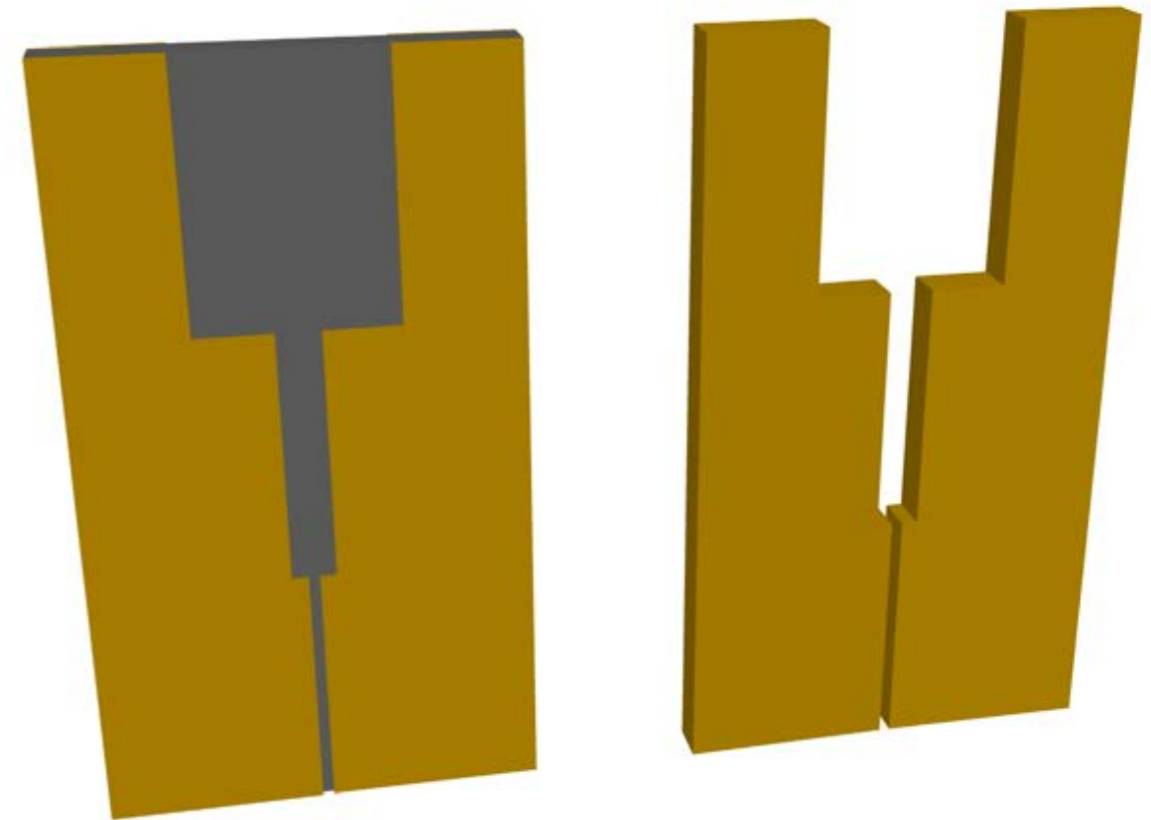


ANDREAS GUSTAFSSON (EDITOR), ANDERS NELANDER,
SVANTE BJÖRKLUND, ANNA POHL, LARS KROON, PATRICK ANDERSSON



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 (editor), Anders Nelander,
Svante Björklund, Anna Pohl, Lars Kroon,
Patrick Andersson

Multifunktionella Gruppantenner

Årsrapport 2012

Bild/Cover: Taperade Notchelement -layoutbild

Titel	Multifunktionella Gruppantenner - årsrapport 2012
Title	Multifunctional Phased Array Antennas - yearly report 2012
Rapportnr/Report no	FOI-R--3544--SE
Månad/Month	dec/Dec
Utgivningsår/Year	2012
Antal sidor/Pages	25 p
ISSN	1650-1942
Kund/Customer	FM (Swedish Armed Forces)
FoT område	Sensorer och signaturteknik
Projektnr/Project no	E54003
Godkänd av/Approved by	Lars Bohman
Ansvarig avdelning	Sensorer- och TK-system

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

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

Sammanfattning

Projektet Multifunktionella Gruppantennar studerar området multifunktionella gruppantennar ur flera olika aspekter och på flera olika nivåer.

Ett utkast på kravbild för multifunktionella gruppantennsystem för olika plattformar, exempelvis laptop, helikopter, fordon, UAV och soldat har tagits fram. Parametrar som tillgänglig antenntyta, effekttillgång och frekvens har beaktats. Syftet med aktiviteten är att på ett tydligt sätt se hur ett system skulle kunna användas för flera olika funktioner (multifunktionssystem).

Mätuppställningen för 3D-SAR (Syntetisk AperturRadar) har använts för att utvärdera koncepten uttunnade och kompakta mottagararrayer. Årets mätkampanj visar att konceptet fungerar väl. Nyttan med 3D-SAR-tekniken är att den reducerar problem med skuggning av föremål bakom exempelvis höga byggnader och förväntas därmed ge väsentligt förbättrade möjligheter till underrättelseinhämtning i urbana miljöer jämfört med dagens teknik [2].

På antennområdet har en ny designmetod för ett snabbare sätt att konstruera välanpassade Vivaldielement utvecklats [18]. En första lösning för en textilintegrerad kommunikationsantenn har också tagits fram och testats. Målet med verksamheten är att öka smidigheten för en soldat genom att minska antalet nödvändiga externa antenspröt. Även en seriematad patchantennarray för en switchad antennlösning för 3D-SAR har designats, tillverkats och verifierats under 2012.

Inom området signalbehandling har studierna av undertryckning av klotter och störning med hjälp av gruppantennar fortsatt. Även upptäckt av rörliga och svårupptäckta mål har studerats.

Inom området radararkitekturer studeras olika val av arkitekturrealiseringar med inriktning mot att maximera prestanda, reducera komplexiteten, effektförbrukningen och även kostnaden. Prestandakrav för ingående komponenter simuleras, detta för att identifiera vilka delar som är mest kritiska för hela systemens prestanda och dessutom var den största förbättringspotentialen finns.

Vi ser även fruktbara synergieffekter med Eu-projekten MEMS-4-MMIC, NANOTEC och AIRBEAM och det VINNOVA-finansierade Eurostarsprojektet HumanFinder.

Under året har även avtappning till Gripen VU-projektet skett genom utveckling av en radarsimulator för förbättrad radar till JAS 39 Gripen.

Nyckelord: multifunktion, gruppantennar, 3D-SAR, utglesade arrayer, Vivaldi, antenner, signalbehandling, textilantenn, AESA, PESA, UAV, energisåla, kompakta, MEMS, urbana miljöer, radar, sensorer

Summary

The Project Multifunctional Phased Array Antennas study the area of multifunctional phased array antennas from several different approaches and system levels.

A draft of system parameter evaluation of multifunctional phased array antennas for candidate platforms, for example laptop lid, helicopter, hand held soldier system and medium size UAV has been developed. Parameters such as available area for the antenna, available DC-power and choice of frequency have been discussed. The aim of the study is to in a more clear way identify how such a system can be used in a multifunctional way (multifunctional system).

The measurement setup for 3D-SAR (Synthetic Aperture Radar) has been used for a measurement campaign to verify sparse and compact receiver arrays verified by measurements. The campaign results indicate that the concept works well. The benefits by using the 3D-SAR-concept is that it reduces the shadowing effects behind for example high buildings and thus an improved the capability of intelligence acquirement in urban environments is expected compared to the commonly used technologies today [2].

In the antenna area a new and fast design method for Vivaldi antenna elements has been developed and evaluated [18]. An experimental textile integrated antenna for soldier has also been designed, manufactured, measured and tested. The aim of the study is to improve the flexibility for a soldier by reducing the number of needed external antennas. A series fed patch antenna array for a switched antenna realization for 3D-SAR has also been designed, manufactured and verified during 2012.

We have in the area of signal processing continued our studies of phased array antennas suppression of clutter and jammers capability. We have also studied detection of moving targets as well as low probability of intercept targets.

Within the area of radar architectures different architecture topologies are studied with focus on optimizing the radar performance, reducing the complexity and power consumption, but also lower the manufacturing costs.

We also see fruitful synergy effects by the EC-projects MEMS-4-MMIC, NANOTEC and AIRBEAM and the VINNOVA-financed Eurostarsproject HumanFinder.

The project has also given input to the Gripen VU-project by development of a radar simulator for improved radar in JAS 39 Gripen.

Keywords: multifunction, phased arrays, 3D-SAR, sparse, Vivaldi, antennas, signal processing, textile antenna, AESA, PESA, UAV, energy starved, compact, MEMS, urban environments, radar, sensors

Innehållsförteckning

1	Inledning	7
2	Forskningsresultat	8
2.1	Multifunktionella gruppantennor	8
2.1.1	Applikationsexempel	8
2.2	3D-SAR	9
2.3	Systemanalys och signalbehandling	11
2.3.1	Undertryckning av terrängreflektad störning	11
2.3.2	Detektion av rörliga markmål med radar med konforma antennor	12
2.3.3	Programvara för modellering, simulering och signalbehandling för radar	14
2.3.4	Gripen radarsimulator	14
2.4	Radararkitekturer	14
2.5	Antennteknik	16
2.5.1	Textilintegrerade antenner	16
2.5.2	Stegade notchelement	16
2.5.3	Seriematad antenn till 3D-SAR-mätsystemet	17
2.5.4	Diagramsyntes	19
3	Internationella samarbetsprojekt	20
3.1	SPREWS - SPRINT - ACACIA	20
3.2	MEMS-4-MMIC	20
3.3	NANOTEC	21
3.4	AIRBEAM	21
3.5	HumanFinder	21
4	Leveranser	22
4.1	FOI rapporter och memon	22
4.2	Konferensartiklar	22
4.3	Tidskrifter	23
4.4	Samarbetsrapporter	23
4.5	Granskning av tidskriftsartikel	23
5	Referenser	24

1 Inledning

Projektet bedriver forskning inom området multifunktionella mikrovågssystem.

Vi utvecklar, simulerar och värderar nya systemkoncept i huvudsak avsedda för små rörliga plattformar. Forskningen är inriktad mot lätta, kompakta, energisnåla och kostnadseffektiva system för olika spaningsbehov - exempelvis upptäckt av hot på marken, i urban miljö, eller i luften, upprättande av lägesbild och detektion av större förändringar och förflyttningar, kartera terräng/bebyggelse och verkansverifiering i mörker, rök och damm. Systemen ska även kunna konfigureras till andra funktioner, exempelvis se-undvika funktion och kommunikationslänk. Områden vi fördjupar oss i inkluderar systemanalys av multifunktionella gruppantennsystem, 3D-SAR, systemsimulering, radararkitekturer och antennteknik.

De projektmål vi har är att demonstrera, studera och värdera tekniska förutsättningar och arkitekturer för mikrovågssensorer, baserade på gruppantennteknik, vars egenskaper kan anpassas i realtid till olika sensoruppgifter och scenarier, exempelvis Se-undvika funktion, kommunikationslänk och sidtittande SAR och GMTI. Vi studerar även koncept för 3D-SAR på små plattformar för underrättelseinhämtning i urbana miljöer.

Som effektmål ser vi följande: Att för FM visa på styrkan med och nyttan av multifunktionella mikrovågssystem och 3D-SAR för spaning mot mål på ytan, på marken, i urban miljö och i luften och samtidigt presentera förslag på kostnadseffektiva realiseringar genom utveckling av nya systemarkitekturer, exempelvis genom reduktion av nödvändig ingående hårdvara.

Projektet har samarbete med ett flertal länder inom olika samarbeten. I samarbete med EUs FP7-program har vi under 2012 deltagit i tre projekt, MEMS-4-MMIC, NANOTEC och AIRBEAM. Verksamheten har i huvudsak varit att utvärdera, på systemnivån, inverkan av fasskiftare med mycket låga förluster. I samarbete med VINNOVA och Eurostarsprogrammet utvecklas en gruppantenn för personsökning i rasmassor inom projekt HumanFinder. Utvecklingen sker i samarbete med FM-projektet Radar för stridsfältövervakning.

FM och FMV får genom projekt Multifunktionella Gruppantenner kunskap om radarsystem för bland andra följande funktioner: upptäckt och klassning av mål i urban eller kuperad terräng, kartering av terräng/bebyggelse, verkansverifiering i rök och damm och se-undvika funktion. Ett annat exempel på nytta för kunden är den avtappning i form av input till Gripen VU-projektet i form av utvecklingen av en radarsimulator för förbättrad radar till JAS 39 Gripen. Under året har vi också haft en projektpresentation för chef AFRL och FoT-ordförande med flera vid 16:e Air-Senior National Representatives Meeting mellan USA och Sverige den 19:e juni.

Genom projektets internationella samverkan får FM och FMV också tillgång till internationella forskningsresultat. Arbetet förväntas på sikt ge försvarsmakten och FMV kunskap om kravställning och realiserbarhet på system och vilken spaningsförmåga ett materielsystem, t.ex. en UAV, utrustad med ett dylikt mikrovågssystem kan uppnå. FOI kan dessutom både bibehålla en hög kunskapsnivå inom området och även utöka sin kompetens genom samarbetsprogrammen.

2 Forskningsresultat

Projektet är verksamt inom flera olika delar inom ämnesområdet. Nedan följer en sammanfattning av årets verksamhet inom respektive delområde. Till stor del refererar vi till tidigare utgivna rapporter och konferensbidrag och ger här mer en översikt av 2012 års insats. Vi bedömer att rapporten härmed blir mer lättöverskådlig och därmed mer lättläst. En utförlig beskrivning av tidigare arbete inom delområdena finns att läsa i rapporten Mikrovågssystem för 3D-marksplaning -teknisk sammanfattning [1].

2.1 Multifunktionella gruppantenner

Digitala gruppantenner har många fördelar i jämförelse med analoga gruppantenner och enskilda antenner. Flera samtidiga lobber och även flera olika funktioner kan realiserats med digitala gruppantenner. Dess flexibilitet är mycket stor eftersom all information som antennen tar emot finns tillgänglig och lobber i valfria riktningar kan realiserats utan att data från någon riktning kastas bort, vilket är fallet för analoga gruppantenner. Möjlighet till adaptiv störundertryckning och god sidolobskontroll är ytterligare kännetecken för digitala gruppantenner. Anledningen till att mycket få fullständigt digitala gruppantenner används är dess höga komplexitet, krav på hög dataakt och höga kostnad. För att minska dessa nackdelar realiserats ofta en blandning av digitala och analoga gruppantenner genom så kallade delantennindelning, där ett antal antennelement summeras till en digital kanal.

Med hjälp av det utvecklade 3D-SARsystemet, se [2] och avsnitt 2.2, kan man göra vissa demonstrationer av multifunktionella gruppantenner som inte kan göras med våra tidigare utvecklade digitala gruppantenner [3]. Grunden för detta är att skannern är betydligt större än de fulla arrayerna beskrivna tidigare. Bandbredden är också betydligt större, 3.7 GHz, även om 3D-SARsystemet gör att denna inte är rent momentan. Fjärrfältavståndet är dock mycket större, flera hundra meter, än det mätavstånd vi kan åstadkomma inomhus, vilket gör att signalprocessningen blir något annorlunda. Systemets sekventiella uppbyggnad av en array i gruppantennendimensionen gör dock att det inte går att använda andra källor om dessa inte kan fasläsas till mottagaren. Med andra ord krävs det en ombyggnad om flera källor ska användas under ett experiment.

System har i nuläget endast en sändare och en mottagare som kan förflyttas för att simulera en mycket stor arrayantenn. En uppgradering inom en snar framtid innebär en övergång till en switchad lösning vilken förväntas vara betydligt snabbare än dagens system. Det finns dock stora begränsningar vad gäller att åstadkomma fasriktiga mätningar vilket ställer till det när man skall simulera olika funktioner som kräver momentan fasriktighet hos samtliga kanaler.

Möjliga demonstrationer:

- Tillämpa annan signalbehandling på redan gjorda mätningar samt komplettera med nya mätfall.
- Extrahera mätresultat motsvarande en mycket stor digital 2-D gruppantenn (256x256 kanaler).

Målet med demonstrationen är att experimentellt verifiera nyttan med digitala gruppantenner genom att experimentellt realisera radarfunktioner som flera samtidiga lobber och störundertryckning. En kommunikationslänk kan realiserats grovt genom mottagarantennen som används i syfte att mata storkällorna. Resultatet blir i slutändan exempelvis generering av ett antenndiagram som samtidigt riktar lobber mot de olika målen och har minima i storkällornas riktningar.

2.1.1 Applikationsexempel

Olika plattformar för multifunktionella gruppantennsystem har identifierats, exempelvis laptop, helikopter, fordon och soldat. Parametrar som tillgänglig antennyta, effekttillgång

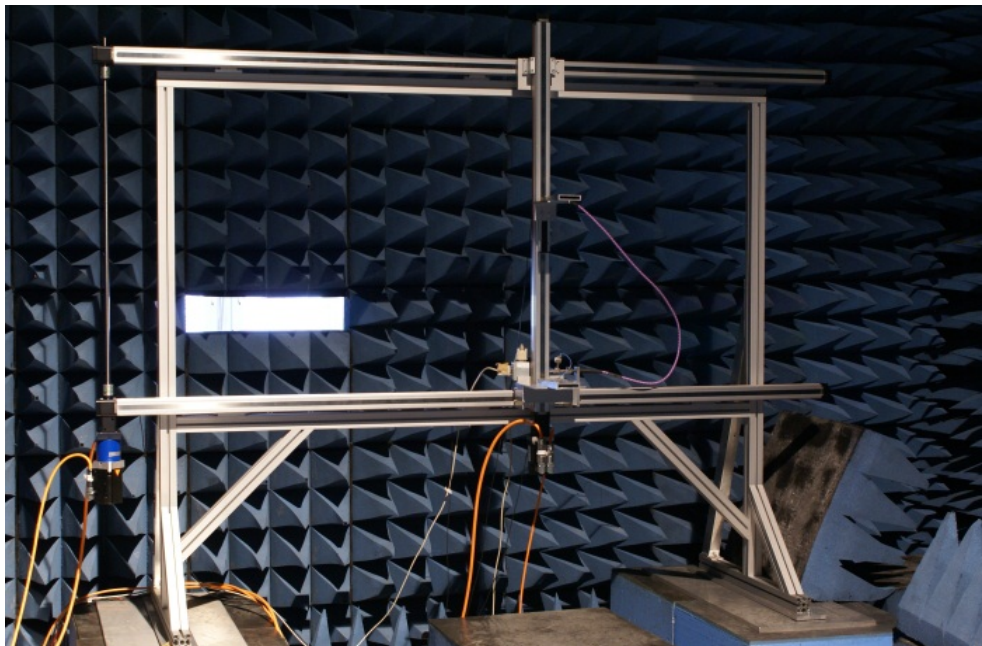
och frekvens har beaktats. Syftet med aktiviteten är att tydligare se hur ett system skulle kunna användas för flera olika funktioner (multifunktionssystem). Tabell 1 presenterar vårt arbete hittills.

Tabell 1: Identifierade plattformar och antagna parametervärden.

	Soldat	Fordon	Fartyg	UAV	Flyg	Helikopter	Satellit	Laptop
Operativt område	Luft	Luft	Sjö	Sjö	Sjö	Sjö	Sjö	
Operativt område	Mark	Mark	Luft	Luft	Luft	Luft	Luft	Luft
Operativt område				Mark	Mark	Mark	Mark	Mark
Frekvens (GHz)	12 till 18	4 till 6	2 till 4, 8 till 12	33 till 37	8 till 12	8 till 12	8 till 12	12 till 18
Uteffekt (W)	5	100	100	10	100	20	5	10
Tillgängligt utrymme (m2)	0,05	> 1	> 10	0,05	0,1	> 0,1	> 0,3	> 0,05
Antenngain (dB)	32	35	41	39	31	31	36	32
Upplösning (grader)	5	4	2	1	5	5	5	5
Antal element	500	1111	4000	2722	444	444	1333	500
SNR @ 10 km (dB)	-2,4	27,1	42,7	8,0	13,1	6,1	9,6	0,6
	22,4 dB vid 10-6 False Alarm rate, 90% Pr.		detection					

2.2 3D-SAR

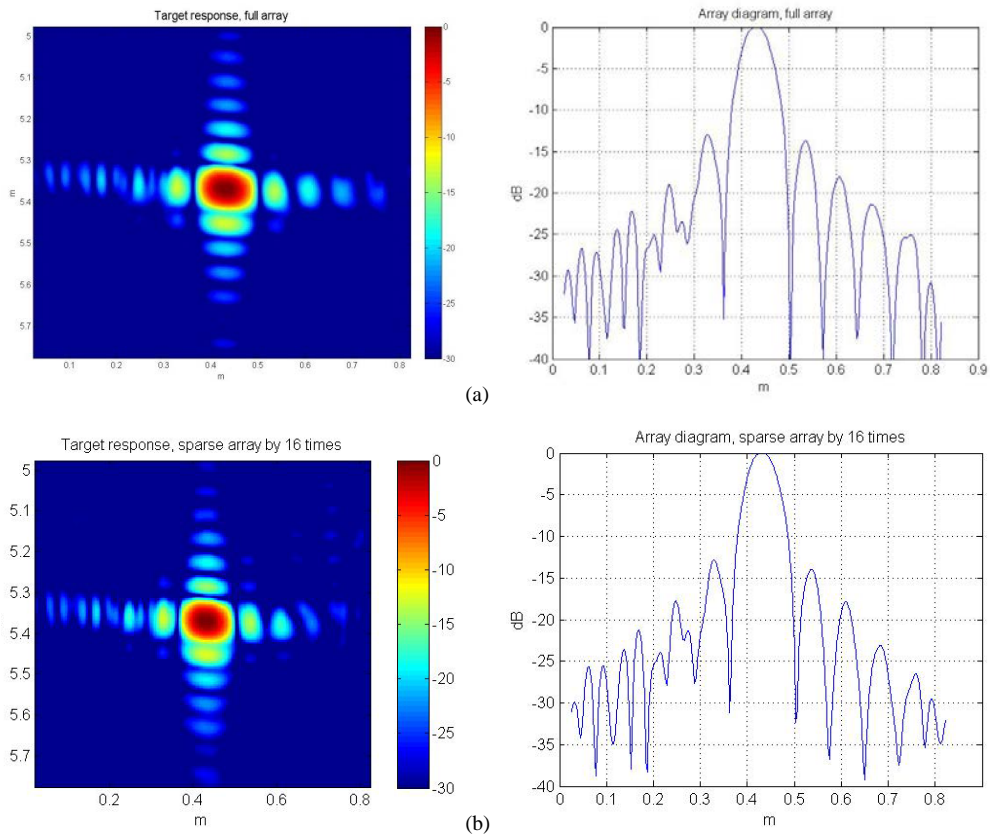
3D-SAR ger upplösning i tre dimensioner (i SAR-led genom förflyttning längs x-axeln, tvärs förflyttningen (y-led) genom en gruppantenn och i djupled (z-led) genom radarns frekvenssvep). Till skillnad från traditionell SAR ges även upplösning i höjded, dessutom är betraktningvinkeln för 3D-SAR rakt ovanifrån, vilket reducerar problem med skuggning av föremål bakom exempelvis höga byggnader. Den här kombinationen av attraktiva egenskaper förväntas ge väsentligt förbättrade möjligheter till underrättelse-inhämtning i urbana miljöer jämfört med den teknik som finns tillgänglig idag.



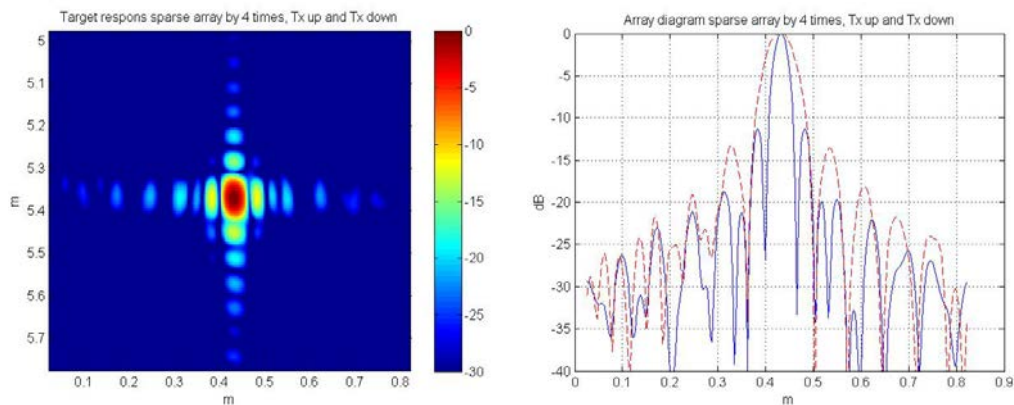
Figur 1: Mätupställning för studie av uttunnade antennarrayer.

En mycket stor antennlängd och tillhörande många antennelement i tvärsiktningen krävs dock normalt för att nå tillräcklig upplösning tvärs flygriktningen. Koncept för uttunnade och kompakta antennarrayer studeras därför [4] och en mätuppställning, se figur 1, för valideringsmätningar av koncepten, men även för att utvärdera och demonstrera möjligheterna med 3D-SAR, har utvecklats.

Flera mätkampanjer med systemet har gjorts [1], [2] vilka visar att konceptet uttunnade antennarrayer med multipla sändare och kompakta antennarrayer fungerar väl. Resultaten har även presenterats vid den Europeiska Mikrovågsveckan i Manchester i oktober 2011 [5] och under workshopen CoSeRa 2012 i Bonn i maj 2012 [6]. Resultaten av våra mätningar är goda och visar både att det går att tunna ut antennarrayerna kraftigt genom att nyttja multipla sändarpositioner utan att påverka målsvaret för gruppantennen nämnvärt. Under 2012 mättes och jämfördes uttunnade mottagararrayer med uttunningsfaktorerna 2, 4, 8 och 16 gånger. Även kompakta mottagararrayer för respektive uttunningsfaktor mättes. Resultaten sammanfattas i [6] och redovisades under workshopen CoSeRa. Figur 2 visar en jämförelse av målsvar för en fullbestyckad gruppantenn (a) och en uttunnad antennarray med en faktor om 16 gånger (b). Figur 3 presenterar målsvar för en kompakt antennarray med 4 gångers uttunningsfaktor.



Figur 2: Jämförelse av målsvar för en fullbestyckad gruppantenn (a) och en uttunnad antennarray med en faktor om 16 gånger (b).



Figur 3: Målsvar för en kompakt antennarray med 4 gångers uttunningsfaktor. Streckad linje visar antenndiagram för arrayen med sändararray på endast ena sidan om mottagararrayen.

Under 2013 planeras en switchad antennlösning tas fram. Förflyttning i gruppantennledd behövs ej då och därmed kan systemets mättid reduceras avsevärt. Vi kommer dessutom närmare en mer praktiskt realiserbar lösning med en switchad systemlösning.

2.3 Systemanalys och signalbehandling

Inom systemanalys och signalbehandlingsområdet har vi dels skrivit en tidskriftsartikel, vilken är accepterad för publikation och dels bidragit till rapporten "Mikrovågssystem för 3D-marksplaning -teknisk sammanfattning" [1], där vi i kapitlet "3 Signalbehandling" sammanfattar vår verksamhet om klotterundertryckning med konforma antenner; klotterundertryckning vid bistatisk radar; undertryckning av reflekterad störning; klotterundertryckning och detektion med STAP (Space Time Adaptive Processing) under 2009-2011.

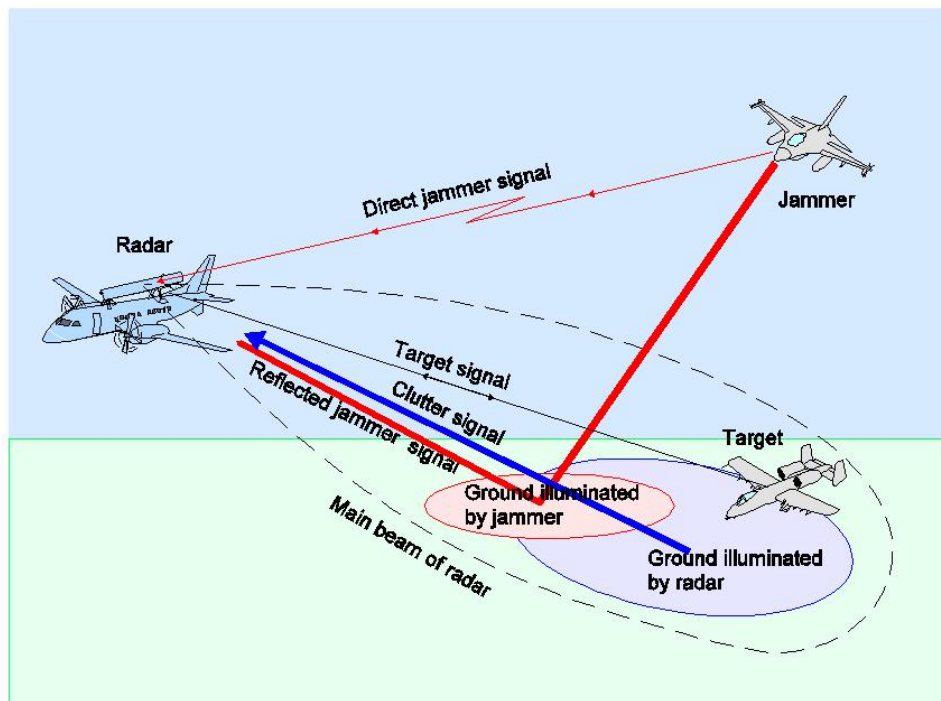
2.3.1 Undertryckning av terrängreflekterad störning

Vi har under 2012 slutfört arbetet med en tidskriftsartikel om undertryckning av terrängreflekterad störning, vilken är accepterad för publikation i IET Radar, Sonar & Navigation (Svante Björklund, Anders Nelander, Mats I. Pettersson). På svenska blir titeln "Undertryckning av terrängreflekterad störning med hjälpkanaler - Reflexsystemet och radarprestanda".

I artikeln diskuteras terrängreflekterad störning (TSI), vilket är ett stort problem för militär flygburen radar, se figur 4. I en metod som kallas "auxiliary beam TSI suppression" ("undertryckning av TSI med hjälpkanaler") skattas TSI i radarns huvudlob med en eller flera hjälpkanaler och subtraheras från huvudlobssignalen. Signalen att subtrahera är hjälpkanalernas signal som har gått genom en skattning av "reflexsystemet", vilket beskriver reflektionen i terrängen.

Vi presenterar först resultat på strukturen hos denna TSI-undertryckning, på skattningen av reflexsystemet och på kvaliteten hos skattningen. Sedan härleder vi teoretiska uttryck för SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio) och den kvarvarande TSI-effekten för en hjälpkanal. Eftersom SINR är direkt kopplat till radarprestandan i form av detektions-sannolikhet, detektionsavstånd och inmättningsnoggrannhet, kan vi se vilka faktor som påverkar prestandan och hur. Vi observerar att när det skattade systemet saknar en eller flera fördröjningar hos det sanna systemet, kan inte TSI-filtret undertrycka TSI-signalen

fullständigt. Detta fenomen, som vi kallar "TSI-läckage", har en mycket stor påverkan på prestandan.



Figur 4: Radarscenario med (kallt) klotter, direkt störning och reflekterad störning (hett klotter).

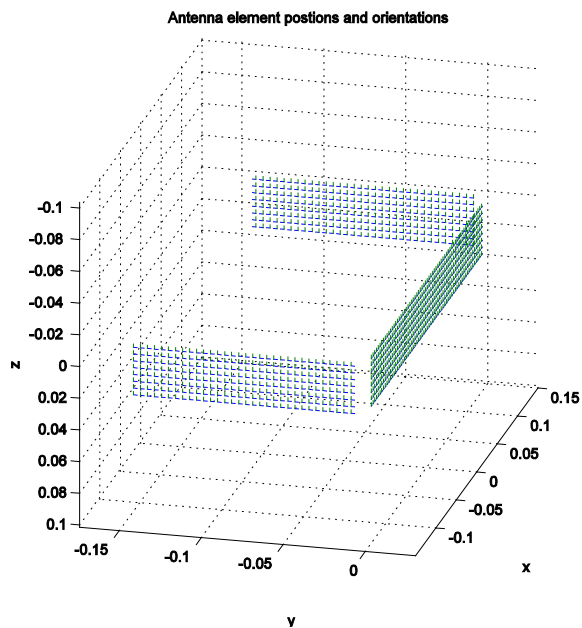
2.3.2 Detektion av rörliga markmål med radar med konforma antenner

För att kunna upptäcka, lokalisera och följa markmål med radar från en flygande plattform är det av största vikt att undertrycka klotret (radarekona) från marken för att undvika att målsignalen drunknar i klottersignalen. Vi har tidigare beskrivit i [1] att en effektiv undertryckning kräver samtidig filtrering i både doppler- och riktningdimensionerna. Denna filtrering brukar kallas STAP (Space Time Adaptive Processing) och kräver en antenn med flera antenncanaler, d.v.s. en gruppantenn.

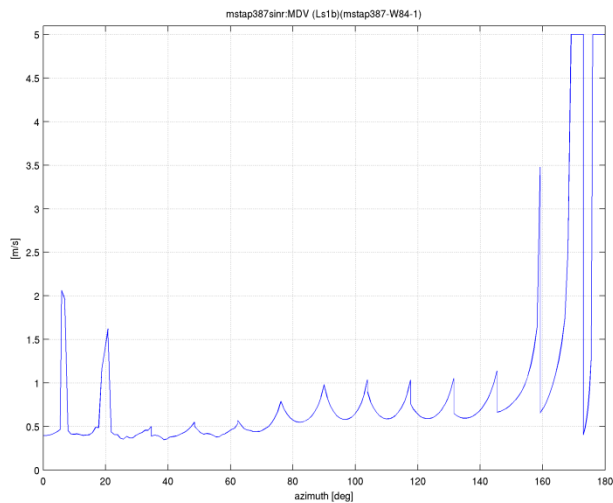
Området har vi arbetat med i flera år [7], [8] och under 2012 har arbetet varit inriktat mot modellering av en antenn, bestående av tre plana aperturer, en framåtriktad och en åt vardera vänster och höger sida, se figur 5. Vid sändning används en 8x8 elements delantenn i mitten på den apertur som har normalriktning närmast lobriktningen. Lobriktningen switchas mellan 14 fasta lägen. Vid mottagning kan antennen ha en mängd olika analoga delantennidlingar. Delantennernas lob switchas som sändarloben i 14 fasta riktningar. Syftet med den nya tredelade plana antennen är att kunna göra en bättre och rättvisare jämförelse mellan antenner med plana och facetterade eller mjukt böjda konforma aperturer [1].

Vi har också utökat vårt beräkningsprogram, BSTAP [1], med möjligheten att beräkna SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio), MDV (Minimum Detectable Velocity) och UDSF (Usable Doppler Space Fraction) för alla riktningar och för målhastigheter kring markhastigheten för ett visst avstånd. Ut från simuleringarna får man en stor mängd grafer och bilder. Se figur 6 för ett exempel. De regelbundna topparna i figuren uppkommer på

grund av de fixa loberna hos sändaren och delantennerna hos mottagaren. Notera att nära 180 grader (nära rakt bakåt) blir prestandan mycket dålig.



Figur 5: Den nya antennen med tre plana aperturer, en framåtriktad och en åt vardera vänster och höger sida.



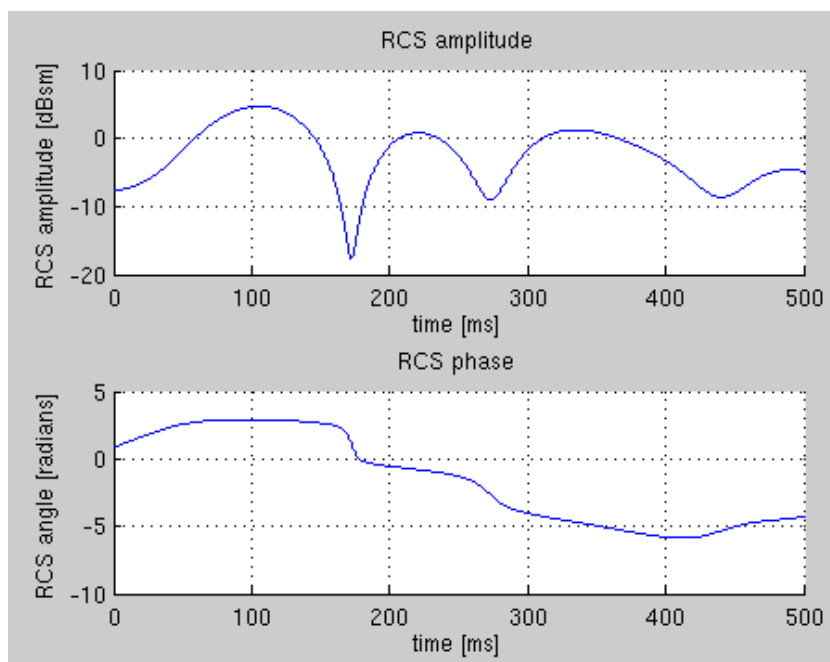
Figur 6: MDV (Minimum Detectable Velocity) för den nya tredelade plana antennen och sidtittande radar. Målvstånd 3 km. Azimut motsvarar olika målriktningar.

2.3.3 Programvara för modellering, simulering och signalbehandling för radar

Sedan tidigare utvecklar vi en Matlab- [9] och Octave- [10] verktygslåda för modellering, simulering och signalbehandling i radar. Verktygslådan, som kallas DBT [11], har under 2012 vidareutvecklats och använts i studierna i avsnitt 2.3.2 och 2.3.4.

2.3.4 Gripen radarsimulator

Vi har deltagit i utvecklingen av en simulator för förbättrad radar i JAS 39 Gripen. Simulatorens bygger på vår programvara för modellering, simulering och signalbehandling för radar, se föregående avsnitt. Under 2012 har vi utvecklat en ny målsignalsimulering med allmänna målbanor, vandring mellan avståndsfällor och amplitud- och fasfluktuationer med målets aspektvinkel, se figur 7. Resultaten sammanfattas i [12].



Figur 7: Exempel på hur amplituden och fasen för radarmålarean varierar med tiden för ett radarmål.

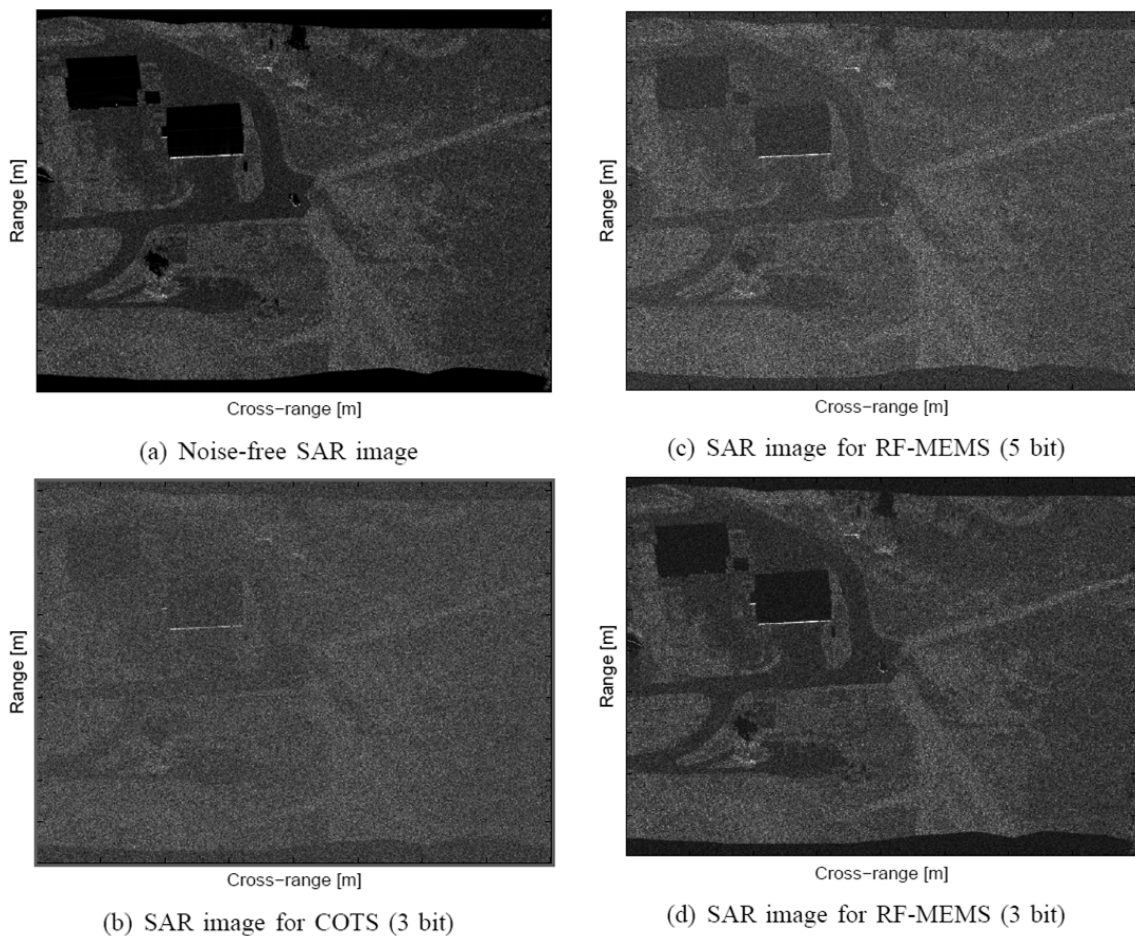
2.4 Radararkitekturer

Under 2012 har verksamheten inom området radararkitekturer dels varit inriktat mot att utveckla en delsystemdemonstrator (i samarbete med medfinansieringsprojekten MEMS-4-MMIC och AIRBEAM) för en PESA-baserad (Passiv Elektriskt Styrbar Antenn) radararkitektur och dels mot en simuleringsstudie av inverkan av fasskiftarförluster för en simulerad SAR-bild över en del av Kvarnområdet. Två konferensbidrag har publicerats [13] och [14], där [13] publicerades på IMS 2012 (The International Microwave Symposium) i Montreal, Kanada och baserades på realiseringen av en MEMS-baserad switch (Micro Electric Mechanical System) kombinerad med två olika lågbrusförstärkare. Kretsen har en uppmätt brusfaktor på 2.4 dB, vilket demonstrerar även i praktiken de låga brusfaktorer vi förväntat oss med MEMS-tekniken och detta öppnar dessutom möjligheten

för den mindre komplexa och billigare PESA-baserade radararkitekturen i jämförelse med AESA-arkitekturen (Aktiv Elektriskt Styrbar Antenn).

Det andra konferensbidraget [14] behandlade simuleringsstudien av inverkan av fasskiftarförluster för en simulerad SAR-bild över en del av Kvarnområdet med olika antagna fasskiftarförluster. I kombination med antagna systemparametrar som mätavstånd, antennstorlek, integreringstider m.fl., simulerades SAR-bilder (inklusive terrängmodeller) över ett område på $100 \times 100 \text{ m}^2$. Resultatet av simuleringarna visas i figur 8 där respektive bild är resultatet vid respektive antagen fasskiftarförlust. Målet med studien var att kvantifiera hur låga fasskiftarförluster som krävs för att en PESA-baserad radararkitektur ska kunna ge en acceptabel prestanda. Såväl RF-MEMS-baserade fasskiftare som transistorbaserade fasskiftare ingick i studien. Resultatet blev att fasskiftarförluster på kring 2 dB ger acceptabel prestanda, vilket ligger i linje med förlusterna för de bästa RF-MEMS-baserade fasskiftarna som nu finns realiserade [15].

För att mer konkret visa på möjligheterna för en PESA-arkitektur har vi även påbörjat arbetet med att ta fram en delsystemdemonstrator av en liten PESA-baserad radarmottagare, vilken bland annat ska visa på mer framtida systemkoncept för radarsensorer inom AIRBEAM-projektet. Demonstratorn ska bestå av antennelement, fördelningsnät, MEMS-baserade fasskiftare och lågbrusförstärkare. Under 2012 har antennelement designats och verifierats. 3-bitars fasskiftare har levererats och håller på att verifieras. Under 2013 planeras delsystemet att sammansättas och utvärderas.



Figur 8: Simuleringsresultat av SAR-bilder där respektive bild är resultatet vid antagna fasskiftarförluster på (a) 0 dB, (b) 4.5 dB, (c) 3.5 dB och (d) 2 dB.

2.5 Antennteknik

2.5.1 Textilintegrerade antenner

Det pågår en stor verksamhet inom området textilintegrerade antenner eller ”wearable antennas” på engelska. Olika aspekter måste tas i beaktande till exempel: Kommer kroppen att influera antennegenskaperna inom vissa frekvensområden? Vilka material är lämpliga att använda som kombinerar hög ledningsförmåga med mekanisk flexibilitet? Vad händer med antennegenskaperna när antennen skrynklas ihop [16].

En textilintegrerad antenn ger soldaten minskad signatur och ökad rörlighet. Realiserbarheten beror dock på frekvensområdet. Om frekvensen är låg (VHF och UHF) och antennen är rundstrålande så kommer kroppen att ha stor inverkan på antennegenskaperna [17]. Detta beror på att kroppen kommer att absorbera en stor del av energin från det elektriska fältet, dessutom kommer impedansen att öka och därmed kommer resonansfrekvensen för antennen att flyttas.

Inom projektet har vi under 2012 analyserat möjligheterna att integrera antennen till radio Motorola GP 328 (används som gruppradio (IGR) av svenska armén) i uniformen. Just den radion valdes bland annat för att den opererar vid frekvensen 350-450 MHz vilket innebär att en antennens storlek blir ungefär 20 cm ($\frac{1}{4}$ våglängd), som är en rimlig längd att integrera i en soldats uniform. En antenn av typen PIFA (The Planar Inverted-F Antenna) valdes för ändamålet.

En antenn av typen PIFA togs fram, tillverkades, mättes och utvärderades, se figur 9. Resultaten ser lovande ut även om det nuvarande utförandet har en del att önska. En sammanfattning av arbetet redovisas i [18]. Under 2013 planerar vi att göra antennen mer smidig och mer integrerad.



Figur 9: Valideringsmätningar av textilintegrerad antenn. Antennen är fäst vid försökspersonens överarm.

2.5.2 Stegade notchelement

Design av stegade notchelement har studerats och arbetet har dokumenterats i referens [19]. Angreppssättet i den studerade metoden för design av stegade notchelement är att se matningsledningarna som stegade impedanstransformatorer, vilket dessutom går att

tillämpa på alla former av stegade impedanstransformatörer. Rapporten är fokuserad på bilaterala stegade notchelement med Chebyshevtapering. Dessa jämförs med bilaterala Vivaldielement med likartad längd. Även bilaterala element med binomialtapering och Gausstapering berörs i rapporten.

De stegade Chebyshevelementen har en lägre nedre gränshfrekvens än Vivaldielement med jämförbar längd. Stegade notchelement är generellt sett bättre jämfört med Vivaldielement då elementen är relativt korta. För långa element är Vivaldielement eller någon annan form av kontinuerligt varierande slitsbredd ofta att föredra.

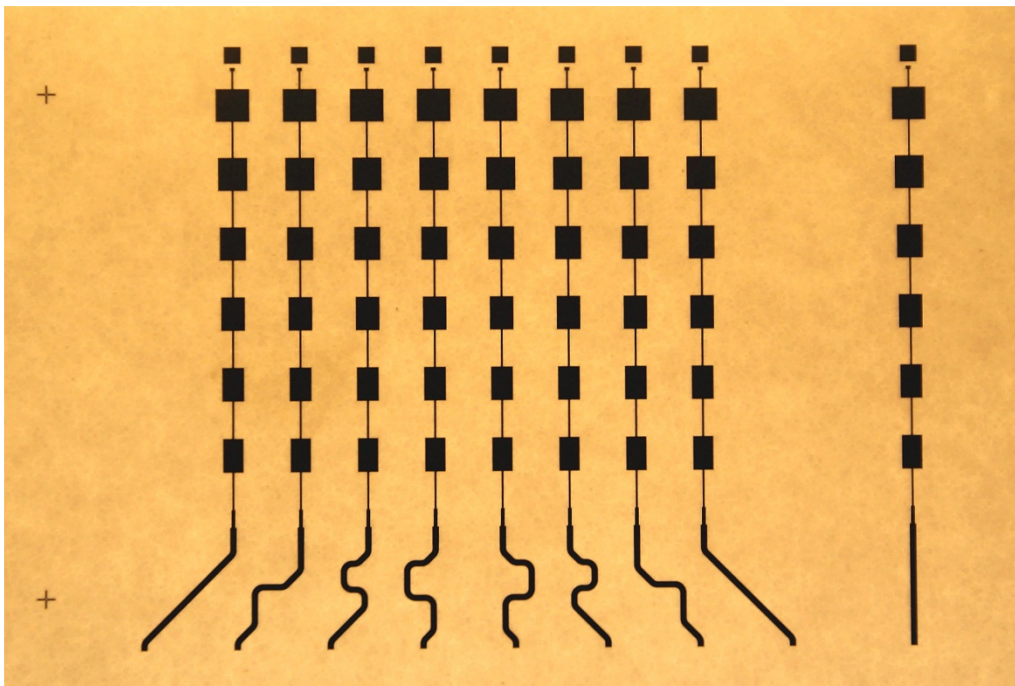
Angreppssättet är att man designar en stegrad impedanstransformator med önskade överföringsegenskaper och översätter sedan det till ett stegat notchelement. Fördelen med att se de stegade elementen som stegade impedanstransformatörer är att impedanstransformatörer är välkända och enkla att designa.

Angreppssättet separerar problemet med att designa ett bredbandigt notchelement från problemet med att designa en bredbandig övergång från stripledning till slitsledning. Rapporten visar även en del resultat med notchelement och övergång. Ofta är det större problem med att designa övergången än elementet.

Även om man tänker sig att numeriskt optimera ett stegat notchelement är angreppssättet i den här rapporten av intresse eftersom den kan ge en bra startapproximation som väsentligt reducerar optimeringstiden. Studien publicerades under 2012 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI National Radio Science Meeting i Chicago, USA, i juli [20].

2.5.3 Seriematad antenn till 3D-SAR-mätsystemet

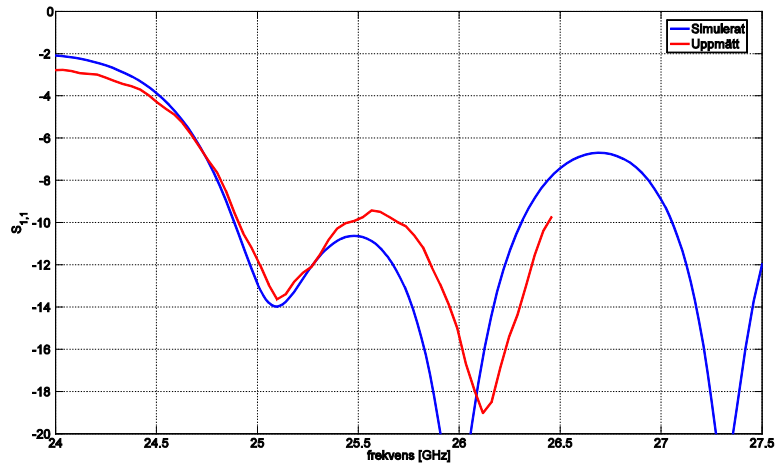
En seriematad mikrostripanntenn har designats för den switchade lösningen av 3D-SAR-mätsystemet. Seriematning valdes för att få en enkel tillverkning av antennen. Ursprungligen önskades en längre antenn men det var inte möjligt p.g.a. bandbredds krav och krav på att loben inte fick tilta (snedriktas) mer än en halv lobbredd.



Figur 10: Foto på tillverkad antenn. Avslutningsresistorerna på $100\ \Omega$ är ännu inte monterade.

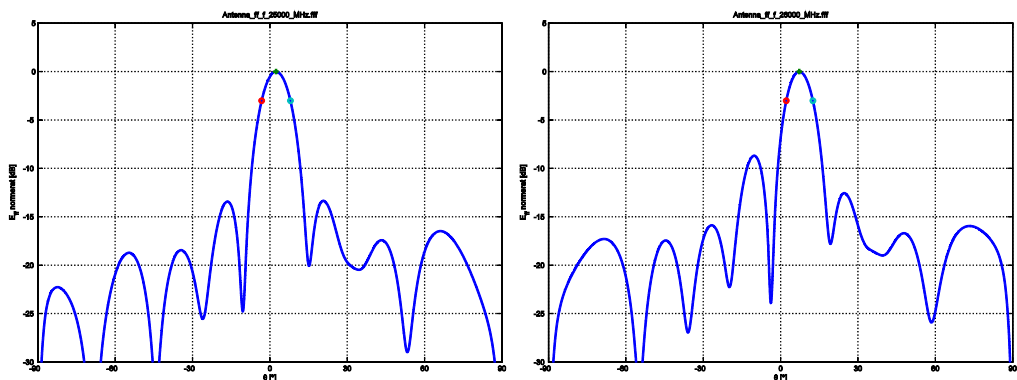
I figur 10 syns de tillverkade antennelementen. De seriematade mikrostripanternerna matas av en $100\ \Omega$ mikrostripleddning. Längs ned i bilden ses en kvartvågstransformator från $100\ \Omega$ till $50\ \Omega$. Serpentinledningarna är till för att få samma elektriska längd på alla antennerna. Varje antenn avslutas med en $100\ \Omega$ serieresistor och en kapacitiv jord. Inget viahål till jord används. Resistorerna är inte ännu monterade i figur 10.

I figur 11 jämförs simulerad och uppmätt anpassning. Anpassningarna visar en mycket god överensstämmelse och antennen har en uppmätt anpassning bättre än $-9\ \text{dB}$ mellan $24,89\ \text{GHz}$ och $26,46\ \text{GHz}$. Fjärrfältsdiagram har ännu inte mätts upp.



Figur 11: Anpassning för den seriematade antennen, simulerat (blått) och uppmätt (rött) resultat.

I figur 12 presenteras simulerat fjärrfält vid 25 respektive 26 GHz, snitt längs seriematningen.



Figur 12: Simulerat fjärrfält vid 25 (vänster) respektive 26 GHz (höger), snitt längs seriematningen.

Tabell 2

Frekvens [GHz]	Max riktning [θ°]	Lobbredd [θ°]
25,0	2,40	11,16
25,5	5,05	10,71
26,0	7,27	10,33

Enligt tabell 2 tiltar (snedriktas) loben $4,87^\circ$ mellan 25,0 GHz och 26,0 GHz.

2.5.4 Diagramsyntes

Syntetisering av strålningsdiagram för en gruppantenn är i allmänhet ett komplext problem, eftersom de enskilda elementdiagrammen för de ingående antennelementen generellt är olika. Particle Swarm Optimization (PSO) är en populationsbaserad stokastisk optimeringsmetod som studeras i projektet i syfte att ge ökad kunskap om gruppantennens design.

PSO-metoden ger prima resultat för design av linjära, ändliga arrayer med ekvidistanta antennelement under optimeringskravet att minimera maximal sidlobsnivå [1]. Under 2012 påbörjades arbete med implementering av PSO-metoden för krökta, konforma antennarrayer och mer allmängiltiga gruppantenner, också med andra typer av kravsättningar vad gäller optimeringsvillkoren.

3 Internationella samarbetsprojekt

Multifunktionssystem på RF-området attraherar ett mycket stort internationellt intresse och möjligheterna till internationell samverkan inom området är stort, inte minst inom EUs sjunde ramprogram.

Projektet har mycket goda erfarenheter av internationell samverkan där en relativt liten insats från FOIs sida ger ett stort mervärde genom att vi tar del av resultat från våra partners och delar tillverkningskostnader.

Under 2012 har vi deltagit i (genom medfinansiering) Eu FP7-projekten MEMS-4-MMIC, NANOTEC och AIRBEAM. Vi deltar även i VINNOVA-projektet HumanFinder. Vi har stor nytta av samarbetsprojekten ovan och ser med tydlighet att de bidrar väsentligt till vår verksamhet inom projektet.

3.1 SPREWS - SPRINT - ACACIA

EDA projektet SPREWS (Signal Processing for Radar and Electronic Warfare Systems) startade i februari 2009 och avslutades under januari 2012. FOI deltog bl.a. i delprojektet SP1 "Clutter suppression using STAP for radar modes with ambiguous waveforms".

FOI var ansvarigt för två arbetspaket inom SP1. Delprojektet behandlade signalbehandling i flygburen radar för att undertrycka markklotter med adaptiv filtrering i rum och tid: STAP (Space-Time Adaptive Processing). Detta förväntas bli en standardmetod för framtida flygburen radar i stridsflygplan, spaningsflygplan och UAV:er.

En fortsättning på SPREWS har tagits fram i projektförslaget SPRINT (SPREWS Implementation of New Technologies) som syftar till att utveckla metoder, algoritmer och experiment för att demonstrera resultat och idéer från SPREWS. Projektförslaget fanns i en version under sommaren 2012 men Sverige (FMV, Saab, FOI) har beslutat att avstå från vidare deltagande.

Ett nytt projektförslag kallat ACACIA (Advanced Classification techniques for object Recognition with Radar) har tagits fram för att utveckla metoder och tekniker för måligenkänning med radar. Detta projektförslag syftar till ett samarbete mellan Sverige och Nederländerna. Föreslagna parter är Thales Nederland, TNO, Saab och FOI.

3.2 MEMS-4-MMIC

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

Projekt Multifunktionella gruppantennar ansvarar för medfinansieringen av FOIs del inom MEMS-4-MMIC, där FOIs roll i huvudsak är att studera nyttan av MEMS-baserade (låg förlustiga) fasskiftare, switchar och fördelningsnät med perspektiv mot multifunktionsantennsystem (Se-undvika, kommunikation och SAR-GMTI, se avsnitt 2.4).

Under 2012 har verksamheten i huvudsak varit inriktad mot att utveckla en delsystemdemonstrator för en PESA-baserad radararkitektur och sammanfattning av hela projektets resultat eftersom projekten tog slut 2012-11-30. Ingående delar till demonstratorn som antennelement och MEMS-baserade fasskiftare har levererats och prestanda har verifierats. Under året presenterades också ett konferensbidrag på the International Microwave Symposium IMS 2012 i Montreal, Kanada [13] baserat på en switch kombinerad med två olika lågbrusförstärkare med en uppmätt brusfaktor på 2.4 dB,

vilket demonstrerar i praktiken de låga brusfaktorer vi förväntat oss med MEMS-tekniken och dessutom öppnar möjligheten för nya arkitekturer för radar, se kapitel 2.4.

3.3 NANOTEC

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

Under 2012 har vi tagit fram och utvärderat kritiska delsystem, främst vid 94 GHz, för demonstratorsystemen som planerats i projektet. Resultaten kommer att användas som underlag till valet av teknologi för den demonstrator vi är med och utvecklar i projektet.

3.4 AIRBEAM

AIRBEAM är ett Eu-FP7-projekt (SEC 2010.4.2-3, Grant agreement no: 261769) som startade 2012-01-01 och pågår fram till 2015-12-31. FOI deltar i projektet i fem olika arbetspaket varav vi leder två av dem, radar sensors (där multifunktionella gruppantenner medfinansierar FOIs deltagande) och platform and sensor management. Projektets mål är att sammansätta olika sensorer på luftburna plattformar och visa på dess mervärde för att skapa en förbättrad lägesbild vid naturkatastrofer i Europa, exempelvis skogsbränder, översvämningar och snöstormar. Även tillämpningar som övervakning av gränser och allvarigare industriutsläpp ingår i projektet. Under 2012 har arbetspaketet radar sensors designat, tillverkat och verifierat antennelement och antennmodul för att visa prestanda för en PESA-baserad (se avsnitt 2.4) radararkitektur. Vi har även arbetat med två rapporter där alternativ för radarsensorer till AIRBEAM ska identifieras.

3.5 HumanFinder

VINNOVA-projektet Multi Purpose Human Finder är ett samarbete mellan Cinside, Novelda (Norge) och FOI och har som mål att ta fram en produkt för att upptäcka människor i rasmassor. Lobstyrning av både sändare och mottagarloben ingår i projektet, vilket ger det en teknikhöjd som vi bedömer är intressant även för försvarsmakten. Projektet började i mars 2011 och planeras pågå till maj 2013. Målet med projektet är att utveckla en gruppantenn med styrd lob i både sändning och mottagning [21] och därigenom få tillgång till både avstånds och riktning information om placering av människor i rasmassor. FOI ansvarar för framtagandet av gruppantennen. Under 2012 har vi utvärderat gruppantennen och bidragit med designkompetens till utvecklingen av elektronikstyrkortet som igång i systemet. Framöver planeras en utvärdering av lobstyrningen i både sändare och mottagarfallet.

Nyttan för FOI är, förutom att vi får erfarenheten att ta fram en ny gruppantenn, att vi lär oss mer om se-igenom tekniken, men även systemarbete. Vi ökar även vårt kontaktnät och öppnar därmed möjligheten till nya uppdrag i framtiden genom kontakterna med Cinside och Novelda. Vår kunskapshöjd inom området upprätthålls och utökas också.

4 Leveranser

4.1 FOI rapporter och memon

FOI särtryck redovisas i avsnitt 4.2.

1. A. Gustafsson, P. Andersson, S. Björklund, T. Boman, P.O. Fröling, R. Gunnarsson, P. Grahn, L. Kroon, R. Malmqvist, A. Nelander, A. Nezirovic, A. Pohl, L. Pettersson, J. Svedin, "*Mikrovågssystem för 3D-marksanning - Teknisk sammanfattning*", FOI-D--0450--SE.
2. A. Gustafsson, L. Pettersson, A. Nelander, P. Grahn, "*Scenario för demonstration av digitala multifunktionella gruppantennor - Tekniska realiseringar*", FOI Memo 4006.
3. R. Gunnarsson, P. Andersson, L. Pettersson, "*Design av stegade notchelement*", FOI-D--0487--SE.
4. A. Pohl, "*Textilintegrerad antenn*", FOI Memo 4200.
5. A. Gustafsson, P. Andersson, S. Björklund, L. Kroon, A. Nelander, A. Pohl, "*Multifunktionella Gruppantennor -årsrapport 2012*", FOI-R--3544--SE.
6. Björklund S., "DBT, A Matlab and Octave toolbox for radar modelling, signal simulation and processing. Release 2.156", FOI-D--0447--SE.
7. S. Björklund, D. Rejdemyhr, "DBT release 2.156. A MATLAB Toolbox for Modeling, Simulation & Signal Processing in Radar. Draft Reference Guide", FOI-D--0448--SE.

4.2 Konferensartiklar

T. Boman, U. Carlberg, L. Pettersson, "*ChaSim Antenna System Simulator Software*", Proceedings of the Swedish Radio and Microwave Days, Stockholm, Sweden, March 6-8 2012 (FOI-S--4004--SE).

R. Gunnarsson, P. Andersson, L. Pettersson, "*Design of wideband stepped-notch arrays using multi-section impedance transformer design rules*", Proceedings of the Swedish Radio and Microwave Days, Stockholm, Sweden, March 6-8 2012 (FOI-S--4002--SE).

A. Gustafsson, P. O. Fröling, P. Andersson, J. Svedin, L. Pettersson, "*Sparse Phased Array Antenna Architectures for 3D-SAR Applications*", Proceedings of the CoSeRa 2012, Bonn, Germany, May 14-16 2012 (FOI-S--4032--SE).

R. Gunnarsson, P. Andersson, L. Pettersson, "*Design of wideband stepped-notch arrays using multi-section impedance transformer design rules*", Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI National Radio Science Meeting, Chicago, USA, July 8-14 2012 (FOI-S--4074--SE).

A. Gustafsson et. al., "*Recent Progress in Phased Array Radar at FOI*", Workshop notes WS20: Recent Developments in Phased Array Radar, European Microwave Week 2012, Amsterdam, The Netherlands, 28 Oct. - 2 Nov. 2012 (FOI-S--4138--SE).

A. Nezirovic, R. Malmqvist, T. Boman, A. Gustafsson, M. Karlsson, "*Performance Assessment of RF-MEMS-based Passive ESA for Fully-Polarimetric Ka-band SAR*", Proceedings of the EuRad conference 2012, Amsterdam, The Netherlands, Nov. 1-2 2012 (FOI-S--4140--SE).

R. Malmqvist et. al., "A K-Band Single-Chip Reconfigurable/Multi-Functional RF-MEMS Switched Dual-LNA MMIC", Proceedings of the International Microwave Symposium IMS 2012, Montreal, Canada, June 17-22 2012 (FOI-S--4257--SE).

R. Malmqvist, C. Samuelsson, A. Gustafsson, S. Reyaz, A. Rydberg, "A V-Band RF-MEMS SPDT Switch Network in a SiGe BiCMOS Process Technology", Proceedings of the MEMSWAVE2012, Antalya, Turkey, July 2-4 2012 (FOI-S--4258--SE).

R. Malmqvist, C. Samuelsson, A. Gustafsson, S. Reyaz, A. Rydberg, "Reconfigurable RF-MEMS ICs for microwave and mm-wave applications", Workshop notes WS10: RF-MEMS for mm-wave Reconfigurable ICs, European Microwave Week 2012, Amsterdam, The Netherlands, 28 Oct. - 2 Nov. 2012 (FOI-S--4261--SE).

S. Reyaz, C. Samuelsson, R. Malmqvist, M. Kaynak, A. Rydberg, "Millimeter-Wave RF-MEMS SPDT Switch Networks in a SiGe BiCMOS Process Technology", Proceedings of the European Microwave Week 2012, Amsterdam, The Netherlands, 28 Oct. - 2 Nov. 2012 (FOI-S--4254--SE).

R. Malmqvist, C. Samuelsson, D. Dancila, S. Reyaz, M. Kaynak, A. Rydberg, "DESIGN AND TEST RESULTS OF A WIDEBAND SIGE DETECTOR AND ON-CHIP SLOT ANTENNA FOR W-BAND SENSING APPLICATIONS", 2012 IEEE Int. Semiconductor Conference, Sinaia, Romania, October 15-17 2012 (FOI-S--4255--SE).

4.3 Tidsskrifter

R. Malmqvist et. al., "A K-Band RF-MEMS-enabled reconfigurable and Multifunctional low-noise amplifier hybrid circuit", Active and Passive Electronic Components Journal, vol. 2011 (FOI-S--4259--SE).

Svante Björklund, Anders Nelander, Mats I. Pettersson, "Auxiliary Beam Terrain Scattered Interference Suppression - Reflection System and Radar Performance", Accepted for publication in IET Radar, Sonar & Navigation.

4.4 Samarbetsrapporter

S. Björklund, A. Nelander, m.fl. "Summary report SPI", SPREWS deliverable D1010, 2012, FOI-SH--0087--SE.

4.5 Bokkapitel

R. Malmqvist, A. Ouacha, N. Ahsan, M. Kaynak, J. Oberhammer, "Reconfigurable RF circuits and RF-MEMS", chapter 12 in Microwave and Millimeter Wave Circuits and Systems: Emerging Design, Technologies, and Applications, Sept 2012 ISBN: 978-1-1199-4494-2, John Wiley & Sons, Ltd (FOI-S--4260--SE).

4.6 Granskning av tidskriftsartikel

Vi har också granskat en tidskriftsartikel inom klotterundertyckning med STAP (Space Time Adaptive Processing) åt tidskriften IET Radar, Sonar & Navigation.

5 Referenser

- [1] A. Gustafsson, P. Andersson, S. Björklund, T. Boman, P.O. Frörlind, R. Gunnarsson, P. Grahn, L. Kroon, R. Malmqvist, A. Nelander, A. Nezirovic, A. Pohl, L. Pettersson, J. Svedin, "*Mikrovågssystem för 3D-marksplaning - Teknisk sammanfattning*", FOI-D--0450--SE.
- [2] P.O. Frörlind, B. Carlegrim, P. Andersson, S. Leijon, T. Boman, "*Erfarenheter från inledande mätningar med mätsystem för 3D-SAR*", FOI-R--3009--SE, juni 2010 (in Swedish).
- [3] A. Gustafsson, L. Pettersson, A. Nelander, P. Grahn, "*Scenario för demonstration av digitala multifunktionella gruppantennor - Tekniska realiseringar*", FOI Memo 4006.
- [4] L. Pettersson, A. Gustafsson, P.O. Frörlind, J. Svedin, "*System concepts for 3D-radar*", FOI-D--0337--SE, mars 2009.
- [5] A. Gustafsson, P. O. Frörlind, L. Pettersson, B. Carlegrim, J. Svedin, "*Measurements of Sparse and Compact Phased Array Antenna Architectures*," Proceedings of the 8th European Radar Conference, 12-14 October 2011, Manchester, UK.
- [6] A. Gustafsson, P. O. Frörlind, P. Andersson, J. Svedin, L. Pettersson, "*Sparse Phased Array Antenna Architectures for 3D-SAR Applications*", Proceedings of the CoSeRa 2012, Bonn, Germany, May 14-16 2012.
- [7] Björklund S.: "*Space-Time Adaptive Processing with a Half-Cylinder Faceted Conformal Antenna*", International Radar Conference, RADAR 2009, Bordeaux, France, October 12-16, 2009.
- [8] Björklund S., Boman T., Nelander A.: "*Clutter Properties for STAP with Smooth and Faceted Cylindrical Conformal Antennas*", Published at the 2010 IEEE International Radar Conference, Washington DC, USA, May 10-14, 2010.
- [9] Mathworks, "*MATLAB - The Language Of Technical Computing*", <www.mathworks.se/products/matlab>.
- [10] Octave, "*A high-level interpreted language, primarily intended for numerical computations*", <www.octave.org>.
- [11] Björklund S., "DBT, A Matlab and Octave toolbox for radar modelling, signal simulation and processing. Release 2.156", FOI-D--0447--SE.
- [12] Nelander A., Björklund S., Boman T., "*Gripen VU Radar IPT. AESA simulator*", FOI Memo 3956, April 2012.
- [13] R. Malmqvist et. al., "*A K-Band Single-Chip Reconfigurable/Multi-Functional RF-MEMS Switched Dual-LNA MMIC*", Proceedings of the International Microwave Symposium IMS 2012, Montreal, Canada, June 17-22 2012.
- [14] A. Nezirovic, R. Malmqvist, T. Boman, A. Gustafsson, M. Karlsson, "*Performance Assessment of RF-MEMS-based Passive ESA for Fully-Polarimetric Ka-band SAR*", Proceedings of the EuRad conference 2012, Amsterdam, The Netherlands, Nov. 1-2, 2012.
- [15] B. Pillans et. al., "*Advances in RF MEMS Phase Shifters from 15 GHz to 35 GHz*", Proceedings of the International Microwave Symposium IMS 2012, Montreal, Canada, June 17-22 2012.
- [16] Qiang Bai and Richard Langley, "*Crumpling off PIFA Textile Antenna*", IEEE Transactions on Antenna and Propagation, vol 60, No1, p.63-70, Jan. 2012.

- [17] Lars Pettersson och Jouni Rantakokko, "*Inledande antennstudier*", FOI-R--2989--SE, April 2010.
- [18] A. Pohl, "*Textilintegrerad antenn*", FOI Memo 4200.
- [19] R. Gunnarsson, P. Andersson, L. Pettersson, "*Design av stegade notchelement*", FOI-D--0487--SE.
- [20] R. Gunnarsson, P. Andersson, L. Pettersson, "*Design of wideband stepped-notch arrays using multi-section impedance transformer design rules*", Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI National Radio Science Meeting, Chicago, USA, July 8-14 2012.
- [21] L. G. Huss, A. Gustafsson, "*Gruppantenn för personsökning i rasmassor*", FOI Memo 3607.