.1	Systemanalys.....	15
4.1.1	Tillämpningsexempel	15
4.1.2	Analys av radarförmågor under en internationell insats	16
4.2	Simulering och signalbehandling	18
4.2.1	Status MFA-simulatorn	18
4.2.2	Detektering av rörliga markmål och störundertryckning	21
4.3	Systemteknik 3D-radar	23
4.3.1	Bakgrund.....	23
4.3.2	Arrayarkitekturer	25
4.3.3	Simuleringar.....	26
4.3.4	Realisering	28
4.3.5	Samarbete med ONERA, Frankrike	30
4.4	Arkitekturer och RF front-end teknik	30
4.4.1	35 GHz multifunktionsradarsensor för en taktisk UAV	30
4.4.2	Systemkrav och arkitekturer	31
4.4.3	Fördjupad kunskap som resultat av internationellt samarbete ...	33
4.5	Konform antennteknik	36
4.5.1	Studie av en fasetterad konform antenn.....	36
4.5.2	Analys- och visualisering av konforma antenner	40
5	Slutsatser och framtida arbete	43
5.1	Slutsatser	43
5.2	Framtida arbete.....	44

6	Slutord	45
7	Förteckning över projektets leveranser och publikationer	46
7.1	Projektets milstolpar	46
7.2	Leveranser - FOI Rapporter och MEMO	46
7.3	Konferenspublikationer.....	49
7.4	Övrigt.....	50
8	Referenser	51

1 Projektsammanfattning

Projektet Flexibla Mikrovågssystem (MFLEX) har pågått under åren 2006-2008 och studerat och värderat teknik för flexibla och multifunktionella mikrovågssystem. Fokus har varit på radarteknik avsedd för små, autonoma farkoster, exempelvis UAv. Projektet har belyst såväl värderings och systemaspekter, prestandasimuleringar, arkitekturval och konform antennintegration, men även identifierat nyckelkomponenter och teknologier.

Den här rapporten är uppdelad i sju kapitel. Genomgående i rapporten hänvisas det till leveranser, konferenspublikationer och referenser för den som vill fördjupa sig mer inom ett visst ämnesområde. Tanken med detta är att underlätta för läsaren att hitta det som är av störst intresse. Projektet har arbetat inom ett brett spektrum av områden, på olika tekniska djup, och slutrapporten skulle bli mycket omfattande om vi hade gått in på djupet inom de olika verksamheterna.

Kapitel 1 består av en sammanfattning av projektets resultat och en guide för övriga delar.

I kapitel 2 ges en inledning till och motivering för arbetet i projektet.

Kapitel 3 ger en bild av projektets nytta för försvaret och projektets samarbeten och kontakter i omvärlden, dels nationellt och dels internationellt.

Projektets verksamhet har varit uppdelad i fem områden och beskrivs i mer detalj i kapitel 4, avsnitt 4.1-4.5 för respektive område.

I kapitel 5 presenteras slutsatser och relevant verksamhet för framtida arbete identifieras.

Kapitel 6 är slutord där projektmedarbetarna presenteras.

Slutligen listas projektets milstolpar och leveranser (FOI rapporter och memon samt konferenspresentationer) i kapitel 7. Rapporten avslutas som brukligt med referenser.

Verksamhet och resultat inom projektets fem olika områden kan sammanfattas enligt följande:

Systemanalys, se kapitel 4.1, har behandlat lobformning i olika scenarier, exempelvis vid störning med hett klotter. Metoder att reducera störningseffekter har studerats. Vidare har behovet av radarförmågor under en internationell insats analyserats och identifierats. En beskriven typsituation och analys av denna finns dokumenterad i leverans 19 i kapitel 7.2. Exempelvis konstateras behovet av små UAV:er för underrättelseinhämtning.

Inom simulering och signalbehandling, se kapitel 4.2, har vi vidareutvecklat en simulator för multifunktionssystem (MFA-simulatorn) [10] för att simulera och värdera möjligheter och begränsningar med multifunktionssystem i olika typsituationer. Exempelvis kan upptäcktssannolikhet som funktion av avstånd för en flygande farkost beräknas givet inparametrar som radarmålära, utsänd effekt och antennvinst. Signalbehandlingmetoder som STAP och GMTI och dess kravbild på antennprestanda och arkitektur (delantenn) har även studerats. Resultat av verksamheten inom signalbehandling sammanfattas i leverans 17, se kapitel 7.2.

Systemteknik 3D-radar, se kapitel 4.3, har studerat möjligheter och begränsningar för en nedåttittande SAR för urban miljö. Frågeställningar som reducerade skuggningseffekter och uttunnade arrayer (gruppantenn) har behandlats. Verksamheten sammanfattas i leverans 8, se kapitel 7.2. Viktiga slutsatser: simuleringar visar att 3D-SAR med drastiskt reducerade skuggningseffekter är en möjlig teknik. Multipla sändarpositioner reducerar antalet mottagarkanalerna som krävs med en faktor lika stor som antalet sändarelement i jämförelse med en icke-uttunnad array. Med sändarantennerna på båda sidor om mottagarantennerna kan arrayens fysiska längd halveras.

Arkitekturer och RF-frontend teknik, se kapitel 4.4, har belyst vikten av och möjligheterna med lågförlustiga fasskiftare, switchar och fördelningsnät för multifunktionsantennsystem (Se-undvika, kommunikation och SAR-GMTI), se leverans 6 i kapitel 7.2. Låga fasskiftar-

förluster gör det möjligt att, med bibehållen hög prestanda, summera bidraget från flera antennelement i en gruppantenn utan att det krävs lågbrusförstärkare på varje element före summeringen. Mycket färre lågbrusförstärkare krävs därmed och en förenklad arkitektur kan uppnås. Tekniken går vanligen under benämningen PESA, Passive Electronically Steered Antenna. I samarbete med det nordiska projektet MOSART utreds möjlig räckvidd och krav på uteffekt som funktion av förluster i fasskiftningen för ett applikationsexempel i form av en liten UAV. Studien utvidgas inom ramen för samarbetsprojektet MEMS-4-MMIC [28] där inverkan av fasskiftarförlusterna studeras även för andra tillämpningar, exempelvis bilradar och satellitkommunikation.

Konform antennteknik, se kapitel 4.5, har studerat, utvecklat och realiserat en fasetterad, konform antenn och även karakteriserat denna, se leverans 9 i kapitel 7.2. Nyttan av antennen i form av ett större utstyrningsområde jämfört med en icke-konform antenn har demonstrerats. Vidare har konforma antenner fördelar som en låg radarmålarea och goda aerodynamiska egenskaper.

Tekniska utmaningar i framtida multifunktionssystem som identifieras är

- Reduktion av storlek, vikt och effektförbrukning med upp till tio ggr
- Radararkitekturer som möjliggör radikal reduktion av komplexitet och kostnad
- Resurssnål och effektiv lobformning
- Resurssnål signalbehandling ombord
- Koncept och modeller för signalbehandling

Nyckelteknologier och komponenter förväntas vara

- Integrerade, plana antenner
- Lågförlustiga switchar och fasskiftare (exempelvis MEMS-baserade)
- Kompakta och förenklade arkitekturer
- Signalbehandlingsmodeller och arkitekturer

2 Inledning

Projektet Flexibla Mikrovågssystem (MFLEX) har pågått under åren 2006-2008 och studerat och värderat teknik för flexibla och multifunktionella mikrovågssystem. Fokus har varit på radarteknik avsedd för små, autonoma farkoster, exempelvis UAv, mer specifikt multifunktionsantennsystem där samma antennsystem förväntas utföra flera olika funktioner, främst markmålsspaning (GMTI), spaning mot luftmål (ex collision avoidance och egenskydd) och kommunikation. Även teknik för nedåttittande 3D-avbildande SAR (Syn- tetisk AperturRadar) mot markmål har behandlats inom projektets ram. Telekrigfunktioner har också behandlats, dock i begränsad omfattning.

Målsättningen har varit att klargöra tekniska förutsättningar för mikrovågssensorer vars funktion och egenskaper kan anpassas till en varierande behovsbild från omvärlden.

2.1 Behovsbild

Det svenska försvaret fokuserar alltmer mot internationella insatser där motståndarnas taktik och beteende förväntas vara mycket svåröversägliga. Behovet av underrättelse- inhämtning är av denna anledning mycket stort för att kunna säkerställa den operativa personalens säkerhet och möjliggöra säkra förflyttningar av trupp och materiel. Kraven på de militära sensorsystemen för underrättelseinhämtning kommer att uppvisa en stor variation eftersom det är svårt att på förhand förutsäga vilka scenarier och behov de ska designas för. Behovet av sensorförmågorna spanner över ett stort antal typer - från att upptäcka hot på marken eller i luften, eller att kartlägga terräng/bebyggelse, till att upptäcka mänsklig närvaro på avstånd. Att utveckla specialiserad sensorteknik till var och en av dessa förmågor ter sig orimligt. Att i framtiden istället ha ett mindre antal multifunktionssystem som kan anpassas till det i stunden rådande spaningsbehovet ter sig betydligt attraktivare. Inte minst i internationella operationer kan multifunktionssensorer vara fördelaktiga då antalet sensorer som förbanden kan medföra från hemlandet är begränsat. För farkoster som UAV:er med begränsad tillgång på utrymme, lastförmåga och energiförsörjning ter sig multifunktionssensorer som speciellt attraktiva.

För en väderoberoende och dygnet-runt fungerande underrättelseinhämtning, vilket vi tror kommer att krävas av framtida system, krävs kombinationer av RF-system (Radio Frekvens) och optiska system. Generellt sett är styrkan med RF-system dess väderoberoende funktionalitet och styrkan med optiska system dess höga upplösning vid goda väderförhållanden. Kombinationen av dessa ger en mycket robust teknisk lösning för en väderoberoende och dygnet-runt fungerande underrättelseinhämtning.

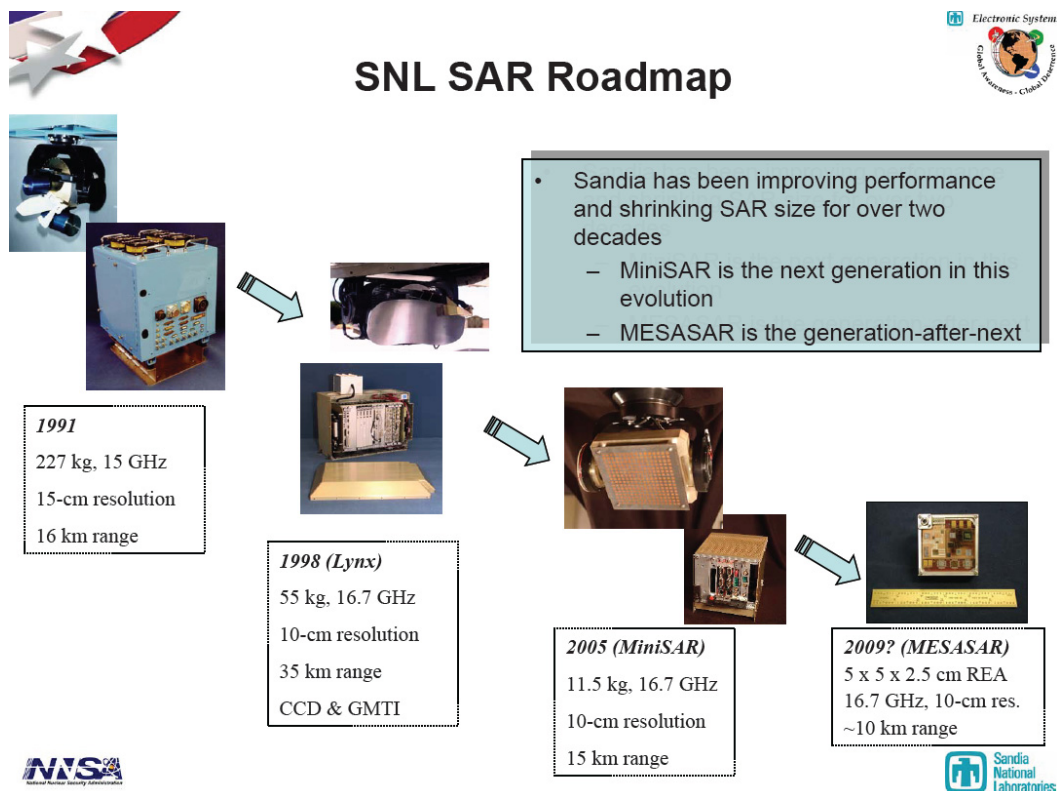
Den nya teknik vi föreslår i den här rapporten måste uppfylla många krav för att vara ett intressant alternativ till dagens teknik. Exempelvis behöver den vara användarvänlig i termer av storlek, vikt, effektförbrukning, smidighet och robusthet, i kombination med en låg kostnad för inköp och underhåll. Projektet har varit inriktat mot att även belysa denna kravbild.

2.2 Relaterad verksamhet i omvärlden

Intresset för multifunktionsantennsystem är stort i omvärlden. En attraktiv teknisk lösning för att realisera systemen är AESA (Active Electronically Scanned Antennas), där många antennelement bildar en s.k. gruppantenn (array antenna) [1]. Antennloben styrs på elektrisk väg, genom individuella fasvridare kopplade till alla antennelement. Lobstyrningen blir därmed mycket snabbare och flexiblere jämfört med mekaniskt styrda lobar. Flera samtidiga lobar och flera samtidiga funktioner, exempelvis radar och kommunikation, kan också realiseras genom korrekt fasvridning av respektive element. Exempel på befintliga AESA-system ges i [2-4].

En tydlig trend går mot mindre, lättare, kompaktare och energisnålare system [5], detta för att systemen ska kunna integreras på små plattformar, exempelvis små Unmanned Airborne Vehicles (UAV).

Sandia National Laboratories är en av de ledande aktörerna på forskning inom AESA-området. Figur 1 är från 2005 och illustrerar deras tidigare framtagna SAR (Syntetisk AperturRadar) system och den förväntade utveckling Sandia ser [6]. Målet är att utveckla "ständigt närvarande" multifunktionssensorer för taktiska plattformar, för ex. UAV:er.

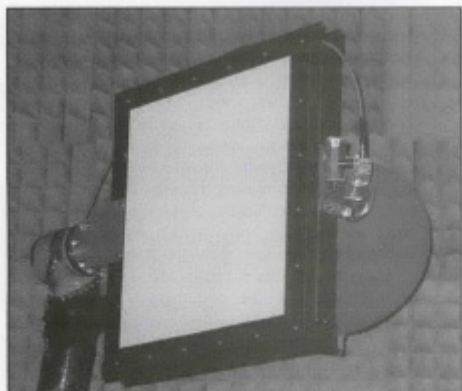


Figur 1: Utveckling av storlek och prestanda av SAR-system från Sandia National Laboratories. En kraftig reducering av storlek har skett utan bekostnad av prestanda [6].

Prototyperna i figur 1 innehåller enbart SAR-funktionen. I ett multifunktionssystem kombinerar man vanligen SAR med GMTI-funktion (Ground Moving Target Indicator), dock skulle GMTI med flera kanaler kräva multipla delaperturer vilket skulle göra systemet både större och tyngre. Mot bakgrund av detta bedriver Sandia forskning för att utveckla ett SAR/GMTI-system med en RF-MEMS baserad passiv ESA (Elektriskt Styrd Antenn) kallat *MESASAR*. Ett mål är att radikalt minska antalet nödvändiga komponenter såväl som förlusterna i systemet för att sänka systemets kostnader, vikt och effektförbrukning. Genom att ersätta en mekaniskt styrd antenn med en elektriskt styrd antenn med RF-MEMS (Micro Electric Mechanical System) baserad fasstyrning tillsammans med GaN-MMIC förstärkare förväntar Sandia att få ned vikten för ett komplett system till 3-7 kg [6]. Detta skulle vara tillräckligt låg vikt för en mindre taktiska UAV:er att bära.

Den första implementeringen med s.k. passiva subarrayer, se kapitel 4.4, för Ka-bandet med RF-MEMS fasvidare för ESA radarapplikationer har nyligen presenterats av University of Michigan (USA) [8]. Ett liknande koncept studeras vid FOI [9]. Figur 2 visar en realiserad 0.4m² stor AESA antenn vid X-band med RF-MEMS-baserad fasstyrning. Till vår kännedom är detta den största realiserade antennen med RF-MEMS baserad fasstyr-

ning. Hela 25000 MEMS-switchar ingår och tillförlitlighetstest har visat på mer än 900 miljarder fungerade switchningar under en 18 månader lång testkampanj [7].



Figur 2: En realiserad AESA antenn vid X-band med RF-MEMS-baserad fasstyrning [7].

2.3 Projektmålsättning

Målsättningen i projektet Flexibla mikrovågssystem har varit att studera nytta och realiserbarhet för flexibla mikrovågsbaserade antensystem på små plattformar genom att belysa systemen från flera olika infallsvinklar och systemnivåer, från behovsbilden via systemnivåer till identifiering av nyckelkomponenter.

Projektverksamheten har varit uppdelad i fem områden med målsättningarna enligt:

Värdering. Utredda nyttan av en kompakt flerfunktionsantenn i definierade typsituationer. Utredda förutsättningar att kombinera SAR/GMTI och 3D-radar.

Simulering och signalbehandling. Simuleringsstudie mot inverkan av subarrayarkitektur och delantennuppdelning (grupper av element lobformas först analogt till "delantenn" och signalen från varje delantenn digitaliseras) för systemprestanda i typsituation. Studie av GMTI och STAP för detektering av markmål. Vidareutveckla MFA-simulatorens mot MOSART/SEMARK/MEMS4MMIC-projekten.

Systemteknik 3D radar. Utredda systemprinciper och ge förslag på utformning av nedåttittande 3D-SAR (i samarbete med ONERA (FR)). Simulering av nedåttittande 3D-SAR bilder intressanta för urban miljö. Utred förutsättningar att utforma 3D-radar för detektion av rörliga mål. Ta fram förslag på ett experimentsystem för nedåttittande 3D-SAR.

Arkitekturer för kompakta flerfunktionsantennar. Utveckla lågförlustiga, MEMS-baserade fördelningsnät (i samarbete med Uppsala Universitet och VTT (Fi)). Framtagning av avstämbare LNA. Utredda och ta fram förslag på energieffektiva radararkitekturer för SAR/GMTI/Se & undvika funktioner för taktisk UAV som minimerar antal kanaler och effektförbrukning (i samarbete med TAIS-COSMOS projektet).

Konform antennteknik. Ta fram realiseringsförslag till fasetterad konform antenn. Studie av antennplacering på typplattformar med hjälp av VISCA-verktyget. Tillverkning och utvärdering av fasetterad konform antenn. Värdera fasetterad konform antenn. Studera skillnader i antensystemprestanda vid lobformning med idealiserade antennegenskaper jämfört med experimentellt uppmätta data. Bedömning av generalitet i resultaten. Studera konforma antenner på plattformar, utstyrning, täckning (smygfarkost, taktisk UAV).

3 Projektets nytta

3.1 Nyttan för försvaret

Flexibla multifunktionssystem med allväderskapacitet som kan utföra flera olika uppgifter bidrar till att möta den kravbild som styrkor i internationella insatser har. Potentiella fördelar och nackdelar med ett mikrovågsbaserat multifunktionssystem ur såväl ett taktiskt/operativt perspektiv som ett tekniskt- och funktionalitetsperspektiv har behandlats i [10]. Inte minst i internationella operationer kan multifunktionssensorer vara attraktiva då antalet sensorer som förbanden kan medföra från Sverige är begränsat [11]. Också för små sensorbärare med begränsad tillgång på utrymme, lastförmåga och energiförsörjning, som UAV:er, ter sig multifunktionssensorer som fördelaktiga [12]. Ett sådant system skulle kunna användas för olika uppdrag, eller för att variera taktiken. Samtidigt kan vikt och storlek hos nyttolasten reduceras. Rekonfigurerbar sensorteknik kan också minska behovet av hårdvaruuppgradering eftersom egenskaperna hos hårdvaran är anpassningsbar och en ändring i mjukvara kan vara tillräckligt. För kostnadsminimering fordras också att så mycket sensorhårdvara som möjligt kan delas gemensamt mellan olika sensorsystem, och rekonfigurerbar sensorteknik kan vara nödvändigt för att maximera dessa möjligheter.

Multifunktionssystem på RF-området attraherar ett mycket stort internationellt intresse. Det finns stora möjligheter till internationell samverkan inom området, och flera av de förslag som förts fram inom EDA, European Defence Agency, för R&T Strategy and Roadmap behandlar multifunktionssystem på RF-området. Projektet har ett stort kontaktnät inom området och goda möjligheter att med uppbyggd kompetens och erfarenhet medverka i gemensamma projekt. I nuläget deltar projektet i EDA-projektet SPREWS (Signal Processing for Radar and Electronic Warfare Systems).

Den kunskapsuppbyggnad som skett inom projektet kommer kunden till del framför allt genom:

- Kunskapsöverföring till FMV och försvarsindustri genom FMV och forskningsfinansierade program, se kapitel 3.2.
- Projektets forskare har genom omfattande samverkan med försvarsindustri, universitet och forskningsinstitut vidareutvecklat ett nationellt och internationellt nätverk inom forskningsområdet.
- Projektets resultat har dokumenterats i rapporter och publikationer där forskningskvalitet säkrats genom nationell och internationell publicering, däribland Antenn-06, RVK-08, European Microwave Week, Asian-Pacific Conference och European Workshop on Conformal Antennas.

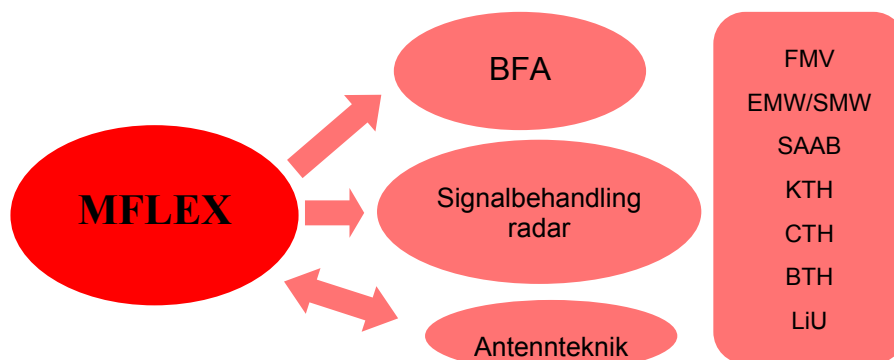
Tabell 1 innehåller en översikt av projektets publikationer. En detaljerad förteckning finns i kapitel 7.

Publikationstyp	Antal
Rapporter/Memo	20
Konferensartiklar	10

Tabell 1: Projektets publikationer.

3.2 Samverkan med försvarsmyndigheter, försvarsindustri och högskola

Projektet deltar i nätverk och samarbeten inom den militära sfären men också inom den civila sfären för att även få tillgång till den omfattande civila forskningen. En omfattande samverkan och tekniköverföring med FMV, försvarsindustri, forskningsinstitut och universitet har bedrivits genom separata beställningar utöver FM-uppdraget, vilket illustreras i figur 3.



Figur 3: Illustration av projektets nationella samverkan med försvarsmyndigheter, försvarsindustri och högskola.

En nära samverkan har skett med det FMV-finansierade projektet BFA (Radarsystem och bredbandiga flerfunktionsantennar) [13], vilket inneburit samverkan med försvarsindustrin (SAAB) och UoH (KTH och CTH).

En medarbetare har i egenskap av adjungerad professor vid Linköpings Universitet handledt en doktorand finansierad externt inom området fasetterade konforma antenner.

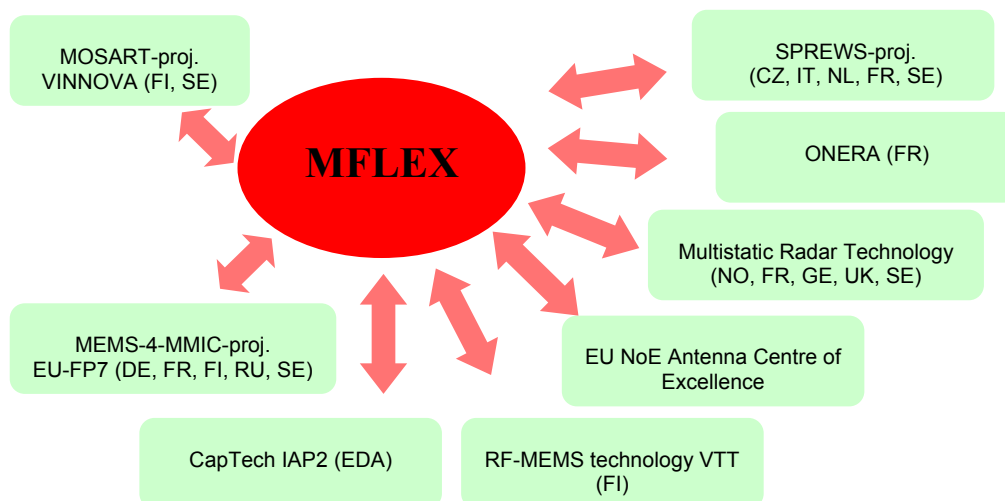
En medarbetare doktorerar vid Blekinge Tekniska Högskola, BTH, inom ämnesområdet signalbehandling för multifunktionsantennar och en av projektmedlemmarna är adjungerad forskare vid Uppsala Universitet.

3.3 Internationellt samarbete

Projektet har en omfattande internationell samverkan i olika former och projekt, vilket illustreras i figur 4.

Projektmedarbetare har medverkat i framtagandet av ett EDA CapTech förslag, benämnt SPREWS (Signal Processing for Radar and Electronic Warfare Systems) tillsammans med SMW, SAV och dess europeiska motsvarigheter.

Projektet har ett informationsutbyte med ONERA i Frankrike inom 3D-SAR teknik. ONERA arbetar med antennteknik och har tillgång till en flygande plattform i form av en motorseglare. FOI bidrar med komponent- och delsystemnära kunskap. Informationsutbytet ger ett tydligt mervärde för båda parter.



Figur 4: Illustration över projektets internationella samarbeten och informationsutbyten.

Kontakterna finns med det finländska forskningsinstitutet VTT, som är internationellt framstående inom RF-MEMS området, vilket har lett till att vi har kunnat ta del av deras MEMS-process där tillverkning av våra MEMS-konstruktioner kunnat utföras, se kapitel 4.4.

Projektet har medfinansierat det Nordiska samarbetsprojektet NAME.

I EU projektet Antenna Centre of Excellence har projektmedarbetare deltagit i tre arbetspaket.

Projektet har nära samarbete med EU FP7-projektet MEMS-4-MMIC (FP7-ICT-2007-2) inom området arkitekturer och RF-frontend teknik och vi ansvarar för medfinansieringen av FOIs del inom projektet, se kapitel 4.4.

Inom området arkitekturer samarbetar projektet även med det VINNOVA-finansierade (Svenska delen) MOSART-projektet.

3.4 Resultatspridning

Projektet har genomfört ett antal aktiviteter för resultatspridning och nätverksbyggande, nationellt och internationellt under följande evenemang:

- Gemensam monter med Microwave Road på European Microwave Week, Amsterdam, 27-31 oktober, 2008
- Workshop antennteknik för fordon Lindholmen, Göteborg, maj, 2008
- Seminarium vid ICT-Sweden i Kista, 18-23 sep, 2006
- Seminarium på mässan Elektronix i Göteborg, 5- 7 sep, 2006
- Seminarium för studenter vid LiU, 3 maj, 2006
- Seminarium på FMV, 21 nov, 2006
- Seminarium för DSTL, Storbritannien, 2006
- Nio presentationer vid konferenser, se förteckning i kapitel 7.3

4 Projektverksamhet och forskningsresultat

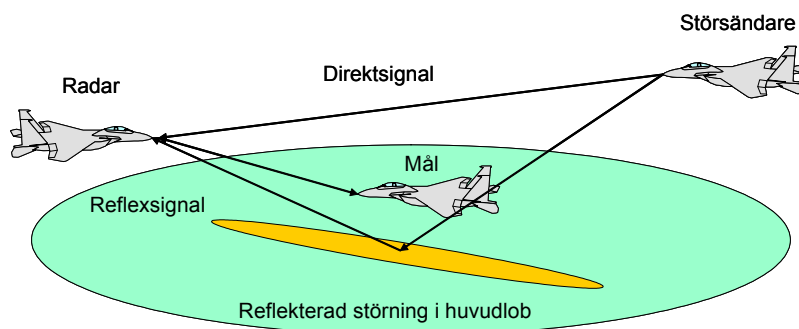
4.1 Systemanalys

Spaning från små farkoster som UAV:er eller stridsfordon kan ge ett stort mervärde för exempelvis en stridsgrupp eller insatsstyrka. Rätt utrustade kan de ge bättre informationsläge, snabbare målinvisning och säkrare verkansverifiering. Därför inkluderar program som det amerikanska armens Future Combat System (FCS) en stor roll för sensorbestyckade taktiska UAV:er, obemannade markfordon (UGV) och stridsfordon. Det har också inneburit en stark drivkraft för forskning och utveckling av nya sensorer för dessa farkoster. Radar har den unika förmågan att kunna spana genom dis, damm, rök, dåligt väder, mörker med hög yttäckning.

Utvecklingen domineras av AESA-teknik med aktiva antenner med elektrisk styrning [5]. Forskningen visar omfattande framsteg inom kompaktare antenner, miniaturiserad digital och RF-elektronik, kraftfullare processorer med lägre effektförbrukning och resurssnål signalbehandling. Från att AESA-tekniken fokuserat på större radarsystem tillämpas den nu för att förverkliga mycket små radarsystem. Tekniken ger flera fördelar. AESA-teknik är närmast en förutsättning för simultan eller tidsdelad multimodradar med multifunktion, tex simultana SAR och skannande GMTI moder med höga prestanda.

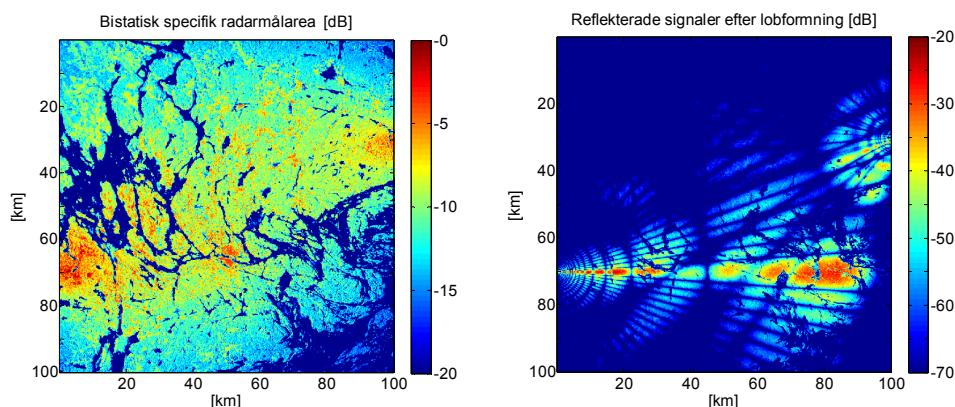
4.1.1 Tillämpningsexempel

Som ett exempel på AESA-teknik för flygande farkoster har det studerats en duell mellan radar och störsändare när markreflektad störning kan förekomma och då båda plattformarna använder AESA-teknik [14]. Reflektad störning har uppmärksammats på senare tid som ett hot mot radar med gruppantennor med låga sidolobor. Speciellt uttalat är hotet vid flygburen störsändare mot flygburen radar som riktar sin huvudlob mot mark eller sjö för att få låghöjdstäckning. Radarn får då också huvudlobsklotter från marken. Ett exempel på scenario visas i figur 5.



Figur 5: Duellscenario för reflekterad störning för flygburen radar och störsändare.

Samverkande funktioner har studerats för bredbandiga gruppantennor i samband med mark- eller sjöreflexer. Konceptet har vidareutvecklats i [15] där vi undersökt lobformning i både den störda radarplattformen och den störande telekrigplattformen. Båda har gruppantennor med digital lobformning för att generera godtyckliga lobformer. De befinner sig över ett markklotterområde enligt vänstra bilden i figur 6 med bistatiska markreflexer. Reflekterade signaler till radarn eller störsändaren kan då beräknas med hänsyn till lobformning vid sändning, vågutbredning mot reflektionsarean, bistatisk reflektion, vågutbredning från reflektionsarean och lobformning vid mottagning.



Figur 6: (Vänster) Bistatisk specifik radarmålärea beräknad från en uppmätt monostatisk SAR-bild. (Höger) Reflekterade signaler efter lobformning i både radar och störsändare.

Radarantennen lobformas vid sändning mot en önskad spaningsriktning. En viss del av huvudloben och flera sidolober reflekteras i marken och tas emot av störsändarens inmätningsskannare. Störsändarens digitala gruppantenn analyserar reflektionsbilden och kan bilda optimalt digitalt lobformade störsignaler mot reflektionsarean för att få bästa störverkan i radarn. Ett exempel på lobformning av störsändaren mot markreflexer visas i högra bilden i figur 6. En optimal lobformning bildas då gruppantennens excursionsvektor är proportionell mot den komplexkonjugerade mottagna signalvektorn. Radarantennen lobformas vid mottagning för att undertrycka både direkt störsignal och reflekterade störsignaler i sidolobsområdet men de reflekterade störsignalerna i huvudloben finns kvar. Den mottagande radarn kan inte motverka den markreflekterade störningen enbart genom adaptiv lobformning utan måste dessutom utnyttja filtrering i avstånd och doppler. En metod som skulle kunna användas är utvecklad vid FOI och bygger på en skattning av reflektionens impulssvar med inversfiltrering under ett kort tidsintervall med en ytterligare minstakvadratskattning för det trösklade impulssvaret.

4.1.2 Analys av radarförmågor under en internationell insats

Den här analysen (beskrivs mer utförligt i leverans 19 i kapitel 7.2) utgår från scenarier och typsituationer för internationella insatser som har tagits fram i tidigare FoRMA-studier [16], [17], [18]. Ett antal olika uppgifter och funktioner kan definieras utgående från typsituationerna i scenarierna. Dessa uppgifter och funktioner kräver underrättelsestöd av olika slag som baseras på data från radarsensorer.

Behoven av spaningsinformation för olika typsituationer vid internationella insatser kan uppdelas efter olika skeden och insatstyper. De internationella insatserna beskrivs enligt tidigare scenarier som delas upp i olika skeden. Vi har identifierat fem olika skeden som beskrivs av:

- i. Inledande uppbyggnad av lägesbild och styrketillväxt samt planering av operationen.
- ii. Transport till operationsområdet och etablering av brohuvud.
- iii. Genomförande av beslutade operationer och uppgifter av olika slag för att genomföra själva missionen.
- iv. Avveckling och hemtransport från operationsområdet.
- v. Uppföljning av lägesbild och erfarenhetstillväxt efter operationen.

Skede (i) och (v) liknar varandra till genomförande och resursbehov och samma sak gäller skede (ii) och (iv). Skede (iii) består av de direkta insatserna inom operationsområdet som kan ha mycket skiftande karaktär.

Behoven av spaningsinformation beskrivs utgående från de olika uppgifter som vanligtvis förekommer i de olika skedena vid internationella insatser. Uppgifterna kräver underrättelsestöd av olika slag från radar och andra sensorer och innebär ett brett spektrum av krav på räckvidd, täckning, upplösning och reaktionstid mot olika måltyper. Det mest besvärliga skedet är givetvis skede (iii) där uppgifterna är mycket mångskiftande, t.ex:

Skydda område och befolkningsgrupp. Uppgiften innebär att bevaka ett område, detektera fientliga stridshandlingar mot området och bekämpa fientliga styrkor som utför stridshandlingar. Detta innebär att våra sensorer och motverkanssystem måste vara tillräckligt effektiva för att vara avskräckande och avhålla fienden från stridshandlingar för att skapa ett effektivt skydd. Skydda område och befolkningsgrupp kräver bevakning av ett geografiskt begränsat område inom stad, land eller kust. Skyddet måste omfatta beskjutning utifrån med handeldvapen, artilleri, robotar och bomber men även självmordsbomber och försåtmineringar. Transporter och rörelser för fientliga styrkor måste detekteras. Beskjutning och andra fientliga insatser måste motverkas.

Detektera överträdelse av gräns. Uppgiften innebär att bevaka ett utsträckt gränsområde inom stad eller land, detektera fientliga förflyttningar och stridshandlingar över gränsen och bekämpa den sida som utför stridshandlingar. Vår bevakning och eventuella bekämpning riktar sig mot båda sidor av gränsen för att avskräcka de fientliga styrkorna från gränsöverträdelse. Viktigt är att på ett säkert sätt kunna dokumentera alla överträdelser, var de skett, överträdelsetyp och vem som gjorde överträdelser. Olika typer av transporter och trupprörelser över gränsen måste detekteras. Beskjutning och andra fientliga insatser över gränsen måste detekteras och motverkas.

Förhindra stridshandlingar. Uppgiften innebär att bevaka fientliga styrkor, detektera stridshandlingar och bekämpa den styrka som utför stridshandlingar. En viktig funktion är att dokumentera eventuella stridshandlingar för senare juridiska processer. För att förhindra att stridshandlingar uppkommer behöver man kunna detektera förberedelse till stridshandling och kunna förvarna för detta. Att kunna detektera skott, bestämma skyttens eller skjutande plattforms läge samt dokumentera detta är också en viktig uppgift.

Egenskydd och navigering. Uppgiften innebär att man skall kunna detektera all slags beskjutning mot den egna gruppen, bestämma skyttens läge samt kunna bekämpa skytten. Det kan röra sig om många olika slags beskjutning från handeldvapen till luftvärns- och pansarbrytande robotar. Navigering syftar till att i dåligt karterade områden fastställa den egna positionen relativt kända fixpunkter samt att i förväg hitta hinder längs den planerade vägen.

Miljöövervakning och kartering. Uppgiften innebär att från visst avstånd snabbt kunna kartera en delvis okänd terräng, vägar och annan infrastruktur. Sådana kartor har kanske aldrig skapats i det intressanta området eller så är de av för dålig kvalitet. Miljöövervakning handlar om att kunna hitta avvikelser från normala förhållanden t.ex torka, över- svämning, utsläpp av olja, gas eller liknande.

Bygga upp underrättelsebild. Uppgiften innebär att samla in information från många olika källor under en längre tid, t.ex från sensorer och underrättelserapporter, och associera dessa till varandra så att mönster kan hittas. En stor mängd olika typer av information kan behövas t.ex hur narkotika-grödor växer, när de mognar, hur, var och när förädling och transporter sker etc.

Utgående från den skissade analysen av uppgifterna så definierar man ett antal sensorförmågor. Därefter föreslår man ett antal sensorsystem som försöker uppfylla dessa förmågor. Då upptäcker man att en del av förmågorna är svåra att uppfylla med dagens sensorteknik, vilket ger ett bra underlag till forskning och utveckling. En lite djupare sådan analys finns

gjord i [19] och vi pekar här därför endast på ett tillämpningsfall som pekar ut två olika radarsensorer.

Tillämpningsfallet är egenskydd av en fordonskolonn. Detta skydd kan delas in i 3 olika zoner: Långt bort och över lång tid för förberedelse, De närmaste kilometrarna utmed transportvägen för förvarning och vägval samt sist men inte minst närmast runt fordonen för detektion av skott, minor och IED:er. Ett bra skydd kräver bra sensorer eller sensor-kombinationer i samtliga zoner. I vårt fall är vi främst intresserade av mikrovågssensorer varför vi lyfter fram dem.

Sensorer i den yttre zonen är främst olika typer av SAR-sensorer som används till en stor mängd uppgifter, där vår ingår. Lägre frekvenser är att föredra eftersom vi då tränger igenom vegetationen.

Sensorer i mellanzonen är typiskt bärbara av UAV:er som är små nog att kunna medföras och opereras av det egna förbanden. UAV:erna skall spana längs med färdvägen de närmaste kilometrarna framför kolonnen. Det krävs flera UAV:er för att samtidigt ge snabb förvarning och god uppfattning om hotet. Det är denna sensor som legat till grund för flera studier i projektet MFLEX. Vi har skissat på en kombination av SAR och GMTI som använder sig av höga frekvenser för att erhålla hög upplösning och små dimensioner.

Den innersta zonen kräver sannolikt flera olika sensorer. Radarsensorer lämpar sig för att detektera beskjutning med allt från finkalibrig eld till granatkastare, raketer och robotar. En liten relativt billig flerkanalig gruppantennradar placerad på ett eller flera fordon skulle kunna lösa skottdetektering. Utförandet blir en kompromiss mellan inmättningsnoggrannhet på den ena sidan och litenhet samt kostnad och snabbhet på den andra.

Det är viktigt att samtliga sensorer i det skissade fallet samverkar med varandra, vilket också beskrivs i [19]. Eftersom kopplingen mellan de olika sensorerna kan vara olika hård så skiftar även samverkansformerna. Detta bör utredas i mer detalj i fortsatta studier inom området.

4.2 Simulering och signalbehandling

4.2.1 Status MFA-simulatorn

Under projektet har vi utvecklat en simulator för att studera multifunktionsantennsystem (MFA). Syftet är att kunna utvärdera den inverkan som val av systemarkitektur och komponentprestanda kan ge i termer av systemprestanda.

Simulatoren är i grunden baserad på en kod utvecklad för datafusionsprojektet Dfark [20]. Förutom en del buggfixar och smärre förändringar i schemaläggaren, samt anpassning av koden till striktare C++-standard som krävs för moderna kompilatorer har det huvudsakliga bidraget varit att införa en sensormodell som beskriver ett multifunktionssystem.

MFA-simulatoren har modeller för radar, kommunikation, signalspaning samt brusstörning mot radar. Tyngdpunkten har legat på radarmodellerna medan de övriga modellerna är tämligen idealiserade och tar bara hänsyn till signal-till-brusförhållandet (SNR) givet antagandet att mottagaren är ett matchat filter till den utsända vågformen, vilket framför allt i signalspaningsfallet kräver mycket stora resurser.

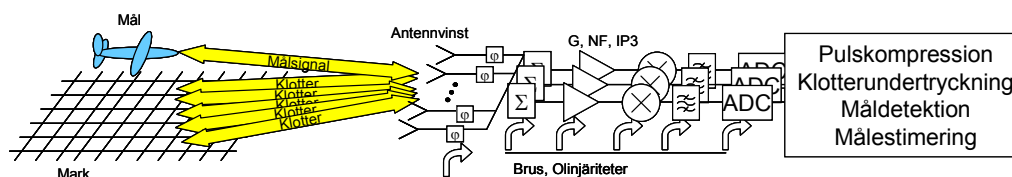
Det finns två modeller för radar i simulatoren, dels en grov modell som är baserad på för-enklade samband mellan detektionssannolikhet, falsklarmsrisk och SNR givet vissa antaganden om målets fluktuationer och detektionsprinciper, och dels en detaljerad modell för radarsignalbehandling från ”Digital Beamforming Toolbox” (DBT) [21] där signalbehandling utförs på en simulerad mottagen radarsignal som genereras med hänsyn till utsänd radarpuls, antennarkitektur, radarmålytor, målhastigheter, klotter och brus.

Fördelen med den detaljerade modellen är att det går att pröva och jämföra olika algoritmer för signalbehandlingen, och det är på sätt och vis en enklare modell än den grova eftersom antaganden om detektionen inte behöver göras utan de ges implicit av den aktuella detektionsalgoritmen.

Nackdelen med den detaljerade modellen är att den är beräkningskrävande. Omgivningen och systemet måste beskrivas i sådan detalj att det ger en relevant mottagen radarsignal. Dessutom är själva detektionsalgoritmen i sig beräkningskrävande. I praktiken innebär det att endast ett fåtal detaljerade beräkningar hinns med, även om beräkningarna begränsas till några få tidsluckor framför och bakom målet.

En enskild simulering skall oftast dessutom betraktas som ett försök i en större Monte Carlo-Simulering, dvs. det kan krävas att samma scenario körs upprepade gånger (ibland 100-tals gånger) för att samla statistik så att det blir möjligt att extrahera önskade egenskaper, t.ex. upptäcktsavstånd, detektionssannolikhet på givet avstånd, eller noggrannhet i positionsbestämning till viss konfidensgrad.

I figur 7 visas ett blockschema över den detaljerade radarsimuleringen för ett mål i närvaro av markklotter. Den belysta delen av marken delas in i fasetter där varje fasett tilldelas en viss radarmålyta, sedan adderas bidragen från alla fasetter till den tidsluckan i radarsignalen som svarar mot avståndet till fasetten med hänsyn tagen till fas och amplitud för respektive antennelement. När signalen sedan propagerar genom mottagaren påförs förluster/förstärkning (även icke-linjär kompression) från de ingående komponenterna och även brus adderas.



Figur 7: Blockschema över den detaljerade radarsimuleringen för ett scenario där antensystemet har delats in i analoga delantennar.

Signalen representeras som en tredimensionell matris i Matlab där dimensionerna svarar mot avståndsfälla, antennkanal, samt pulsnummer inom pulståget som kan behandlas koherent. Matrisen transformeras även till en ekvivalent struktur där dimensionerna svarar mot avståndsfälla, riktning, samt Dopplerhastighet. Sedan tillämpas signalbehandlingsalgoritmer och detektionsalgoritmer för att detektera och karakterisera eventuella mål. Resultatet av måldetektionen och estimerade målparametrar följer direkt ur detektionsalgoritmen.

Den grova modellen ger ett SNR-värde som används för att beräkna detektionssannolikheten givet en specificerad falsklarmsrisk. Sedan slumpas utfallet detektion/icke-detektion i enlighet med den beräknade sannolikheten. Om det verkligen blev en detektion ges de uppskattade målparametrarna som de sanna värdena plus en störningsterm som funktion av bl.a. aktuellt SNR och typ av målparameter. Skillnaden mot figur 7 är att endast kvoten mellan signalenergi och brusenergi beräknas, samt att formler som beskriver sannolikheten för detektion används istället för att detektionsalgoritmerna tillämpas på syntetiska radardata.

Om markklotter förekommer så betraktas även det som brus i mottagaren i den grova modellen, vilket är en förenkling eftersom klottret till sin natur är signallikt, och klotterundertryckningen specificeras som en konstant för antensystemet trots att den borde vara riktning- och hastighetsberoende.

Nedan sammanfattas de två radarmodellerna i några korta punkter:

Detaljerad radarmodell

- Dela in marken i facetter
- Addera mål- och klottersignal från facetterna till rätt tidslucka i den mottagna radarsignalen
- Utsätt signalen för förstärkning/förluster i mottagarkedjan samt addera brus för varje komponent
- Tillämpa radarsignalbehandling
- Tillämpa detektionsalgoritmer
- Uppskatta målparametrar

Grov radarmodell

- Beräkna SNR och signal-till-klotterförhållande
- Beräkna detektionssannolikheten
- Slumpa detektion/icke detektion
- Addera störningsterm till de sanna målparametrarna

Ett scenario som skall simuleras definieras med hjälp av en uppsättning indatafiler. I en övergripande fil definieras de inblandade plattformarnas rörelsebanor, radarmålytor och eventuella sensorlast. Radarsensorer som inte är av MFA-typ definieras med några få parametrar (uteffekt, pulsrepetitionsfrekvens, bärvåglängd, antennvinst, pulskompressionskvot, pulslängd, brusfaktor, pulsantal, samt tittriktning).

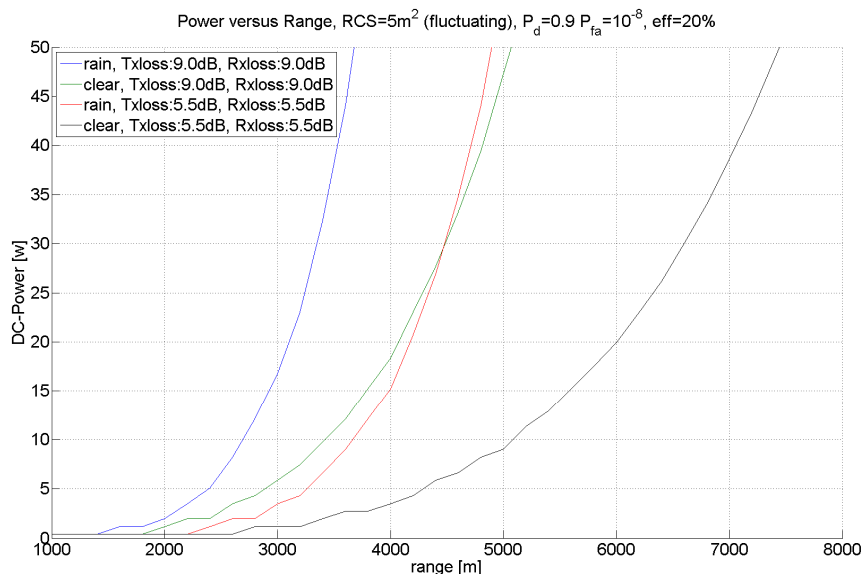
För MFA-sensorer definieras även systemarkitekturen och de ingående komponenterna som en nätlista med alla mellankopplingar och komponentegenskaper, samt dessutom antennelementens placering, elementdiagram och indelning i delantennar. Systemet kan delas upp i flera resurser som kan allokeras oberoende av varandra för olika funktioner, de enda begränsningarna är att samtidig sändning och mottagning inte är tillåten och att varje resurs endast kan användas för en sensoruppgift i taget.

För enkelhets skull används schemaläggaren för själva simulatoren även som schemaläggare för resurserna i MFA-sensorn. En sensoruppgift får utnyttja tilldelade resurser under en viss tid, och innan uppgiften avslutas begär den tid och resurser för nästa aktivitet, från schemaläggaren som i sin tur letar upp en tidslucka där resurserna är tillgängliga. Schemaläggaren flyttar aldrig på redan schemalagda uppgifter vilket antagligen skulle göras i ett verkligt system där sensoruppgifterna har olika prioritet. I MFA-simulatoren hanteras istället prioritet genom att varje uppgift endast begär sin procentuella andel av de totala resurserna, där andelen beror på i vilket användningsläge MFA-sensorn för tillfället arbetar i.

Användningslägena definieras som en tabell med en rad för varje användningsläge och en kolumn för varje sensoruppgift där den procentuella andelen anges, sedan kan MFA-sensorn växla mellan de olika lägena när den får styrkommandon via kommunikationsuppgiften.

Sådana styrkommandon kan skickas t.ex. från ett moderfartyg till en utsänd UAV, då kontrolleras först att SNR för länken är tillräckligt bra för att meddelandet skall kunna gå fram, men det finns även möjlighet att ange meddelanden utan avsändare som ovillkorligt kommer att gå fram.

I figur 8 visas resultatet av en beräkning (med den grova radarmodellen) där simulatoren har använts för att verifiera beräkningar för se-och-undvika-funktionen på en UAV med ett tänkt MFA-system vid Ka-band med 1728 antennelement indelade i 108 mottagarkanaler. Överensstämmelsen visade sig vara mycket god mot det förväntade när det gäller krav på tillgänglig effekt för specificerad detektionssannolikhet. Avvikelseerna består främst i fluktuationer p.g.a. slumpmässigheten när det avgörs om en mätning resulterar i detektion eller inte, begränsat av antalet Monte Carlo-försök, samt i små skillnader i beräknad antennvinst eftersom olika tapering över antenntan användes.



Figur 8: Krav på tillgänglig DC-effekt för att erhålla 90% detektionssannolikhet vid olika avstånd samtidigt som falsklarmsrisken ej överstiger 10^{-8} för två olika systemkonfigurationer med olika brusprestanda ($NF=9$ dB samt $NF=5,5$ dB) i klart väder respektive i regn. Den grova radarmodellen har använts.

4.2.2 Detektering av rörliga markmål och störundertryckning

Detta avsnitt ger råd om design av radarsystem och dess signalbehandling för undertryckning av klotter och störning, speciellt vid detektering av rörliga markmål. Mycket av avsnittets innehåll är resultatet av vår forskning men en del kommer också från litteraturen.

En önskvärd sensorfunktion är GMTI (Ground Moving Target Indication) med radar för detektering och positionering av rörliga markmål. Huvudproblemet är att undertrycka klottret, radarekona från marken. En lämplig realisering av GMTI för rörlig radar är STAP (Space Time Adaptive Processing), som är samtidig filtrering i rummet (kanaler från en gruppantenn) och tiden (radarpulser), adapterad till klotteregenskaperna. En intressant fråga är hur många rumtidskanaler (kombination av en antennkanal och en radarpuls) som behövs för att undertrycka klottret. Man vill även dela upp problemet i hur många antennkanaler och hur många radarpulser som behövs. Med fler rumtidskanaler har signalbehandlingen fler frihetsgrader och kan lättare undertrycka klotter och annan interferens. Fler rumtidskanaler ger dock större beräkningsbörda och kräver fler träningsdata för att skatta klottrets egenskaper. Det är ofta svårt att få tillräckligt antal träningsdata av bra kvalitet. En gruppantenn har analoga delantennar om den bildar grupper av element som lobformas analogt till delantennar före varje delantenn digitaliseras.

- Antalet rumtidskanaler som behövs för undertryckning av klotter och annan interferens beror på den elektromagnetiska omvärldens "rikedom" och på ofullkomligheter i radarn själv. Antalet beror närmare bestämt på antalet sändare, sändarnas effekt, korrelering mellan sändarna och dekorreleringen under mättiden [22]. Dekorrelering kan uppkomma t.ex. på grund av brister i mikrovågselektroniken eller som följd av rörelse hos radar eller störare.
- Vid design av pulsdopplerradar med gruppantennar är det viktigt att veta hur många digitala antennkanaler som behövs och veta hur delantennar och antennpositioner ska väljas för att uppfylla de krav man har på användningen av radarn. Valet är komplicerat och bör göras innan designen av hårdvaran.

- Analoga delantennar reducerar komplexitet och kostnad för implementeringen av hårdvara och mjukvara. Färre antennkanaler, vilket brukar vara resultatet av delantennar, underlättar för signalbehandlingen men däremot kräver delantennar med stor separation en mer komplicerad signalbehandling. Antalet delantennar får inte vara alltför litet för att signalbehandlingen ska kunna fullgöra sin uppgift. Antennernas delantennar behöver väljas noggrant för att undvika gallerlober och ge ett stort momentant synfält. Mindre och närmare placerade delantennar ger större momentant synfält.
- Rumslig kalibrering av mottagarantenn och mottagarkanalerna på ett lämpligt sätt är nödvändig.

Leverans 17 i kapitel 7.2 innehåller en teknisk beskrivning av och första simuleringsresultat från ett datorprogram för studier av GMTI med STAP i UAV-buren radar med konformantenn. I huvudsak beräknar och visar programmet klotteregenskaper, SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio) och antenntdiagram som funktion av radarns antenn- och vågformsdesign och av klotter- och målmodeller. Datorprogrammet, som är skrivet i Matlab och använder DBT [21] är en bra resurs för fortsatt forskning om undertryckning av klotter, hett klotter och störning vid detektion och inmätning av rörliga mål på mark och sjö med flygande radar med konformantenn i monostatisk och bistatisk geometri. Simuleringsresultat givet en konformantennlösning lik den i kapitel 4.5, kan sammanfattas i följande punkter:

- Det finns klara fördelar med konforma antenner men sådana antenner är svårare att använda. Det krävs emellertid mer undersökningar för att kunna säga om och hur konforma antenner ska användas istället för linjära och plana gruppantennar.
- Vågformen spelar roll för prestandan. Speciellt gäller att höga avståndssidolober försämrar prestandan.
- Det verkar vara svårare att undertrycka markklottret med en konformantenn än med en linjär eller plan antenn. När konforma antenner används och/eller höga avståndssidolober finns, kommer klottret att uppta en större del av signalrummet och göra måldetektering och målpositionering svårare.
- För ULA (ekvidistanta element på en rak linje) som mottagarantenn gäller att en sidtittande (linjen i radarns rörelseriktning) ULA verkar ha bättre prestanda än en framåttittande (linjen tvärs radarns rörelseriktning). Detta är välkänt i litteraturen.

Hett klotter kallas det då signaler från störare reflekteras i marken eller på vattenytor. Klotter som är reflexer från radarn själv kallar man ibland ”kallt klotter” för att särskilja det från hett klotter. Analys av hur hett klotter påverkar radarn och hur det kan undertryckas ger följande slutsatser:

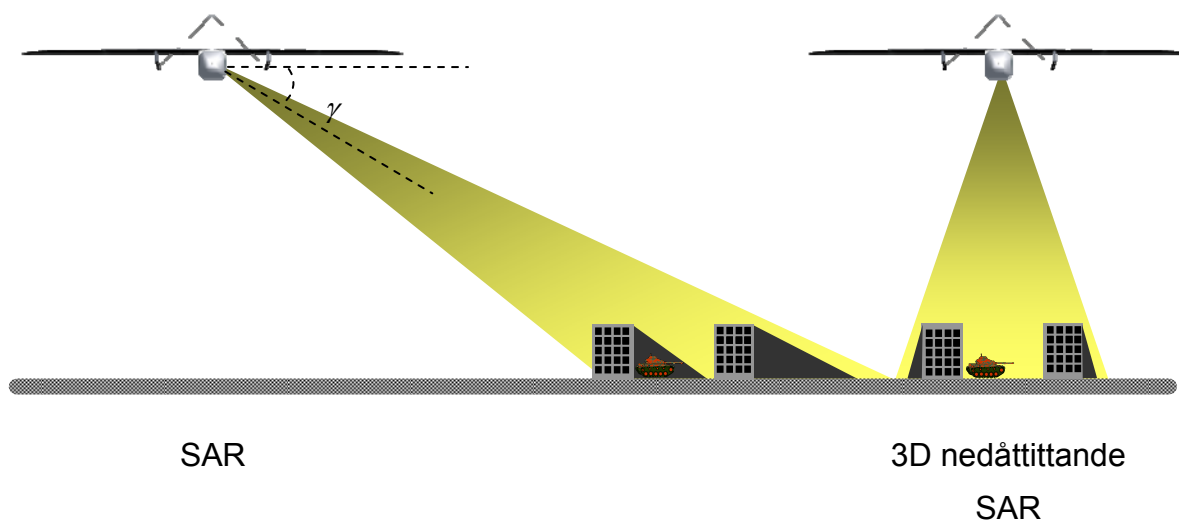
- Undertryckning av hett klotter är svårare för radarn än undertryckning av direktstörning då den kräver fler rumtidskanaler och mer träningsdata för att skatta det heta klottrets egenskaper.
- I en rörlig radar är som bekant det kalla klottret ett problem då det har en koppling mellan Doppler och riktning. Om det även finns hett klotter blir även det kalla klottret svårare att undertrycka. Därför är det intressant att studera hett klotter av fler skäl än undertryckning av just det heta klottret.
- För bästa resultat måste hett klotter undertryckas tillsammans med undertryckning av vanligt klotter och direktvägsstörning.
- Vi har speciellt studerat en metod för undertryckning av hett klotter och vi har fått mer insikt i hur metoden ska utformas.

- Kunskapen om hur hett klotter påverkar en radar kan också användas för effektiv störning av en radar, se avsnitt 4.1.1 Tillämpningsexempel och leverans 16 i kap. 7.2.

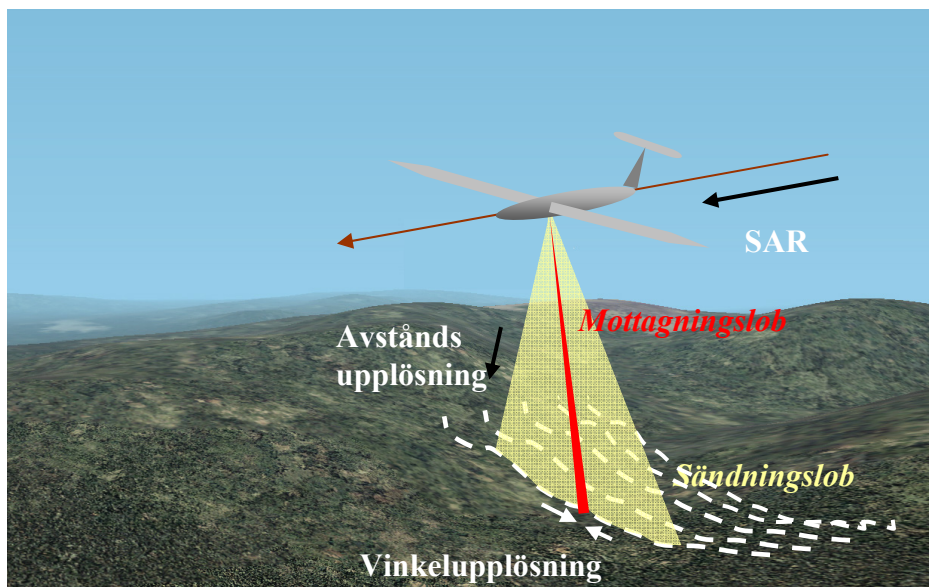
4.3 Systemteknik 3D-radar

4.3.1 Bakgrund

Vid radaravbildning av markområden är syntetisk aperturradar (SAR) en metod som är väderoberoende. En nackdel med traditionell SAR, särskilt vid militära operationer, är att den sidtittande geometrin gör att byggnader, träd o. dyl. kan skymma väsentliga mål. Detta är ett allvarligt problem, särskilt i stadsmiljö. I vanlig SAR går man också miste om direkt höjdinformation hos målen. Båda dessa nackdelar kan till stor del elimineras i en nedåttittande radar enligt figurerna 9 och 10. I en sådan fås upplösningen längs flygriktningen som i en normal SAR-processning, upplösningen i höjddledd genom radarns avståndsupplösning genom pulskompression och upplösningen tvärs flygriktningen genom antennens lobvidd som beror av storleken (realaperturen) i tvärsiktningen. I gengäld måste man flyga rakt ovanför målet och på inte alltför hög höjd om tvärsupplösningen ska bli tillräcklig. För att få tillräcklig tvärsupplösning får man också använda relativt hög frekvens för att minska kravet på antennlängd.



Figur 9: Geometri för markens belysning vid normal SAR (vänster) och 3D- avbildande nedåttittande radar (höger) (ej skalenligt).



Figur 10: 3D avbildande nedåttittande radar. Baserad på SAR principen i flygriktningen, på en styrbar gruppantenn tvärs flygriktningen och på pulskompression för avståndsinformation.

Exempel på den yttäckningskapacitet som ett 3D-avbildande nedåttittande radarsystem kan få för tre typiska storlekar av UAV:er, vid olika flyghöjd och pixelstorlekar, visas i tabell 2.

	Flyghöjd (m)	Flyghastighet (km/h)	Yttäckningshastighet (km ² /h)	Aperturlängd (m) för att få önskad upplösning i tvärsledd			
				Pixelstorlek 0.3 m		Pixelstorlek 1 m	
				94 GHz	35 GHz	94 GHz	35 GHz
Target UAV	300	80	28	1.6	4.3	0.5	1.4
Taktisk UAV	300 -1000	160	185	5	14.3	1.7	4.8
MALE	1000-3000	250	866	16	43	5.3	14.3

Tabell 2: Parametrar för några typiska UAV- plattformar med en 3D- avbildande nedåttittande radar med 60° synfält. Aperturstorlekarna utgår från arkitektur typ IV enligt figur 11. Aperturen med arkitekturtyp IV blir halva jämfört med de övriga tre arkitekturtyperna.

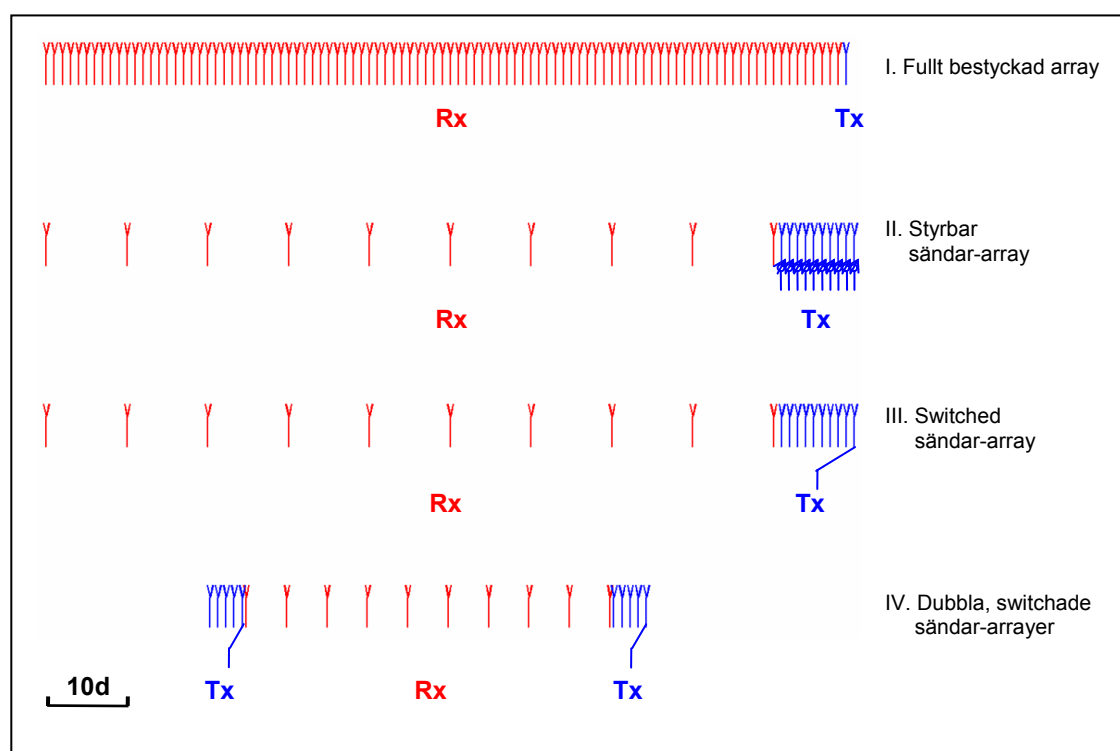
Det som ovan kallats element är i verkligheten en linjär subarray i flygriktningen vars längd, tillsammans med flyghastigheten, bestämmer nödvändig samplingstakt.

Nödvändig sändareffekt beror av flyghöjd och upplösning men är i de flesta fall mycket måttlig.

4.3.2 Arrayarkitekturer

En mycket viktig aspekt för gruppantennen är dess arkitektur, dvs. hur sändar och mottagarelement är arrangerade. Särskilt är det viktigt att hålla ner antalet av dessa eftersom kostnaden annars kan bli alltför stor. Samtidigt måste naturligtvis prestanda i termer av signal-brusförhållande och upplösning i avbildningen vara tillräckligt bra. Då avståndet till målen (flyghöjden) och uppdateringshastigheten (flyghastigheten) är begränsade och målen stationära eller åtminstone långsamma ger detta oss möjlighet att utforma arrayen på ett listigare sätt än som en vanlig tätpackad array.

Figur 11 visar fyra möjliga alternativ på arkitektur, en tätpackad mottagararray med många samtida lober och tre med utglesade element, vilka drastiskt minskar behovet av antalet element och komponenter.

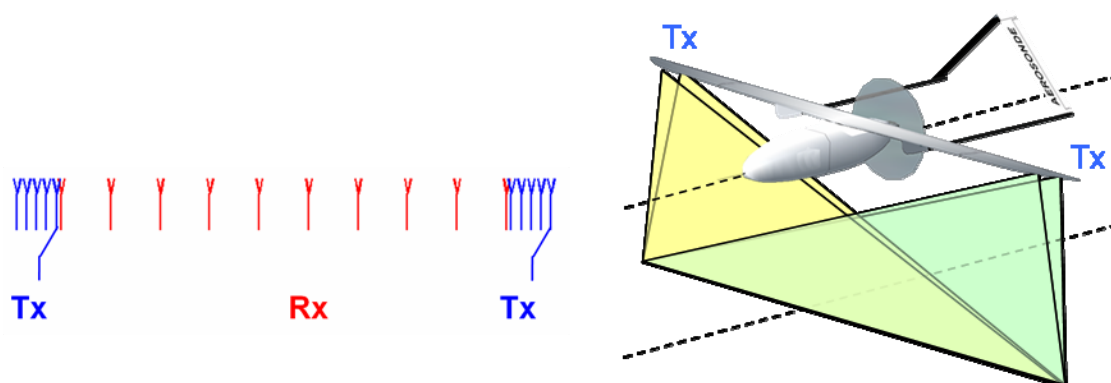


Figur 11: Illustration av fyra undersökta arrayarkitekturer. Mottagarantennen visas i rött och sändarantennen i blått. Varje mottagarantenn representerar en mottagarkanal. Figuren visar ett fall där en fullt bestyckad tät array, fall I, kräver 100 mottagarkanaler, medan en uttunnad array, fall II till IV, endast kräver 10 kanaler. Den fullt bestyckade arrayens längd är $99d$, där d är det "fundamentala" elementavståndet. Mottagarantennen i fall IV har 'halva längden' av fall I till III.

I en studie, leverans 8 i kapitel 7.2, har vi tittat på följande parametrar:

- antalet element hos mottagararrayen
- antalet element hos sändararrayen
- tid för att täcka ett stråk tvärs flygbanan
- resulterande signal-brusförhållande
- datainsamlingshastighet
- total arraylängd

En slutsats av denna studie är att arkitektur IV är den mest lämpade, praktiska och kostnadseffektiva för realistiska värden på upplösning och flyghöjd för typiska UAV:er, se tabell 2. Arkitektur IV består av en utglesad mottagararray mellan två kortare sändararrayer. Om antalet element i den tätpackade arrayen, typ I, är N_R blir antalet mottagarelement $\sqrt{N_R}$ och antalet sändarelement $\frac{1}{2}\sqrt{N_R}$ i vardera vingspetsen, se figur 12. Totala antalet element för olika flyghöjder, arraytyper och pixelstorlekar visas i tabell 3.



Figur 12: 3D-avbildande SAR koncept med en linjär array och switchade sändararrayer i vardera vingspets plus en uttunnad mottagararray däremellan.

	Antal Rx + Tx antenner			
	Pixelstorlek 1 m		Pixelstorlek 0.3 m	
	Flyghöjd 300 m	Flyghöjd 1000 m	Flyghöjd 300 m	Flyghöjd 1000 m
I. Fullt bestyckad array	405 + 1	1338 + 1	1338 + 1	4450 + 1
II. Uttunnad periodisk array med sändar-array	21 + 21	37 + 37	37 + 37	67 + 67
III. Switchad sändar-array	21 + 21	37 + 37	37 + 37	67 + 67
IV. Dubbla switchade sändar-arrayer	21 + 21	37 + 37	37 + 37	67 + 67

Tabell 3: Antal Rx + Tx antenner som krävs i de fyra alternativa arkitekturerna I – IV för två olika storlekar på upplösningselement (pixel) och två olika flyghöjder.

4.3.3 Simuleringar

4.3.3.1 Simulering av punktmål

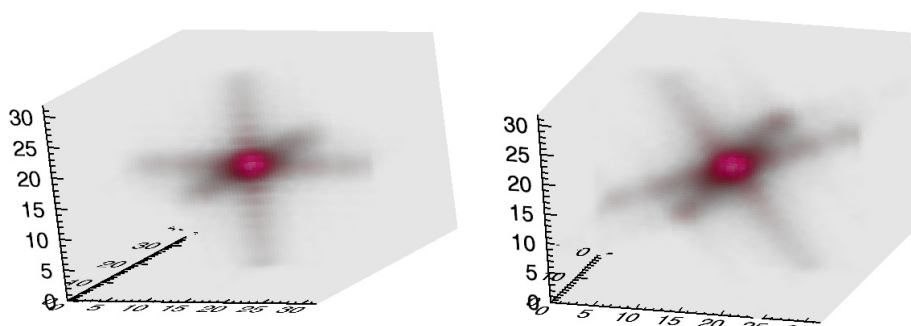
Punktmålsimuleringar har genomförts för att verifiera förmågan att generera radardata för bildgenerering med avseende på geometri, upplösning och sidolobsnivåer, för de fyra olika föreslagna arkitekturtyperna i figur 11. För en tänkt avbildad stråkbredd på ± 30 grader har

extremfallen, nadir (rakt uppifrån) och 30 graders infallsvinkel, simulerats. I simuleringarna har avståndet mellan antennerna maximerats, med begränsningen att inga gallerlober får skapas. Simuleringsparametrar och simuleringsresultat visas i tabell 4 respektive figur 13.

Simulerade impulssvar är konsistenta med den förväntade teoretiska 3D upplösningen på $0.25 \times 0.25 \times 0.25 \text{ m}^3$. Sidolobsnivåerna och upplösningen är lika för de olika arkitekturer, vilket är förväntat. De resulterande impulssvaren för arkitekturtyp IV är illustrerade i figur 13 i en $32 \times 32 \times 32$ pixels volym. Pixlarna är separerade med 0,125 cm och färgkodningen indikerar signalstyrkan. Vi kan se hur sidloberna sträcker ut sig i tre plan definierat av infallet, tvärs och i flygriktningen. En mer fullständig dokumentation finns i leverans 8 i kapitel 7.2.

Simuleringsparametrar:	
Flyghöjd	$h = 300\text{m}$
Flyghastighet	$v = 44\text{m/s}$
Centerfrekvens	$f_c = 35 \text{ GHz}$
Bandbredd	$B = 600 \text{ MHz}$
Pulslängd	$T = 0.25\mu\text{S}$
Pulsrepetitions frekvens (enskilt sändarelement)	$\text{PRF} = 172 \text{ Hz}$
Burst PRF (takt mellan sändarelementen)	$\text{PRFb} = 50\text{kHz}$
Syntetisk aperturlängd	$L = 5 \text{ m}$
Antal mottagarantennar	$N_{\text{rx}} = 32$
Antal sändarantennar	$N_{\text{tx}} = 2 \times 32$

Tabell 4: Parametrar vid impulssvarsimuleringar av arkitekturtyp IV.



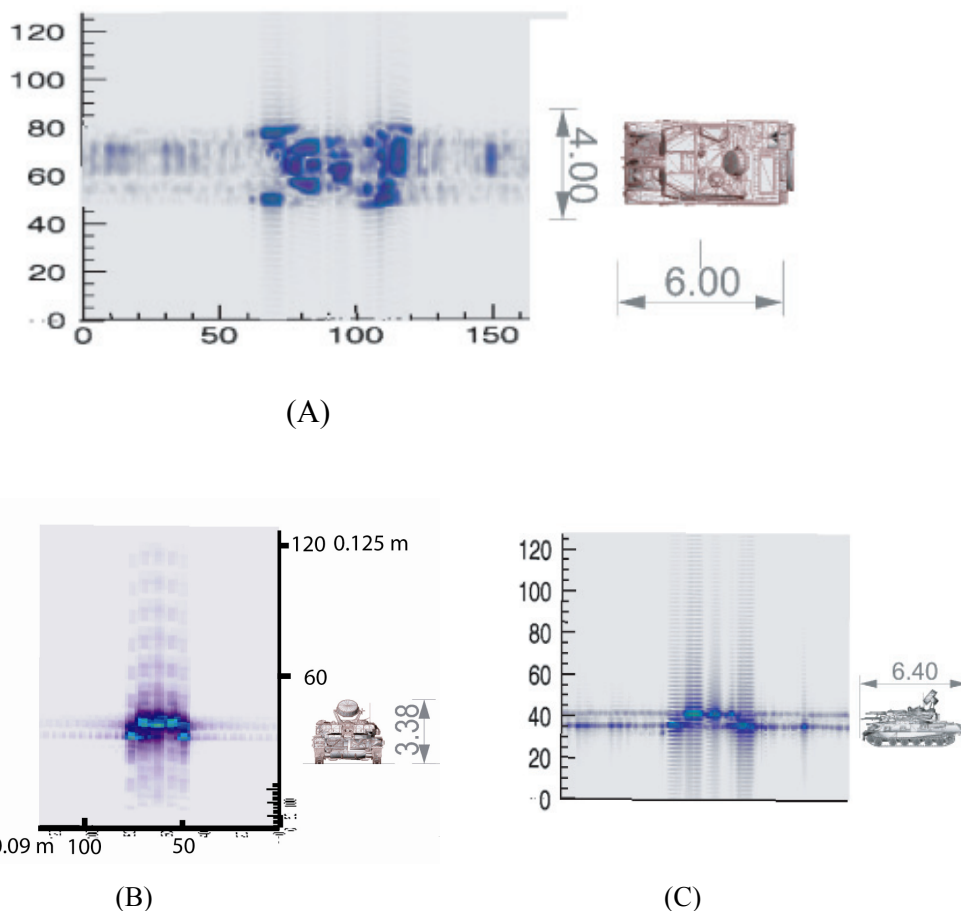
Figur 13: Impulssvaren för arkitekturtyp IV, vid Nadir (vänster) och för stråkbredd vid 30° infalls vinkel (höger) med 64 och 32 kanaler för sändning respektive mottagning.

4.3.3.2 Simulering av utbredda mål

För att göra mer illustrativa simuleringar hur en nedåttittande 3D-SAR avbildning kan se ut, är en förstudie gjord med avseende på avbildning av utbredda mål. Avsikten är att senare simulera ett större scenario som ger verklighetstroga resultat i urban miljö med hanterbara körtider.

Simuleringarna som visas i figur 14 bygger på simuleringsverktyget Specray [23] och använder sig av "raytracing" teknik och fysikalisk optik. Det belysta objektet byggs upp med små plana fasettytor med en noggrannhet som ger rimligt formöverensstämmelse i kombination med överkomliga körtider. Fasettytorna är uppbyggda av perfekt ledande material.

Två simuleringsfall med simuleringsparametrar som för impulssvarsimuleringarna är genomförda. Den första simuleringen gjordes med enbart en liten platta, $0.09 \times 0.09 \text{ m}^2$, för att kontrollera att vi får de förväntade bildkvalitetsmått efter bildformeringen. I den andra simuleringen modelleras en luftvärnsbandvagn (ZSU-23-4 "Shilka"). Figur 14 presenterar de simulerade radarbilderna.



Figur 14: Resultat av bildprocesserade radar data från tre betraktningssvinklar. Övanifrån (A), sett från sensorn i nadir position. Framifrån (B) och från sidan (C). Simuleringarna är gjorda med Specray och luftvärnsbandvagnen ZSU-23-4 "shilka" har modellerats.

Bilderna ger ett bra resultat. Ett större scenario är av intresse för att exemplifiera hur mark och husinteraktion påverkar resultaten. Även en mer realistisk modell för fasettytornas reflektionskaraktäristik bör införas och en uppsnabbning av bildformeringss algoritmen är också önskvärd.

4.3.4 Realisering

4.3.4.1 Front-end

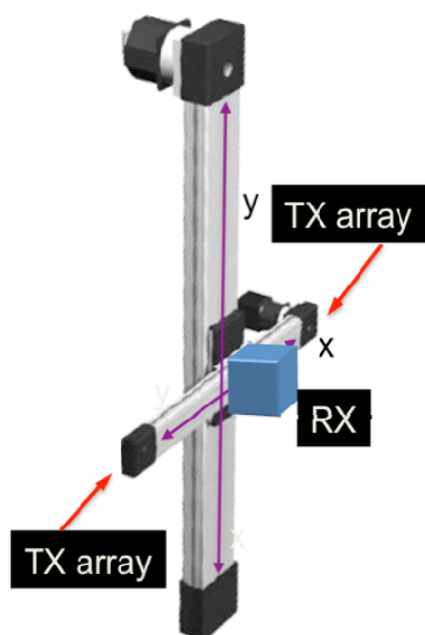
Inom projektet har det tidigare studerats kretsrealisering av en front-end vid 35 GHz, både vad avser antennlösning men även val av komponenter (MMIC) för FMCW-signalbehandling. Kretsar från Triquint har köpts in och testats. Detta finns delvis redovisat i leverans 8 i kapitel 7.2, men även i det gemensamma konferensbidraget med Onera, leverans 14 i kapitel 7.2.

4.3.4.2 Mätssystem

För att kunna generera verkliga mätdata har arbete påbörjats med att bygga upp en mätplattform för 3D-SAR mätningar. Syftet med detta är i första hand att a) kunna validera simuleringsresultat b) att kunna testa olika utglesningsprinciper samt c) att pröva olika realiseringar av front-ends.

För att snabbt komma till skott har vi valt att i nuläget basera systemet på COTS (Component On The Shelf) och har därför införskaffat en K-bands FMCW-transceiver från SiversIMA (SU3400), modifierad av tillverkaren så att en drygt 3 GHz bandbredd har uppnåtts (< 5 cm avståndsupplösning). Radarn arbetar med diskreta frekvenser så det rör sig egentligen om en SFCW-radar (Stepped Frequency Continuous Wave).

Till detta har beställts en xy-skanner från Hoerbiger-Origa (se figur 15) med en bästa möjliga repeter Noggrannhet på $50\ \mu\text{m}$. Skannern kommer att ha en slaglängd på $1\text{ m} \times 2\text{ m}$ och skall kunna användas för mätning i något av våra ekofria mätrum. Tänkta mål är bortsett från enklare kombinationer av punktmål (för validering av simuleringsresultat) även (delar av) mindre fordon, skalmodeller av stad etc. Om möjligt bör på sikt front-enden ersättas med en front-end som arbetar vid högre frekvens, så att skalningen av våglängd vid skalmodellsmätningar blir mer korrekt.



Figur 15: Principiell uppbyggnad av den xy-skanner som skall användas för 3D-SAR mätningar med en FMCW-radar från SiversIMA.

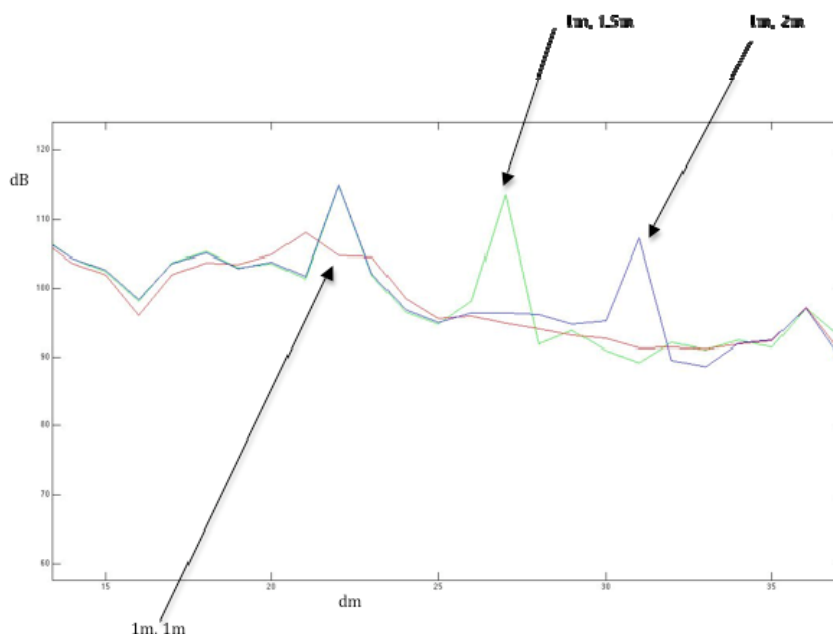
Driver-enheterna i skanner-systemet programmeras med programvara från Applied Motion. Möjligheten att kontrollera hela systemet (skanner och radar) från ett huvudprogram skrivet i antingen LabView och/eller C kommer att undersökas så snart skanner-hårdvaran levererats. Ett fundament för skannern måste också byggas.

Informationsutbyte kring systemets programmering görs informellt med SAAB som i ett angränsande projekt införskaffat en närmast identisk hårdvara för SAR-mätningar vid 220 GHz.

I dagsläget (nov 2008) har SFCW-radarn levererats och programvara har tagits fram i MATLAB för testkörning av radarn. Radarn är levererad med ett utvärderingskort som

styrts med enkla kommandon över RS-232C gränssnitt. Genom att använda serieobjekt i MATLAB kan radarmätningar konfigureras, beordras och mätdata extraheras direkt in i MATLAB. För närvarande pågår utvärdering av radarns stabilitet. Testmätningar har gjorts mot en eller flera punktmål i ekofritt mättrum med lovande resultat. Planerat är att få igång mätsystemet under 2009.

En begränsning med den valda radarn verkar vara en relativt långsam kommunikation över RS-232C. En mätning mot punktmål visas i figur 16.



Figur 16: Mätning mot två punktmål i mättrum. Röd kurva två punktmål på 1 m avstånd (som interfererar med varandra), grön kurva ett mål på 1 m och det andra på 1.5 m avstånd, och blå kurva ett mål på 1 m och det andra på 2 m avstånd.

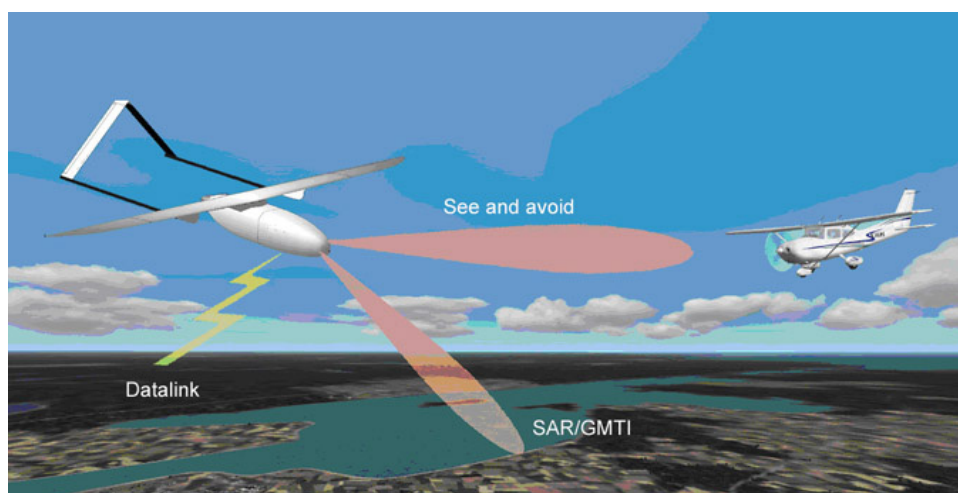
4.3.5 Samarbete med ONERA, Frankrike

Projektet har ett samarbete inom området 3D-SAR i form av informationsutbyte med ONERA (Salon de Provence, DEMR (Radar Departement)) i Frankrike. Både ONERA och FOI har intressen av 3D avbildande radar i urban miljö. FOI har bidragit med studier av utglesade antennarrayer för att reducera systemkomplexitet, vikt och kostnad för ett 3D-SAR system. ONERA har bidragit med studier på en högre systemnivå samt visat på mätningar från deras flygande plattform, motorseglaren BUSARD. I framtiden planeras gemensamma flygande mätningar.

4.4 Arkitekturer och RF front-end teknik

4.4.1 35 GHz multifunktionsradarsensor för en taktisk UAV

Förutsättningarna för att kunna realisera ett 35 GHz multifunktionssystem för en mindre taktisk UAV med en Se-undvika funktion, SAR och GMTI (se Figur 17) har studerats. Arkitektur och komponentval har varit i fokus. En länkfunktion bör även studeras. Inom projektet har vi bara studerat länkrav översiktligt, men teknikområdet för kommunikationslänkar följs istället genom samverkan med projekt som finansieras av civila forskningsfinansiärer (t.ex. EU samt VINNOVA) och genom ett forskningsutbyte med ONERA.



Figur 17: Illustration av en tänkt framtida UAV utrustad med en multifunktionsradar (Se-undvika förmåga samt SAR/GMTI-funktioner och en datalänk).

Små taktiska UAV:er kan nyttjas för att utföra spaningsuppdrag mha olika typer av sensorer. Jämfört med optiska sensorer så erbjuder radarsensorer en allvädersförmåga då en radar kan fungera även i regn, snö och dimma. För mindre sensorplattformar är dock dagens befintliga radarsystem ofta alltför stora, tunga samt energislukande [24]. Figur 17 illustrerar en bild på en tänkt framtida UAV utrustad med ett multifunktionssystem som nyttjar olika radarfunktioner samt en datalänk. För markspaning kan SAR användas för att generera högupplösta bilder av terrängen och täcka stora arealer. En GMTI-mod behövs för att kunna detektera rörliga objekt på marken. För obemannade flygningar med UAV:er i civilt luftrum krävs dessutom en Se-undvika sensor (antikollisionsradar) för att undvika kollisioner med andra flygande plattformar. Det är även viktigt att kunna realisera en multifunktionsradar till en rimlig systemkostnad samt med låg vikt, volym och effektförbrukning. Med dagens teknik vore nog den enklaste lösningen att använda en mekaniskt styrd antenn. Det finns dock nackdelar med en sådan lösning, se nedan samt kapitel 4.5. En pågående utveckling i omvärlden av elektriskt styrbara antenner (ESA) visar på möjligheter att inom en relativt snar framtid kunna integrera den typen av radarsensorer t.ex. i skrovet på flygande plattformar [25-26]. Sådana ESA-system kan realiseras vid mm-vågsfrekvenser (t.ex. 35 GHz) för att därigenom få plats med ett stort antal antennelement på en för den aktuella plattformen tillgänglig aperturyta. För högre frekvenser (kortare våglängder) begränsas räckvidden dock i allt högre grad av stigande atmosfärsdämpning.

4.4.2 Systemkrav och arkitekturer

De största utmaningarna när det gäller att realisera ett multifunktionssystem till en rimlig kostnad är plattformens (i detta fall en mindre taktisk UAV) begränsningar m.a.p. sensorlastens tillgängliga lastutrymme (volym), vikt (5-15 kg) samt DC-effekt (max 50 W för radarn inklusive signalprocessning) [9+27]. För att möjliggöra ett praktiskt fungerande system krävs en avsevärd minskning av den totala effektförbrukningen jämfört med dagens situation. Med dagens hårdvara kan enbart den digitala signalprocessningen (DSP) dra upp till flera hundra Watt vilket därmed utgör en starkt begränsande faktor. En analys utförd av Linköpings Universitet inom projektet TAIS COSMOS visar på att det redan inom några års tid kan gå att realisera högprestanda DSP:er med minst en storleksordning lägre effektförbrukningen (dvs ca 10 W eller lägre) jämfört med dagens teknik [9+27]. Ett sådant teknikgenombrott för den digitala hårdvaran är ett nödvändigt, men inte tillräckligt, villkor för att kunna realisera multifunktionssystem för små resurssnåla sensorplattformar.

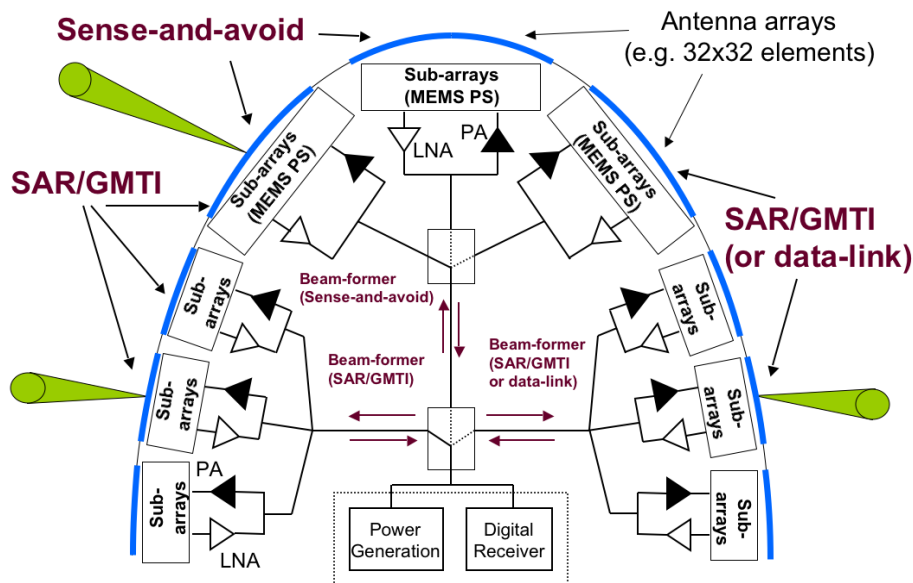
Inom projekt har vi mer ingående studerat en systemlösning baserad på en kompakt strukturintegrerad elektriskt styrbar antenn (ESA) vilket möjliggör direkt integration i skrovet på den aktuella sensorplattformen (t.ex. en mindre UAV). Ett alternativ är en mekaniskt vridbar antenn som idag skulle vara enklare och billigare. Den kan dock inte upprätthålla flera olika funktioner samtidigt (som Se-och-undvika, SAR och GMTI), vilket troligen är ett nödvändigt villkor för att kunna utföra övervaknings- och spaningsuppgifter med en UAV i civilt luftrum och är tyngre och mycket mer skrymmande än en skrovintegrerad konform antenn.

Vi har av dessa anledningar valt att utreda förutsättningarna för att på ett mer kostnadseffektivt sätt kunna realisera ett multifunktionssystem vid 35 GHz baserat på ovan nämnda radarfunktioner ombord på en mindre taktisk UAV. I tabell 5 sammanfattas antagna systemkrav för SAR samt Se-och-undvika radarfunktionerna i ett sådant tänkt framtida multifunktionssystem baserat på elektriskt styrbara gruppantenn (ESA).

Parameter	Syntetisk Apertur Radar (SAR)	Se-och-undvika Radar
Upptäcktsavstånd	10 km	5.5 km (för att undvika kollision)
Radarmålyta	-15 dBm ² /m ² (torkat gräs)	5 m ² (litet flygplan vid 35 GHz)
Avståndsupplösning	0.25 m	100 m
Brusbandbredd	600 MHz	0.14 MHz (pulsintegration)
Flyghastighet	160 km/h	160 km/h
Signalbrusförhållande	15 dB	22.4 dB
Brusfaktor	2.5 dB	2.5 dB
Atmosfärsdämpning	0.85 dB/km (3 mm/h regn) 0.07 dB/km (klart väder)	0.85 dB/km (3 mm/h regn) 0.07 dB/km (klart väder)
Antennvinst	35.4 dBi (sändning och mottagning)	35.4 dBi (sändning och mottagning)
Antennstorlek	0.3x0.1 m ² (3x24x24 element/panel)	0.3x0.1 m ² (3x24x24 element/panel)
DC-effekt	50 W (totalt för hela radarsystemet)	50 W (totalt för hela radarsystemet)

Tabell 5: Antagna systemkrav för systemfunktionerna SAR respektive Se-och-undvika (antikollisionsradar) i ett 35 GHz multifunktionsradarsystem för en mindre taktisk UAV [9+27].

En konventionell ESA-arkitektur, som består av en aktiv gruppantenn (AESAs) med en effektförstärkare och en lågbrusförstärkare (PA samt LNA) per antennelement, leder till en mycket hög förväntad systemkostnad eftersom upp till flera tusen element kan behövas totalt för att kunna uppnå tillräcklig runtomtäckning (vi har här antagit 3x24x24=1728 element behövs per antennpanel). Istället föreslår vi och utreder en alternativ gruppantennarkitektur (passiv ESA, PESA) där enbart en LNA samt ev. även en PA nyttjas per subarray (t.ex. i grupper av 16 av antennelement) vilket då möjliggör avsevärt reducerad komplexitet och därmed också lägre totalkostnad. Exempelvis behövs endast i storleksordningen c:a 100 förstärkare (LNA och PA) per ca 1600 antennelement vilket kan vara tillräckligt för en antennpanel i t.ex. framåtriktningen. I figur 18 illustreras hur man i en tänkt mindre UAV kan bestycka nosen med grupper av konforma antennpaneler för att uppfylla det önskade täckningskravet för sensorfunktionerna.



Figur 18: Översiktlig systemarkitektur för ett 35 GHz multifunktionssystem (SAR/GMTI, Se-och-undvika samt datalänk) baserat på flera olika elektriskt styrbara antenn-paneler (ESA) för att uppnå runtomtäckning ombord på en mindre taktisk UAV (blockschema av nosen i genomskärning).

I figur 18 visas en schematisk bild över hur antalet förstärkare i den studerade RF front-end arkitekturen är begränsat till en LNA och PA per subarray (t.ex. 1:4, 1:8 eller 1:16). För att kunna uppnå en rimlig total effektförbrukning fordras låga förluster i fördelningsnätet och fasvidarna mellan antennaperturen och bakomliggande aktiva kretsar (ca 4-5 dB, om tillgänglig effekt är 50 W). En flaskhals är fasvidarna som måste ha mycket lägre förluster (ca 2-3 dB vid 35 GHz) jämfört med dagens kommersiellt tillgängliga fasvidare (ca 7 dB vid 35 GHz) för att hålla nere brusfaktorn och därmed effektförbrukningen för systemet.

En möjlig framtida nyckelteknologi är fasvidare baserade på RF MEMS-teknik (Mikro Elektro-Mekaniska System), vilket potentiellt ger betydligt lägre fasvidarförluster. En första experimentell RF MEMS-baserad passiv ESA demonstrator för Ka-bandet har tagits fram av University of Michigan i USA och VTT i Finland [8]. Även Sandia samt EADS har visat på olika motsvarande systemkoncept för en Ku-bands SAR respektive 35 GHz fasstyrda gruppantennar med MEMS fasvidare samt fördelningsnät och antennelement integrerade på LTCC [6,25-26]. Med målsättningen att bättre kunna bedöma förutsättningarna att på ett kostnadseffektivt sätt kunna realisera ett 35 GHz multifunktionssystem baserat på användning av RF MEMS (fasvidare med låga transmissionsförluster) har vi inlett samarbeten med olika partners på nationell och internationell nivå. Genom olika forskningsutbyten (bl.a. med VTT och OMMIC) har projektet fått en fördjupad insyn i de möjligheter och svårigheter som kan ges genom användning av MEMS baserad teknik. Nedan sammanfattas några av de resultat som hittills uppnåtts via samarbeten (t.ex. i form av systemsimuleringar och hårdvara).

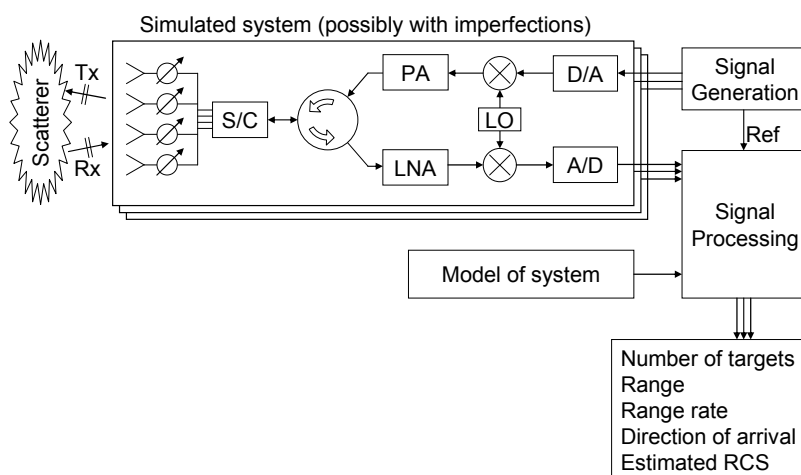
4.4.3 Fördjupad kunskap som resultat av internationellt samarbete

I omvärlden (USA, Europa) görs satsningar på att ta fram ny front-end-teknik baserat på RF MEMS som kan möjliggöra mera kompakta, lättare och mindre komplexa och därmed också potentiellt billigare systemlösningar för framtida gruppantennentillämpningar. Nämnas

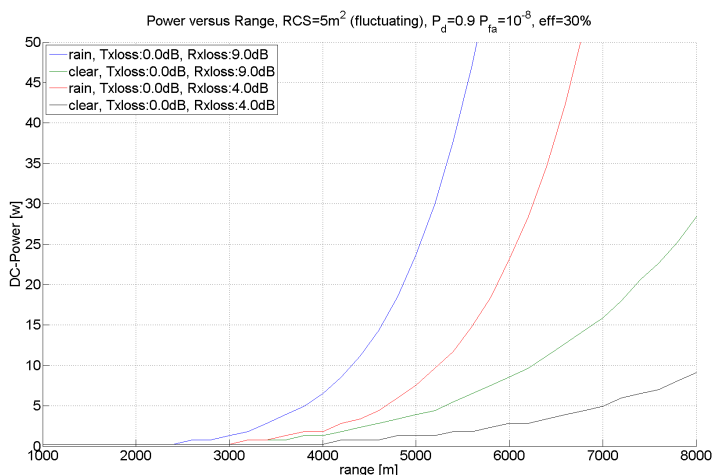
kan Lockheed Martin i USA som har genomfört experimentella flygtester med det första kända radarsystemet baserat på storskalig användning av RF MEMS switchar (25000 från RadantMEMS, USA) [7]. För svensk och europeisk försvarsindustri kan emellertid amerikansk nyckelteknologi som RF MEMS (spec. vid högre mikrovågsfrekvenser) omfattas av exportrestriktioner (ITAR) vilket bl.a. därför har föranlett företag som Thales och EADS att satsa på egen RF MEMS tillverkning. Dessa företag erbjuder dock inte volymtillverkning av RF MEMS för externa kunder.

I dagsläget saknas en europeisk tillverkare som kan förse olika avnämare inom försvarsindustrin (men också mot civila tillämpningar) med RF MEMS switchar som uppvisar god tillförlitlighet och som även kan köpas till en rimlig kostnad (vilket förutsätter volymtillverkning). Dock kan nämnas att OMMIC (Frankrike), som är ett av Europas två existerande GaAs MMIC open-foundries, sedan några år tillbaka har inlett satsningar på att även kunna erbjuda volymtillverkning av RF MEMS switchar inom några års sikt (troligen efter 2011). Tillsammans med OMMIC och VTT m.fl. deltar FOI i ett forsknings- och utvecklingsprojekt MEMS-4-MMIC finansierat av EU under 2008-2011 [28].

Målsättningen med detta projekt är att relativt snabbt kunna omsätta resultaten för den framtagna RF MEMS-tekniken på kommersiell basis och därigenom påskynda en etablering av en europeisk volymtillverkare av RF MEMS switchar i befintliga MMIC-processer. Inom projektet MEMS-4-MMIC leder FOI olika aktiviteter inom gruppantennarkitekturer och systemsimuleringar mot valda tillämpningar (radarsystem, mikrovågslänkar och satellitkommunikation). Speciellt inom arkitektur och simulering stöttas EU-projektet av Flexibla Mikrovågssystem och nedan sammanfattas en del av de resultat som tagits fram inom ramen för samarbetet. I figur 19 visas den simuleringsmodell (block-schema) som använts i systemsimulering av ett 35 GHz multifunktionssystem för en mindre taktiskt UAV. I figur 20 visas simulerad DC-effektåtgång (enbart för sändardelen) som funktion av upptäcktsavstånd givet olika komponentförluster (COTS resp. MEMS fasvridare) i regn resp. klart väder.



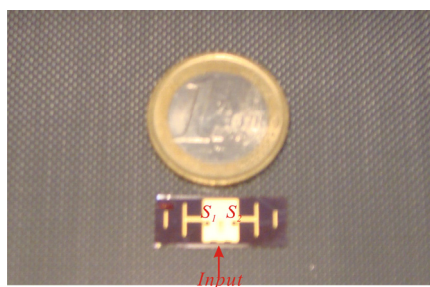
Figur 19: Simuleringsmodell (blockschema) som använts för systemsimulering av ett 35 GHz multifunktionsradarsystem ombord på en mindre taktisk UAV.



Figur 20: Simulerad DC-effektåtgång (enbart för sändardelen) som funktion av upptäcktsavstånd för Se-och-undvika radarfunktionen i ett 35 GHz multifunktions-system för en mindre taktisk UAV (AESAs i Tx respektive PESAs i Rx).

Den blå kurvan i figur 20 visar på att en relativt hög DC-effekt (ca 50 W) krävs för att man i kraftigt regn (3 mm/h) ska kunna uppnå ett tillräckligt upptäcktsavstånd (5.5 km enligt [27]) för Se-och-undvika-funktionen i fallet då konventionella fasvridare (totalt 9 dB förluster inräknat 2 dB för 1:16 fördelningsnät) används i ett radarsystem baserat på AESA i sändning (Tx) respektive PESA i mottagning (Rx). Den röda kurvan visar på att för ett motsvarande radarsystem som nyttjar RF MEMS baserade fasvridare (totalt 4 dB förluster per sub-array i mottagaren av typen PESA, se figur 19) kan ett upptäcktsavstånd på 5.5 km uppnås med en avsevärt lägre DC-effektåtgång för sändaren (knappt 15 W).

Då totalt ca 50 W bedöms vara tillgängligt för hela radarsystemet (inkl. digitala signalprocessningen) kommer det att vara kritiskt att kunna minimera DC-effektåtgången för den analoga RF-delen (sändare och mottagare). Våra framtagna resultat visar på att fasvridare med låga förluster (ca 2-3 dB vid 35 GHz) är nyckelkomponenter för att man på ett kostnadseffektivt ska kunna realisera ett multifunktionssystem (Se-undvika samt SAR/GMTI) med bibehållen allvädersförmåga ombord på sensorplattformar med begränsad effekttillgång (t.ex. en mindre taktisk UAV). RF MEMS baserade switchar och fasvridare (i sub-arrayer) har förutsättningar för att uppfylla de krav som ställs på tillräckligt låga förluster. FOI har även medverkat (delfinansiering via M-Flex) inom det nordiska samarbetsprojektet NAME (Nordic Antenna Integrated RF MEMS Router) där det har tagits fram en 20 GHz elektriskt styrbar antenn (sub-array) baserad på MEMS switchar och som tillverkats på kvarts-substrat (se figur 21). Resultaten publiceras i form av ett konferensbidrag och en tidskriftsartikel [29].



Figur 21: Fotografi av en RF MEMS baserad 20 GHz elektriskt styrbar antenn (två antenn-element) tillverkad på kvarts substrat (storlek: 2 cm²).

4.5 Konform antennteknik

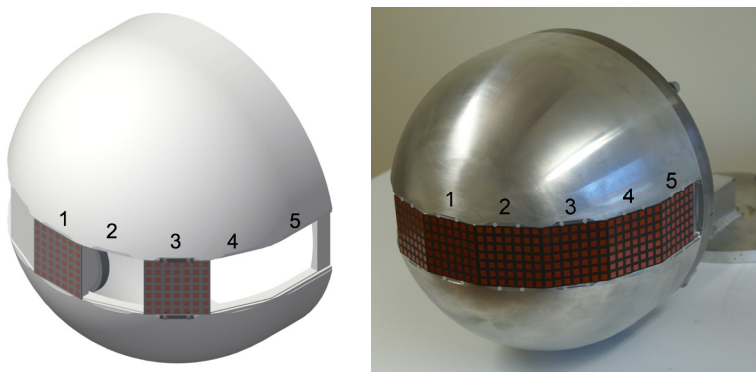
Bredbandiga antennelement möter kravbilden för framtida militära plattformar genom att en gemensam apertur (antennelement) då kan användas för flera olika RF-funktioner. Taperade slitselement är en typ av antennelement som kan användas för att realisera mycket bredbandiga gruppantennor [30-31]. Deras storlek gör dem dock ofta mindre lämpade för nyttjande på plattformar med begränsad nyttolastkapacitet. Gruppantennor bestående av mikrostripelement har flera potentiella fördelar, till exempel kompatibilitet med mönsterkortsteknik, låg profil samt låg vikt. Traditionella gruppantennor med mikrostripelement är smalbandiga, men kan genom lämplig konstruktion utformas för att ge en bandbredd i storleksordningen 2.5:1 [34]. Sådana antennelement är därför attraktiva för bredbandiga multifunktionssystem, där kraven på frekvenstäckning dock bör understiga oktavbandbredder.

För att med goda prestanda utföra de funktioner (t.ex. se-och-undvika, SAR och GMTI) som önskas för framtida taktiska UAV:er krävs en mycket stor vinkeltäckning, se figur 22 samt tabell 1 i [32]. Konforma gruppantennor utgör en möjlig lösning för att kunna styra ut antennloben/loberna (fasstyrning, ej mekanisk styrning) över de krävda vinkelområdena. Antennor som kan integreras konformt eller distribuerat på farkosten kan anpassas till behovet av den rumsliga täckningsförmågan samtidigt som radarmålarean kan reduceras. Även förbättrad aerodynamik fås. Dessutom krävs det inte en gimbal eller annan mekanik för att vrida antennen fysiskt. En konform gruppantenn kanske också är den enda möjligheten då plats är en begränsande faktor på en liten farkost.

4.5.1 Studie av en fasetterad konform antenn

En konform gruppantenn kan antingen bestå av element placerade på en mjukt krökt yta eller som en fasetterad gruppantenn sammansatt av flera plana gruppantennpaneler. En fasetterad gruppantenn har studerats inom projektet eftersom dessa antenner jämfört med mjukt krökta antenner är mer konsistenta med tillverkning med modern kretskortsteknologi samt möjliggör integration med mikrovågselektronik.

För att undersöka möjligheterna att integrera tunna antenner på små flygburna plattformar samt demonstrera konform gruppantenn teknologi så korrekt som möjligt, utan att bygga ett fullskaligt antensystem, har vi designat, byggt och utvärderat en experimentell konform gruppantenn på en UAV-liknande struktur, se figur 22. Plattformen representerar en nosdel på en UAV eller pod, och kan innehålla nio gruppantennpaneler. Panelerna, vilka är individuellt utstyrbara i åtminstone $\pm 60^\circ$, placeras i skrovet för att uppfylla täckningskravet på $\pm 120^\circ$ i azimut och $\pm 45^\circ$ i elevation.

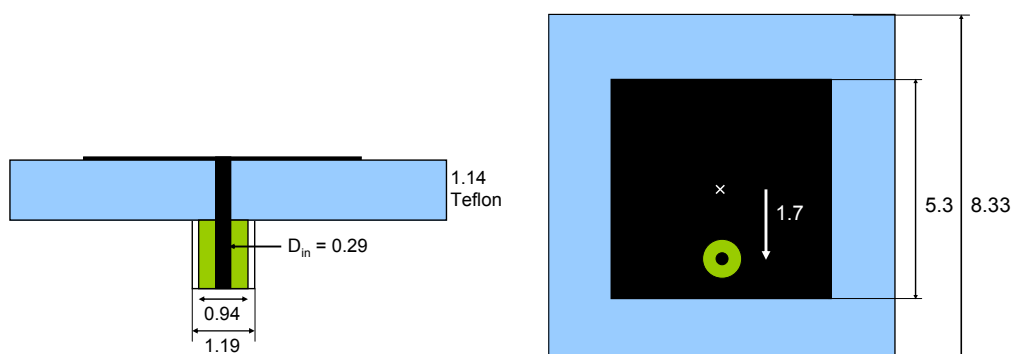


Figur 22: (Vänster) CAD-modell av den experimentella konforma UAV-strukturen där numreringen visar de möjliga positionerna för den aktiva delantennen, samt (höger) motsvarande fotografi av gruppantennen under montering [33].

Design av konforma gruppantennar kan delas in i ett antal olika delmoment. Först måste en form på antennens yta väljas, vilken delvis kan vara given av andra skäl än elektromagnetiska, t.ex. av skrovformen på en farkost. Vidare måste ett lämpligt antennelement väljas utgående från t.ex. frekvensområde, bandbredd samt tillåtet byggdjup. För en generell konform gruppantenn på en dubbelkrökt yta krävs dessutom element med dubbel polarisation för att undvika hög korspolarisation.

I samarbete med andra FM- och FMV-projekt har studier genomförts beträffande gruppantennar med mycket stor bandbredd. Simulerings- och mätresultat för mycket bredbandiga ($BW \approx 8 - 18$ GHz), tunna gruppantennar bestående av aperturkopplade stackade mikrostripelement har rapporterats på såväl nationella [34] som internationella konferenser [32]. Experimentell- såväl som simuleringsmässig utvärdering av två bredbandiga ($BW \approx 2 - 6$ GHz resp. $BW \approx 6 - 18$ GHz) gruppantennar bestående av taperade slitselement har presenterats på en internationell konferens [31].

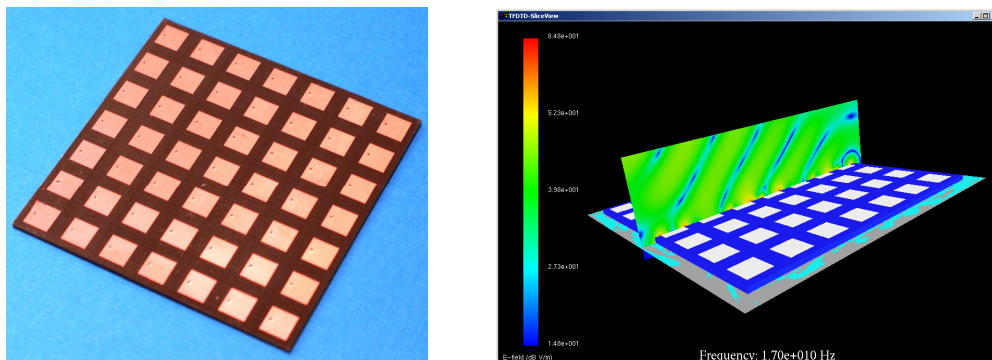
För att minska komplexiteten för den fasetterade konforma antennen valdes dock, till de experimentella studierna, antennpaneler bestående av tunna, kvadratiska och relativt smalbandiga, enkelpolariserade probmatade patchelement i en 7×7 konfiguration, se figur 23. Dessa är kompatibla med modern mönsterkortsteknik och kan därför tillverkas till en låg kostnad. Storleken på plattformen samt radarfunktionernas krav på lobbredd samt relativ bandbredd medför att ett lämpligt frekvensområde hamnar inom Ku-Ka-bandet. Antennen är därför utformad för frekvensområdet 16 – 18 GHz. För att erhålla gallerlobsfri utstyrning ut till 90° för frekvenser upp till 18 GHz valdes elementavståndet i båda riktningarna till 8.33 mm.



Figur 23: Detaljvy över patchelementet. Mått i mm.

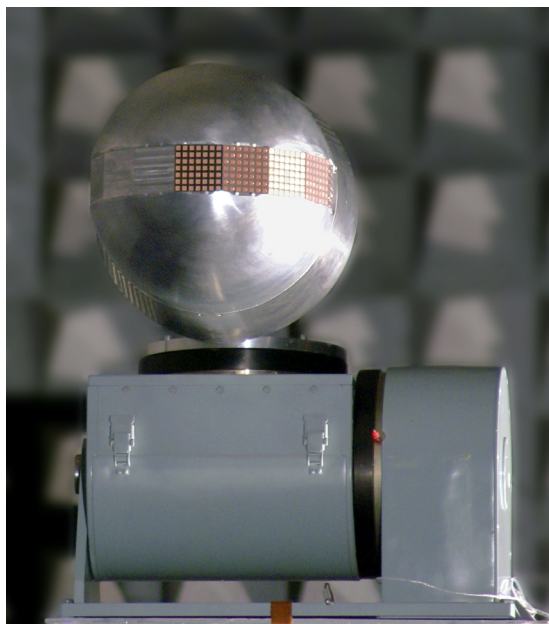
Antennelementens design togs fram genom simuleringar på en oändlig plan gruppantenn med Ansoft HFSS samt TFDTD (egenutvecklad FDTD-kod) [35]. TFDTD-simuleringar på en 7×7 element gruppantenn, med storlek $58.3 \times 58.3 \text{ mm}^2$, har genomförts både på inbäddade elementdiagram (ett element aktiv och övriga element passivt avslutade) samt då hela antennen exciteras för utstyrning, se figur 24.

I den experimentella antennen (se figur 22) är elementen i endast en av panelerna (kallad den aktiva delantennen) åtkomliga från kontakterna. Övriga paneler, vilka monteras på vardera sidan av den aktiva delantennen, är passivt avslutade med tunnfilmsmotstånd för att simulera en korrekt omgivning till den aktiva delantennen. Eftersom gruppantennen är ändlig och krökt kommer dessa elementdiagram inte att vara identiska, men liknande (då de beskrivs i sina lokala koordinatsystem). På grund av det stora antalet element och de tidskrävande mätningarna har mätningar endast utförts för ett representativt urval av elementen.



Figur 24: (Vänster) CAD-modell av en gruppantennpanel med 7×7 patchelement, samt (höger) beräknat elektriskt fält då gruppantennen exciteras för utstyrning till 45° i E -planet vid 17 GHz [33].

Antennen har karakteriserats genom mätningar av elementdiagram i stora mäthallen på FOI i Linköping. Mätning gjordes med antennen monterad på ett azimut-över-elevation bord enligt figur 25. Horisontell och vertikal polarisation är då detsamma som $\hat{\phi}$ - och $\hat{\theta}$ -polarisation i ett koordinatsystem med $\hat{z}$ -axeln uppåt i figur 22.



Figur 25: Experimentell fasetterad konform antenn monterad på azimut-över-elevations bord i stora mäthallen på FOI.

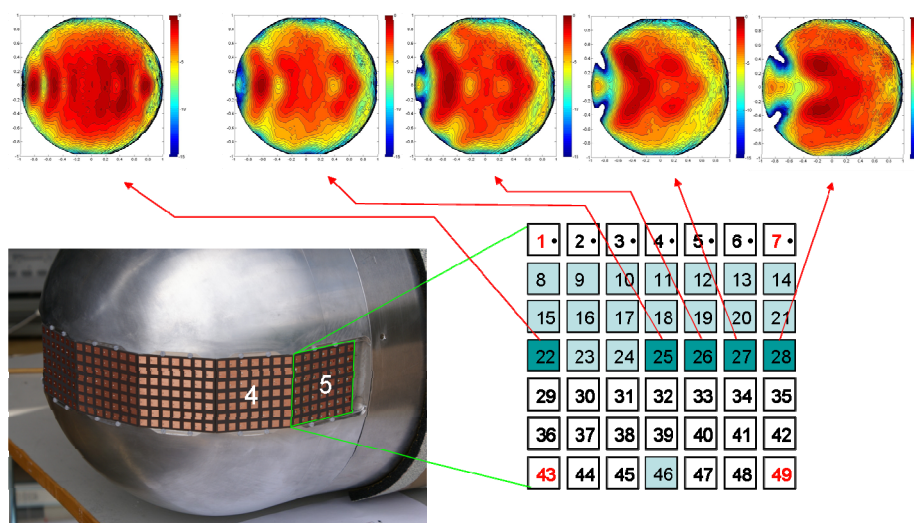
Antennelementen är enkelpolariserade, men eftersom panelerna är byggda på ett sådant sätt att de enkelt kan vridas 90° kunde både horisontell och vertikal polarisation mätas upp. Totalt mättes cirka 90 elementdiagram upp. De elementdiagram som inte mättes upp har extraherats från uppmätta elementdiagram med hänsyn taget till symmetri samt position i gruppantennen. Mätningarna genomfördes med "raster scan" och data samlades för både horisontal- och vertikalpolariserad belysning in över nästan en hel halvsfär i vinkelsteg om 2.5° och vid 51 frekvenser kring 17 GHz.

Uppmätt och normerad inbäddad antennvinst (dvs. då ej mätta element är avslutade med 50Ω) i ko-polarisation för horisontell polarisation och vid centerfrekvensen 17 GHz illu-

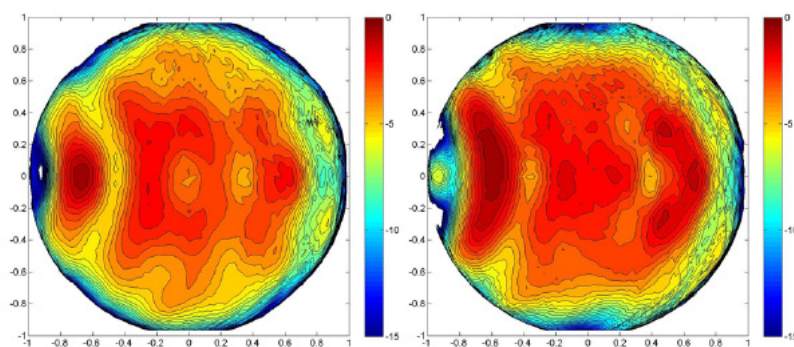
streras i figur 26 för ett antal element då delantennen är placerad i position 5. Som förväntat uppvisar elementdiagrammen för element vid, eller nära, kantpositionerna starkare kanteffekter än centralt placerade element. Den största källan till de asymmetrier som ses i diagrammen är delantennens kanter, men även den asymmetriska matningen av patchen har viss inverkan. Frekvensberoendet illustreras av centerelementets diagram vid 16.5 och 17.5 GHz i figur 27.

Genom att använda de uppmätta elementdiagrammen erhålls möjlighet att studera antennloben för en full gruppantenn, dess utstyrning, täckning, korpolarisation, diagramsyntes, känslighet för krökning, etc. Detta ger oss betydligt bättre förståelse för saker vilka är svåra att studera rent teoretiskt såsom mekaniska frågor, skarvar mellan panelerna, etc.

För den intresserade läsaren finns utförligare beskrivningar av design samt simuleringsresultat i två konferensbidrag [32,36].



Figur 26: Uppmätta och normerade elementdiagram i ko-polarisation för belysning med horisontal polarisation för fem element i position 5. Diagrammen är normerade till $\text{Max}=0$ dB och frekvensen är 17 GHz [36].



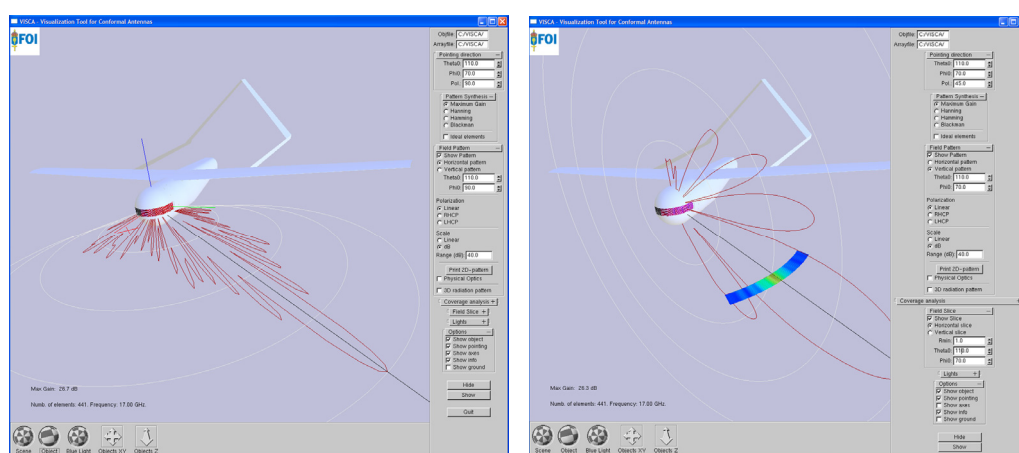
Figur 27: Antennvinst i ko-polarisation för H-polariserat centerelement vid frekvenserna (vänster) 16.5 GHz, och (höger) 17.5 GHz [37].

Fördelen med en fasetterad konform antenn kontra en mjukt krökt är huvudsakligen att den ofta är lättare att bygga. Nackdelen är dock att skarvarna ofrånkomligen kommer att ge en diskontinuitet som inverkar menligt på strålningsprestanda. Om därför antensubstratet kan göras mjukt och inte alltför tjockt skulle man kunna tillverka antennen plan och sedan böja den i farkostens form. Att studera en sådan lösning är därför en naturlig fortsättning på ovanstående studie.

4.5.2 Analys- och visualisering av konforma antenner

För en verklig plattform är det sannolikt att det tillgängliga utrymmet för en gruppantenn inte är det mest lämpliga med avseende på strålningsegenskaper. Skälen till detta kan t.ex. vara att andra sensorer konkurrerar med gruppantennen om den mest lämpliga positionen. Det är därför sannolikt nödvändigt att simulera gruppantennens antenndiagram på olika positioner på plattformen, i syfte att verifiera att det krävda täckningsdiagrammet uppfylls. Stora konforma gruppantennar kan analyseras med olika numeriska metoder, t.ex. momentmetoden (MoM), asymptotiska metoder, finita element metoden (FEM) eller finita differensmetoder (FDTD), se t.ex. [38]. Sådana simuleringar är oftast avsedda för ”enkla” enkelkrökta eller dubbelkrökta ytor, såsom cylindrar eller paraboloider. Full analys av en stor gruppantenn inkluderande en fullständig plattformsstruktur skulle leda till betydande simuleringstider.

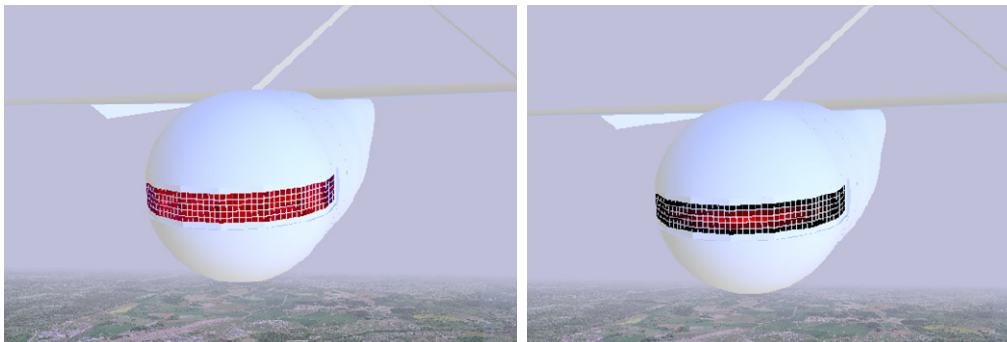
Genom att använda ett approximativt tillvägagångssätt med interpolation av enskilda elementdiagram är det möjligt att reducera beräkningstiderna avsevärt då man beräknar syntetiserade antenndiagram. Ifall algoritmen är snabb är det möjligt att snabbt undersöka olika konfigurationer för gruppantennen på plattformen. Målet med det på FOI utvecklade VISCA-programmet (VISualization of Conformal Antennas), [39], är att visualisera strålningen från konforma gruppantennar då gruppantennen monteras på en realistisk plattform. VISCA-programmet kan bland annat visualisera antennens elementpositioner på strukturen, elementvikternas magnitud, önskad lobriktning samt polarisation, 3D-antenndiagram samt 2D-fälthbilder i antingen vertikala eller koniska plan, se figur 28.



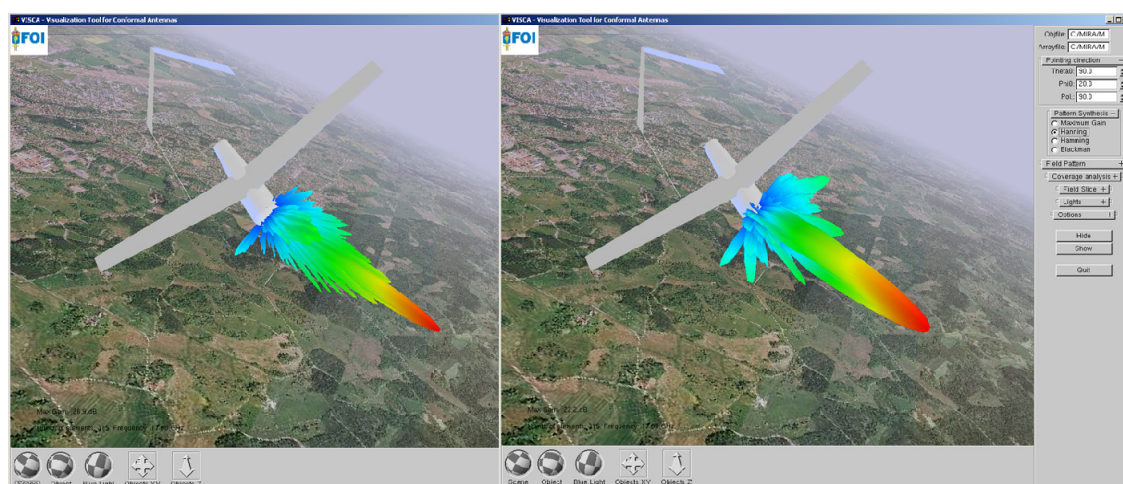
Figur 28: Exempelvy på VISCA-simulatorens: (vänster) koniska strålningsdiagram från en konform gruppantenn, (höger) fälthbild tillsammans med vertikala strålningsdiagram. Exciterande polarisation är 45° .

Då CAD-data för plattformens geometri samt data för gruppantennen laddats in i programmet beräknas elementvikter. Lämplig matning/viktnings av signalerna till/från alla element görs, med hänsyn till elementdiagrammen, så att det totala antenndiagrammet uppfyller givna krav, vilka kan variera beroende på tillämpning. I VISCA-programmet har flera olika taperingsmetoder implementerats (maximum gain, Hanning, Hamming och Blackman). Maximal antennvinst i en viss riktning fås om exciteringen väljs som komplexkonjugatet till elementets strålning i denna riktning, vilket vi kallar för ”maximum gain”. För en plan gruppantenn med identiska element blir detta konstant amplitud och linjärt fasskift. Genom att använda en tapering som trycker ned kantelementen fås lägre sidolober. Figur 29 illustrerar antennelementens excitering för två av dessa taperingsmetoder (maximum gain och Hanning) då den experimentellt utvärderade konforma gruppantennen placerats på den främre delen av flygplanskroppen på en liten generisk spanings-UAV, vilken är 2.3 m lång och har ett vingspann på 3.6 m. Med maxi-

maximum gain metoden erhålls hög antennvinst, men samtidigt höga sidolober eftersom ingen sidolobundertryckning inkluderas i denna taperingsmetod. Med Hanning trycks sidoloberna ned, men samtidigt erhålls lägre antennvinst i huvudloben. Exempel på syntetiserade antennlober för de två olika taperingsmetoderna illustreras i figur 30.

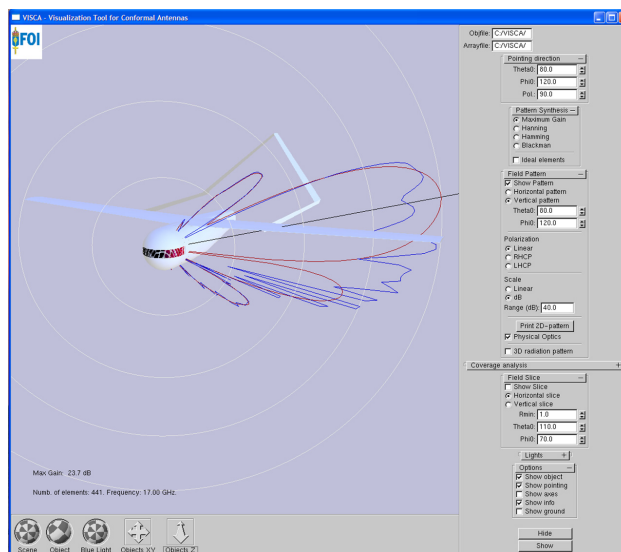


Figur 29: Excitering av antennelement för olika syntetiseringsmetoder. (Vänster) maximum gain, samt (höger) Hanning i både sida och höjd [36].



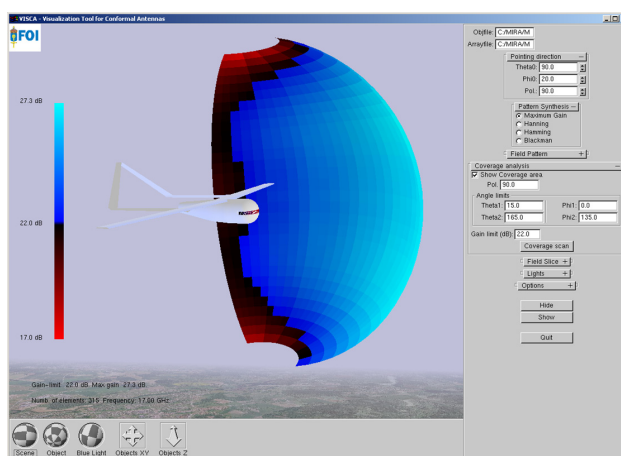
Figur 30: Syntetiserad antennlob beräknad från uppmätta elementdiagram. Taperingsmetod: (vänster) maximum gain, samt (höger) Hanning i både sida och höjd. Loben är utstörd 20° från nosens framåtriktning, där antennvinsten blir 27 dBi (maximum gain) respektive 22 dBi (Hanning) [36].

Det antas att elementdiagrammen för varje antennelement är beräknat (eller uppmätt) då antennen är monterad på en realistisk enkel- eller dubbelkrökt yta, vilken representerar den verkliga geometrin i närheten av gruppantennen. Men vissa strukturella delar kan vara närvarande nära gruppantennen vilka kan sprida fältet och orsaka interferens med det önskade (ostörda) strålningsdiagrammet. Ett exempel på en sådan struktur är vingen på ett flygplan. Denna typ av struktursamverkan har inkluderats i VISCA med fysikalisk optik (PO). Utförligare information angående hur plattformsinverkan beräknas presenteras i [39]. Figur 31 illustrerar hur plattformsinverkan inverkar på de syntetiserade loberna. De (ostörda) vertikala diagrammen visas som en röd kurva medan diagrammet inkluderande samverkan (användande PO) med den vänstra vingen visas som en blå kurva. Inverkan av de spekulära reflexerna från vingen är tydlig i huvudloben.



Figur 31: Plattforminteraktion. Rött diagram: utan plattforminteraktion (dvs. utan PO). Blått diagram: med plattforminteraktion med den vänstra vingen (dvs. med PO).

Inledande täckningsanalys har också påbörjats med hjälp av VISCA-simulatorens och en exempelbild på detta visas i figur 32. Arbetet visar att utstyrning över stora synfält som krävs för multipla radarmoder, kommunikation, m.m. är möjlig med en tunn, konform gruppantenn på en UAV-liknande struktur.



Figur 32: Visualisering av täckningsdiagram från en konform antenn placerad på en generisk UAV [36].

Analysen i VISCA av mätresultaten för den fasetterade gruppantennen finns beskriven i två konferensbidrag [32, 36]. För den intresserade läsaren finns i [39] en utförlig beskrivning av VISCA-programmets funktionalitet, visualiseringsmöjligheter samt metoden använd för att beräkna plattformsinverkan.

5 Slutsatser och framtida arbete

5.1 Slutsatser

Projektet Flexibla Mikrovågssystem har under perioden 2006-2008 bedrivit forskning inriktat mot flexibla och multifunktionella antensystem för små, autonoma farkoster inom mikrovågsområdet. Projektet har belyst värderings och systemaspekter, prestandasimuleringar, arkitekturval och konform antennintegration, men även identifierat nyckelkomponenter och teknologier.

Flera exempel på framsteg gjorda i relevanta projekt internationellt under de senaste åren och dess framtida inriktningar [5, 6, 7] visar att den här typen av antensystem förväntas vara centrala i framtidens sensorer.

FOI har under projektet byggt upp kompetens och nätverk, både nationellt och internationellt, som utgör en god grund för framtida forskning och samarbete inom området. Exempelvis har kunskaper från projektet varit grunden till att få till stånd EU FP7 projektet MEMS-4-MMIC, vilket Flexibla Mikrovågssystem har medfinansierat under dess första år av fyra.

Slutsatser som kan dras från forskningen inom projektet inkluderar behovet av sensorer för svenska trupper i tjänst under internationella insatser. UAV-burna SAR/GMTI-sensorer för spaning inom närområdet och radar för att detektera mycket små mål (finkalibrig eld) behövs. Systemstudier av en duell mellan en radar och en störsändare visar att man behöver utnyttja filtrering i både avstånd och doppler, förutom adaptiv lobformning, för att kunna undertrycka markreflekterad störning. En lämplig metod för detta är utvecklad på FOI.

Utvecklad programvara i projektet kan kvantifiera skillnader i förutsättningar för signalbehandling för linjära arrayantennor och konforma antenner. Exempelvis är klotterundertryckningen ett svårare problem för konforma antenner jämfört med linjära antenner. Systemsimulatorens (MFA-simulatorens) som vidareutvecklats inom projektet kan beräkna räckvidder för exempelvis en se-och-undvika-radar på en UAV. Med 30 W uteffekt för radarn krävs det låga fasskiftarförluster (2-3 dB) för att radarn ska ge 90 % detektionssannolikhet vid regnig väderlek för räckvidder över 4 km.

Vidare visar simuleringar att vår föreslagna teknik för 3D-SAR för urban miljö, med drastiskt reducerade skuggningseffekter, är fullt möjlig. Multipla sändarpositioner kan dessutom reducera antalet mottagarkanalerna som krävs med en faktor lika stor som antalet sändarelement i jämförelse med en icke-uttunnad array, vilket bidrar till att göra systemen mer kostnadseffektiva. Med sändarantennor på båda sidor om mottagarantennerna kan arrayens fysiska längd också halveras.

Inom arkitekturstudierna kan vi konstatera att med låga fasskiftarförluster är det möjligt att, med bibehållen hög prestanda, summera bidraget från flera antennelement i en gruppantenn utan att det krävs lågbrusförstärkare på varje element före summeringen. Mycket färre lågbrusförstärkare krävs därmed och en förenklad arkitektur kan uppnås.

Nyttan med konforma antenner är dess stora utstyrningsområde och låga radarmålarea i kombination med dess goda aerodynamiska egenskaper jämfört med en icke-konform antenn. Den konforma antenn som tagits fram inom projektet visar på möjligheten att skrovintegrera antennfunktionen med bibehållna goda antennegenskaper i form av antenn-diagram och täckningsområde.

5.2 Framtida arbete

Vi bedömer behovet av sensorer baserade på multifunktionssystem på mikrovågsområdet som stort i framtiden. Internationellt bedrivs forskning inom området i stor omfattning. Tekniken börjar bli mogen, dock finns det mycket kvar att göra, speciellt inom vissa nyckelområden (exempelvis konform antennteknologi och MEMS-baserade fasskiftare och switchar).

Tekniska utmaningar i framtida multifunktionssystem som identifieras är

- Reduktion av storlek, vikt och effektförbrukning med upp till tio ggr
- Radararkitekturer som möjliggör radikal reduktion av komplexitet och kostnad
- Resurssnål och effektiv lobformning
- Resurssnål signalbehandling ombord
- Koncept och modeller för signalbehandling

Nyckelteknologier och komponenter förväntas vara

- Integrerade, plana antenner
- Lågförlustiga switchar och fasskiftare (exempelvis MEMS-baserade)
- Kompakta och förenklade arkitekturer
- Signalbehandlingsmodeller och arkitekturer

6 Slutord

Resultaten från detta projekt har tagits fram av ett antal medarbetare. Följande personer har varit inblandade under hela eller delar av projektiden 2006 - 2008:

Patrick Andersson	Hans Frennberg	Gunnar Huss	Anders Nelander
Wiwianne Asp	Per-Olov Fröling	Stig Leijon	Tony Nilsson
Svante Björklund	Per Grahn	Olof Lundén	Aziz Ouacha
Tomas Boman	Ronny Gunnarsson	Robert Malmqvist	Lars Pettersson
Börje Carlegrim	Andreas Gustafsson	Torleif Martin	Jan Svedin
Roland Erickson			

Projektarbetet har resulterat i modeller och kunskap som spridits till försvarsindustri, FMV, FM, vid konferenser och seminarier och internt inom FOI. Det är vår övertygelse och förhoppning att den uppbyggda kunskapen kommer att kunna tillgodogöras och vidareutvecklas för framtida försvarsbehov.

7 Förteckning över projektets leveranser och publikationer

7.1 Projektets milstolpar

2006-09-12	Konferensbidrag inom området flexibla RF-frontends inskickat. (4 i kap. 7.2)
2006-12-01	Antenn och frontend teknik för flerfunktionssystem på små farkoster. FOI Rapport. (2 i kap. 7.2)
2006-12-01	Seminarium Simulering av flerfunktionssystem i typsituationer genomfört.
2007-09-20	Systemförslag 3D-avbildande radar. FOI rapport. (8 i kap. 7.2)
2007-12-01	Utvärdering av experimentantenn. FOI Memo. (9 i kap. 7.2)
2007-12-01	Flexibla mikrovågssystem - Årsrapport. FOI Memo. (10 i kap. 7.2)
2008-03-20	Kompakta radarsystem på små farkoster - den internationella utvecklingen. FOI Memo. (11 i kap. 7.2)
2008-06-10	Konferensbidrag inom 3D-avbildande radar inskickat. FOI Memo. (13 i kap. 7.2)
2008-09-20	STAP för detektering av markmål. FOI Memo. (15 i kap. 7.2)
2008-12-01	Slutrapport. FOI Användarrapport inkl enbladare. (det här dokumentet)

7.2 Leveranser - FOI Rapporter och MEMO

1. RF MEMS and GaAs based reconfigurable RF front-end components for wide-band multi-functional phased arrays

Malmqvist Robert, Gustafsson Andreas, Nilsson Tony, Samuelsson Carl, Carlegrim Börje, Ferrer Isabel, Vähä-Heikkilä Tauno, Ouacha Aziz, Erickson Roland, FOI-S--2305--SE, 2006 (36. European microwave conf. 2006/3. European Radar conf.).

2. Antenna and front-end technology for multifunction systems on small vehicles

Gustafsson A, Malmqvist R, Martin T, Svedin J, Erickson R, Nelander A, Pettersson L, Frölind P O, FOI-R--2156--SE, 2006.

3. Inverse filtering for noise radar processing

Nelander Anders, FOI-S--2233--SE, 2006 (Proc. IRS 2006, International Radar Symposium, pp. 421-424).

4. Konferensbidrag inom Flexibla RF-front ends

Malmqvist Robert, Erickson Roland, FOI Memo 1831, 2006.

Bilaga: RF MEMS and GaAs based reconfigurable RF front-end components for wide-band multi-functional phased arrays.

5. Broadband arrays with dual-polarized, aperture-coupled, microstrip antenna elements

Gunnarsson Ronny, Huss Lars-Gunnar, Andersson Patrick, Leijon Stig, FOI-S--2225--SE, 2006 (Antenn 06, proc. pp.221-226).

6. On the use of MEMS phase shifters in a low-cost ka-band multifunctional ESA on a small UAV

Malmqvist Robert, Samuelsson Carl, Gustafsson Andreas, Boman Tomas, Erickson Roland, Vähä-Heikkilä Tauno, Rantakari Pekka, FOI-S--2767--SE, 2007 (Asia-Pacific microwave conference 2007, proc. on CD).

7. Beamforming in Terrain scattered jamming

Nelander Anders, FOI-S--2667--SE, 2007 (IET International conf. on Radar Systems, Radar 2007, Proc. on CD 04a.2).

8. Rapport Systemkoncept 3D-avbildande radar

Erickson Roland, FOI Memo 2168, 2007.

9. Utvärdering av konform experimentantenn

Erickson Roland, FOI Memo 2167, 2007.

10. Flexibla mikrovågssystem - Årsrapport 2007

Erickson Roland, Martin Torleif, Petterson Lars, Grahn Per, Boman Tomas, Björklund Svante, Malmqvist Robert, Nelander Anders, FOI Memo 2243, 2007.

11. Experimental investigation of a conformal array antenna on a UAV-nose mock-up

Pettersson Lars, Martin Torleif, Huss Lars Gunnar, Erickson Roland, Lundén Olof, Leijon Stig, FOI-S--2999--SE, (5th European Workshop on Conformal Antenna, EWCA 2007).

12. Wideband and wide scan phased array micro-strip patch antennas for small platforms.

Erickson Roland, Gunnarsson Ronny, Martin Torleif, Huss Lars Gunnar, Pettersson Lars, Andersson Patrik, Ouacha Aziz, FOI-S--2721--SE, (2nd European conf. on antennas and propagation, EuCAP 2007).

13. Kompakta radarsystem på små farkoster - den internationella utvecklingen

Erickson Roland, FOI Memo 2379, 2008.

14. Onera Drive Project

Nouvel J F, Ruault du Plessis O, Svedin Jan, Gustafsson Andreas, FOI-S--2844--SE, 2008 (EUSAR 2008, pp. 273-275).

15. Konferensbidrag inom 3D-avbildande radar

Gustafsson Andreas, FOI Memo 2429, 2008, (FOI-S--2844--SE).

16. Beamforming methods in terrain scattering scenarios

Nelander Anders, FOI-S--2870--SE, 2008, (Radio science and communications & mathematical modelling of wave phenomena, pp. 207-211).

17. STAP for Detection of Ground Targets, Simulation Program and First Results

Björklund Svante, FOI Memo 2517, 2008.

18. Fast-Time STAP for Clutter Suppression in Bistatic Radar - First Results

Björklund Svante, Nelander Anders, FOI Memo 2575, 2008.

19. Analys av radarförmågor under en internationell insats

Grahn Per, Nelander Anders, FOI Memo 2577, 2008.

20. Flexibla Mikrovågssystem - Slutrapport

Gustafsson Andreas, Boman Tomas, Björklund Svante, Frölind Per-Olov, Grahn Per, Gunnarsson Ronny, Gustafsson Magnus, Malmqvist Robert, Nelander Anders, Pettersson Lars, Svedin Jan, FOI-R--2623--SE, 2008.

7.3 Konferenspublikationer

Antenn-06 Linköping maj 2006	Broadband_arrays_with_dualpolarized_elements R. Gunnarsson, G. Huss, P. Andersson, S. Leijon, R. Erickson.
EuMW 2006 Manchester, UK sept 2006	RF-MEMS and GaAs Based Reconfigurable RF Front-End Components for Wide-Band Multi-Functional Phased Arrays R. Malmqvist, A. Gustafsson, et. al.
EWCA-07 Bristol UK sept 2007	Experimental investigation of a conformal array antenna on a UAV-nose mock-up L. Pettersson, T. Martin, G. Huss, R. Erickson, O. Lundén, S. Leijon.
IET_Radar2007 Edinburgh UK okt 2007	Beamforming in terrain scattered jamming A. Nelander
EUCAP-07 Edinburgh UK nov 2007	Wideband and wide scan phased array micro-strip patch antennas for small platforms R. Erickson, R. Gunnarsson, et. al.
APMC 2007 Bangkok, Thailand dec 2007	On the Use of MEMS Phase Shifters in a Low-Cost Ka-Band Multifunctional ESA on a Small UAV R. Malmqvist, A. Gustafsson, T. Boman, et. al.
GHz 2008 Göteborg mars 2008	MEMS Phase Shifters for an affordable Low-Power Ka-Band Multifunctional ESA on a Small UAV R. Malmqvist, et. al.
EUSAR 2008 Friedrichshafen, Tyskland juni 2008	ONERA DRIVE Project J. F. Novel, O. Ruault du Plessis, J. Svedin, A. Gustafsson.
RVK 08 Växjö juni 2008	Beamforming Methods in Terrain Scattering Scenarios A. Nelander
Smart Systems Integration Conf. Bryssel mars 2009	A 20 GHz antenna integrated RF MEMS based router and switching networks made on quartz R. Malmqvist, et. al.

7.4 Övrigt

Projektets verksamhet har beskrivits i branchtidningen Elektronik i Norden, nummer 4, mars 2007. De två artiklarna med titlarna "*Små smygande plattformar*" och "*MEMS kan vara lösningen*" är skrivna av Jonas Karlsson och beskriver delar av vår UAV-relaterade forskning.

8 Referenser

- [1] W. Wirth, "Radar techniques using array antennas", The Institution of Electrical Engineers, London, UK, 2001, ISBN 0 85296 798 5.
- [2] http://www.raytheon.com/capabilities/products/stellent/groups/sas/documents/legacy_site/cms01_050831.pdf
- [3] <http://www.es.northropgrumman.com/solutions/apg68/index.html>
- [4] <http://en.wikipedia.org/wiki/SMART-L>
- [5] R. Erickson, "Kompakta radarsystem på små farkoster - den internationella utvecklingen", FOI Memo 2379, FOI Sweden, 2008.
- [6] K. W. Sorensen and G. R. Sloan, "MiniSAR: A Miniaturized, Real-Time, Fine-Resolution SAR for Tactical UAVs", Sandia Research Laboratories presentation Nov. 16, 2005.
- [7] J. J. Maciel et. al., "MEMS Electronically Steerable Antennas for Fire Control Radars", IEEE Aerospace & Electronic Systems Magazine, pp. 17-20, Nov., 2007.
- [8] K. van Caekenberghe et al., "Ka-band MEMS TTD passive electronically scanned array (ESA)", Proc. of IEEE International Antennas and Propagation & URSI Symposium, Albuquerque, NM, USA, Jul., 2006.
- [9] R. Malmqvist, C. Samuelsson, A. Gustafsson, T. Boman, R. Erickson, T. Vähä-Heikkilä, P. Rantakari, "On the Use of MEMS Phase Shifters in a Low-Cost Ka-Band Multifunctional ESA on a Small UAV", Asia-Pacific Microwave Conf., Bangkok, Dec. 11-14, 2007.
- [10] H. Frennberg et. al., "Simulation platform for Multifunction RF-Systems", FOI-R--0646--SE, FOI, Sweden, 2002.
- [11] J. E. Svensson et. al., *FoRMA/LUST-BA Behovsanpassad Situationsuppfattning för Internationell Insats, Årsrapport*, FOI-R--0388--SE, FOI, Sweden, 2002.
- [12] *Slutrapport IPT UAV, Nyttöanalys*, FMV Dnr UOFlyg 3581:60732/03, 2003-10-29, FMV, Sweden, 2003.
- [13] A. Nelander, R. Gunnarsson, R. Malmqvist, "Radarsystem och bredbandiga flerfunktionsantennor, Sammanfattande slutrapport", FOI Memo 1987, 2007-02-23.
- [14] A. Nelander, "Beamforming in terrain scattered jamming", IET International Conference on Radar Systems, Radar 2007, Edinburgh, UK, Oct., 2007, Proc. CD 04a.2.
- [15] A. Nelander, "Beamforming Methods in Terrain Scattering Scenarios", Radio Science and Communications, RVK 08, Växjö June 2008, pp. 207-211.
- [16] U. Backlund, L. Björnström, T. Isacson, "FoRMA 1998-2003 - att forma det framtida svenska försvaret", FOI-R--1197--SE, 2004.
- [17] G. Kindvall (red), "FoRMA - Årsrapport 2004", FOI-R--1453--SE, Dec., 2004.
- [18] P. Alvå (red), "FoRMA Teknik. Arbetslägesrapport och preliminära resultat", FOI-R--1407--SE, Nov., 2004.
- [19] P. Grahn, A. Nelander, "Analys av radarförmågor under en internationell insats", FOI Memo 2577, Nov., 2008.
- [20] T. Berg, F. Lantz, D. Strömberg, "Plattformer i nätverk - Mjukvaruarkitektur och operatörstjänster", FOI-R--0696--SE, 2002.
- [21] S. Björklund et al., "A Matlab toolbox for radar array processing", Proc. of the Int. Symp. on Signal Processing and its Applications, Aug., 1999, pp. 547-550.
- [22] S. Björklund, P. Grahn, A. Nelander, M. I. Pettersson, "Measurements of Rank and Other Properties of Scattered Signals", submitted to IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems.

- [23] M. Karlsson et. al., "*Utvärdering av SPECRAY EM. Ett programpaket för radarsignaturberäkningar och radarsimuleringar*", FOI-R--1354--SE, FOI, Sweden 2004.
- [24] J. Kujansuu,, "*Small UAV systems at battalion level – an analysis for practical application*", FHS: 19 100:2072, Sweden, 2004.
- [25] W. Gautier et al., "*LTCC patch array for RF-MEMS based phased array antenna at 35 GHz*", Proc. of the 38th European Microwave Conference, Amsterdam, The Netherlands, Oct., 2008, pp. 151-154.
- [26] C. Neuman et al., "*Ka-band seeker with adaptive beam forming using MEMS phase shifters*", Proc. of the 5th European Radar Conference, Amsterdam, The Netherlands, Oct., 2008, pp. 100-103.
- [27] R. Malmqvist et. al., "*COSMOS Final report WP2*", FOI memo 2093, June 2007.
- [28] <http://www.mems4mmic.com/>
- [29] R. Malmqvist et al., "*A 20 GHz antenna integrated RF MEMS based router and switching networks made on quartz*", to be presented at the Smart Systems Integration Conference, Brussels, Belgium, Mar., 2009.
- [30] B. Carlegrim, S. Hagelin, R. Gunnarsson, L. Pettersson, R. Erickson "*Characteristics of a Wideband Antenna Array*", Proc. JINA, Nice, France, Nov., 12-14, 2002.
- [31] R. Erickson, A. Ouacha, B. Carlegrim, L. Pettersson, R. Gunnarsson, C. Samuelsson, S. Leijon, "*Dual Polarized Wideband Antenna Arrays with Reconfigurable Beamforming and Beamshaping*", Proc. EuCAP06, Nice, France, Nov., 6-10, 2006.
- [32] R. Erickson, R. Gunnarsson, T. Martin, L.-G. Huss, L. Pettersson, P. Andersson, A. Ouacha, "*Wideband and wide scan phased array microstrip patch antennas for small platforms*", Proc. EUCAP07, Glasgow, Scotland, Nov. 11-16, 2007.
- [33] A. Gustafsson, R. Malmqvist, T. Martin, J. Svedin, R. Erickson, A. Nelander, L. Pettersson, P.-O. Frörlind, "*Antenna and front-end technology for multifunction systems on small vehicles*", FOI-R--2156--SE, Teknisk rapport, FOI Linköping, 2006.
- [34] R. Gunnarsson, G. Huss, P. Andersson, S. Leijon, "*Broadband arrays with dual-polarized, aperture-coupled microstrip antenna elements*", Proc. Antenn 06, Linköping, Sweden, pp.221-226, 2006.
- [35] T. Martin, "*Broadband Electromagnetic Scattering and Shielding Analysis using the Finite Difference Time Domain Method*", Ph.D. Thesis No. 669, Linköpings University, 2001, Linköping, Sweden.
- [36] T. Martin, "*Experimental investigation of a conforma array antenna on a UAV-nose mock-up*", Presentation at 5th European Workshop on Conformal Antennas (EWCA 2007), Bristol, England, Sep. 10-11, 2007.
- [37] T. Martin, "*Experimental investigation of a conforma array antenna on a UAV-nose mock-up*", Proc. 5th European Workshop on Conformal Antennas (EWCA 2007), Bristol, England, Sep. 10-11, 2007.
- [38] Proc. of the 3rd European Workshop on Conformal Antennas (EWCA 2003), Bonn, Germany, Oct. 22-23, 2003.
- [39] T. Martin, "*A visualization tool for conforma antenna arrays on platforms*", Proc. 4th European Workshop on Conformal Antennas (EWCA 2005), Stockholm, Sweden, 23-24 May, 2005.