

A. GUSTAFSSON (ED), P. ANDERSSON, S. BJÖRKLUND, P. O. FRÖLIND,
P. GRAHN, R. MALMQVIST, A. NELANDER, A. POHL, L. PETTERSSON



A. Gustafsson (Ed), P. Andersson, S. Björklund,
P. O. Fröling, P. Grahn, R. Malmqvist,
A. Nelander, A. Pohl, L. Pettersson

Multifunktionella Gruppantenner

- Slutrapport



Bild/Cover: (SADM [2])

Titel	Multifunktionella Gruppantennor -slutrapport
Title	Multifunction phased array antennas - final report
Rapportnr/Report no	FOI-R--4003--SE
Månad/Month	Dec/Dec
Utgivningsår/Year	2014
Antal sidor/Pages	32 p
ISSN	1650-1942
Kund/Customer	FM
Forskningsområde	7. Sensorer och signaturanpassning
FoT-område	Sensorer och signaturanpassning
Projektnr/Project no	E54535
Godkänd av/Approved by	Martin Rantzer
Ansvarig avdelning	Sensor- och TKsystem

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 Gruppantennor, MUGA, har studerat området ur flera olika aspekter och på flera olika nivåer. Med multifunktion menar vi i huvudsak flera olika radarfunktioner. Tekniken vi utvecklar är dock i många fall även lämplig för telekrigstillämpningar.

Under perioden 2012-2014 har projektet vidareutvecklat kunskapen och förmågan till analys inom området multifunktionella gruppantennor. I stor utsträckning görs detta genom att dels ta ett översiktligt grepp av området, men även genom fokus inom smalare områden.

Projektet har gjort en översiktlig omvärldsbevakning av multifunktionella gruppantennsystem där vi ser en fortsatt stark teknikutveckling driven av både utvecklingen på den analoga och den digitala sidan. Multifunktionssystem vi identifierat i studien innefattar det kombinerade flygtrafikledning och väderradarsystemet MPAR i USA och det marina systemet IM400 från Thales i Nederländerna, där E/O- (Elektro Optiska) och radarsensorer för flera olika frekvensband samt kommunikationsfunktioner ingår. Vidare har vi gjort testsimuleringar och kunnat verifiera att ett fartyg med en stirrande multifunktionsantenn jämfört med en konventionell roterande 2D-radar har en betydligt högre överlevnadsgrad vid attack av flera samtidiga sjömålsrobotar. Vi har även gjort en analys av kostnadseffektiva lösningar för multifunktionella gruppantennor där vi ser flertalet möjliga lösningar, främst inom områdena signalbehandling, subarrayindelning, utglesning av arrayer, flexibla RF-lösningar och förenklade arkitekturer.

Exempel på smalare fokusområden i projektet är utvecklingen av teknik för 3D-SAR för operationer i urbana miljöer, studier av lågförlustig switchteknik och utveckling av textilintegrerade antennlösningar. Vidare har projektet skannat av forskningsfronten inom högeffektgenerering genom GaN-teknologin och studerat bredbandiga antennelement.

Samarbete med EU- och Vinnovaprojekt har medfört att projektet kunnat bredda och fördjupa verksamheten. Projekt med korthållsradartillämpning inkluderar utveckling av en gruppantenn för detektion av människor i rasmassor och utveckling av teknik för att se-igenom kläder. Radararkitekturlösningar för optimal prestanda till en rimlig kostnad har studerats med tillämpningar mot långräckviddig spaning.

Sammanfattningsvis har projektet arbetat mot att vidareutveckla vår kunskap inom gruppantennområdet och därigenom visa för Försvarmakten styrkan med och nyttan av både befintliga och framtida multifunktionella mikrovågssystem, 3D-SAR och närliggande teknikköslösningar för spaning mot mål på ytan, på marken, i luften samt i urban miljö.

Nyckelord: multifunktion, gruppantennor, 3D-SAR, utglesade arrayer, STAP, signalbehandling, textillantennor, UAV, GaN, rymd, urbana miljöer, radar, sensorer

Summary

The Multifunction phased array antenna project has studied the area from different aspects and at several system levels. By multifunction the project mainly refers to multiple radar functions, although the concepts we develop are also suitable for EW applications in many cases.

During the years of 2012-2014 the project has further developed our knowledge and refined our ability for analysis within the area of multifunctional phased arrays. To a large extent this is done by analysis from an overview perspective, but also by focus on more specific areas.

The project has done a survey of the state-of-the-art of multifunctional phased array antenna systems, where a still on-going strong development in the area clearly is identified. Examples of systems found in the survey include the MPAR approach from USA which is a combined aircraft and weather surveillance radar system and the IM400-system from Thales in the Netherlands that includes E/O (Electro Optical) and radar sensors together with communication links. In addition to this, test simulations have been done, which verifies the increased survival degree for a ship, when being attacked by simultaneous anti-ship missiles, with a multifunctional phased array based radar compared with a ship with a conventional rotating 2D-radar. Furthermore, an analysis of cost-effective solutions for multifunctional phased arrays has been done, where we summarize possible solutions, mainly within the areas of signal processing, subarray partitioning, sparse arrays, flexible RF-concepts and simplified architectures.

Examples of studies in more focused areas include concepts for 3D-SAR for operation in urban environments, studies of low-loss switch technologies and textile integrated antennas. Furthermore, a survey of the state-of-the-art of GaN-based components has been done and concepts for wideband antenna elements have been studied.

Cooperation with EU- and Vinnova projects increased the width and depth of our activities. Projects towards short range applications include the development of a phased array antenna for detection of humans buried in rubble and technologies for see-through clothes. Radar architecture alternatives for optimal performance at a reasonable cost have been studied with long range surveillance applications in mind.

To summarize, the project has improved the knowledge in the field of phased array antennas and by this been able to show to the Swedish Armed Forces the strengths and benefits of multifunctional microwave systems, 3D-SAR techniques and related technologies for air, sea and ground target applications including urban environments.

Keywords: multifunction, phased array antennas, 3D-SAR, sparse arrays, STAP, signal processing, textile antennas, UAV, GaN, space, urban environments, radar, sensors

Innehållsförteckning

1	Inledning och verksamhet	7
2	Förslag på kostnadseffektiva lösningar inom gruppantenntekniken	8
3	Tekniska framsteg inom projektet	10
3.1	Omvärldsbevakning av Multifunktionella Gruppantenner	10
3.1.1	Trender i omvärlden.....	11
3.2	3D-SAR	11
3.2.1	Mätresultat	13
3.3	Systemanalys och signalbehandling.....	13
3.3.1	Simulering av multifunktionsgruppantenner i sjöstrid	14
3.3.2	Detektion av rörliga markmål med radar med konforma antenner.....	15
3.3.3	Avtappning	16
3.4	Antennteknik	16
3.4.1	Textilintegrerade antenner	16
3.4.2	Utglesad gruppantenn till 3D-SARmätsystemet	17
3.5	Rymd.....	18
3.6	Arkitekturer och teknikval för MAESA	20
3.6.1	Utvecklingen inom GaN-området.....	20
4	Medfinansierade projekt	22
4.1	MEMS-4-MMIC	22
4.2	Multi Purpose Human Finder	22
4.3	NANOTEC.....	23
4.4	AIRBEAM	23
5	Framtida utsikter och slutord	25
5.1	Framtida utsikter	25
5.2	Slutord.....	25
6	Leveranser	26
6.1	Milstolpar	26
6.2	FOI rapporter och memon.....	26
6.3	Konferensartiklar	27
6.4	Tidskrifter	29
6.5	Samarbetsrapporter	29

6.6	Bokkapitel.....	29
6.7	Granskning av tidskriftsartikel.....	29
6.8	Kunddagar.....	29
7	Referenser	30

1 Inledning och verksamhet

Projektet MUGA, Multifunktionella Gruppantennar, har bedrivit forskning inom flera olika delar i området, belyst olika aspekter och på flera olika nivåer. Med multifunktion menar vi i huvudsak flera olika radarfunktioner. Tekniken vi utvecklar är dock i många fall även lämplig för telekryptillämpningar.

Under perioden 2012-2014 har projektet vidareutvecklat kunskapen och förmågan till analys inom området multifunktionella gruppantennar. I stor utsträckning görs detta genom att dels ta ett bredare grepp av området översiktligt, men även genom fokus inom smalare områden.

Forskningen har varit 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 med detektion av större förändringar eller förflyttningar och verkansverifiering i mörker, rök och damm. Systemen är även avsedda att kunna omkonfigureras, exempelvis mellan se-undvika-funktion och kommunikationslänk.

Verksamheten har innehållit en översiktlig omvärldsbevakning av multifunktionella gruppantennsystem [1] där vi ser en fortsatt stark teknikutveckling driven av både utvecklingen på den analoga och den digitala sidan. Multifunktionssystem vi identifierat i studien innefattar det kombinerade flygtrafikledning och väderradarsystemet MPAR i USA och det marina systemet IM400 från Thales i Nederländerna, där E/O- och radarsensorer för flera olika frekvensband samt kommunikationsfunktioner ingår. Vidare har vi gjort testsimuleringar med radarsystemsimulatorn SADM [2] och kunnat verifiera att ett fartyg med en stirrande multifunktionsantenn jämfört med en konventionell roterande 2D-radar har en betydligt högre överlevnadsgrad vid attack av flera simultana sjömålsrobotar. Vi har även gjort en analys av kostnadseffektiva lösningar för multifunktionella gruppantennar [3] där vi ser flertalet möjliga lösningar, främst inom områdena signalbehandling, subarrayindelning, utglesning av arrayer, flexibla RF-lösningar och förenklade arkitekturer.

Exempel på smalare fokusområden i projektet är utvecklingen av teknik för 3D-SAR för operationer i urbana miljöer [4], studier av lågförlustig switchteknik och utveckling av textilintegrerade antennlösningar [5]. Vidare har projektet skannat av forskningsfronten inom högeffektgenerering genom GaN-teknologin [5] och studerat bredbandiga antennelement.

Samarbete med andra projekt (medfinansiering) har medfört att projektet kunnat bredda och fördjupa verksamheten. Projekt med korthållsradartillämpning inkluderar Human Finder (utveckling av en gruppantenn för detektion av människor i rasmassor) och NANOTEC (teknik för se-igenom kläder). Radararkitekturlösningar för optimal prestanda till en rimlig kostnad har studerats inom MEMS-4-MMIC och AIRBEAM där långräckviddig spaning är tillämpningen.

Projektresultat har löpande spridits under exempelvis möten, via kundnära projekt och genom konferenser, tidskriftsartiklar och rapporter. Resultat har presenterats för chef AFRL (Amerikanska flygvapnets forskningsorganisation) och FoT-ordförande vid 16:e Air-Senior National Representatives Meeting mellan USA och Sverige, vid SAMS-årsmöte (Svenska AntennMätSällskapet) i Linköping, på konferenser nationellt och internationellt och via tidskriftpubliceringar.

Resultat kommer kunden till nytta genom avtappning till andra projekt. Exempelvis har vi bidragit till utvecklingen inom Gripen VU-projektet via en radarsimulator för förbättrad radar för JAS 39 Gripen. Ett annat exempel finns inom telekryptuellsimuleringar mellan fartyg och sjömålsrobot med syfte att stärka skyddet för svenska fartyg. Ännu ett exempel är utvecklingen av textilintegrerade antenner, som skett i dialog med FMV. Sammanfattningsvis har vi vidareutvecklat kunskap inom gruppantenneteknikområdet för att därigenom visa för Försvarmakten styrkan med och nyttan av tekniken.

2 Förslag på kostnadseffektiva lösningar inom gruppantenntekniken

Det är tillämpningen som styr vad som kan anses vara *kostnadseffektivt*. Det är inte bara kostnad i finansiella termer som är intressant utan också andra faktorer som storlek, vikt, effektförbrukning och systemkomplexitet [3].

Det är ofta möjligt att hitta olika balanser mellan de komponenter som ingår i ett spaningssystem för att kompensera effekten av de brister som förenklingar kan åstadkomma.

Konkreta exempel är:

1. Subarrayindelning sparar antalet digitala kanaler men åstadkommer högre sidolobsnivåer eller begränsningar i utstyringsområde. Effekten av detta hålls ner genom någon form av icke-reguljär subarrayindelning av elementen vilket ökar komplexiteten i lobformningen. Med subarray (delantenn) menas ett antal antennelement som summeras analogt före digitalisering.
2. En utglesad antenn sparar antalet kanaler, men medför högre sidolobsnivå och mer komplicerad lobformning.
3. Att använda en förhållandevis liten antenn medför att mottagarens lobbredd blir bredare än vad som önskas. Detta kan kompenseras på flera sätt t.ex. genom en högre avsökningfrekvens som gör att det sammanvägda resultatet ändå får motsvarande precision, men det kostar tid och ökad risk för att ej upplösa närliggande mål. Ett annat sätt är högupplösande rikttningsbestämningsmetoder till priset av större beräkningskomplexitet och sämre robusthet.
4. En liten antenn med breda lobber kan också kompenseras genom att bygga hela systemet multistatiskt. Då är priset fler enheter som ger en större systemkomplexitet och ett mer komplext verkansområde.
5. En lägre uteffekt hos varje kanal kan till viss del kompenseras genom att belysa under en längre tid, vilket får följderna om signalens dynamik är hög. Signalbehandling och detektering försvåras avsevärt.
6. Ett passivt radarsystem kan få bra prestanda om man kan parasitera på andras sändare med lämplig signalform och placering. Det krävs då ytterligare system för synkronisering och en mer komplicerad signalbehandling.
7. Förenklade arkitekturer ger lägre komplexitet och tillverkningskostnader och därmed lägre inköpspris. Det får dock inte ske på bekostnad av förlorad nödvändig prestanda och applikationer där förenklade arkitekturer är ett attraktivt alternativ behöver väljas med stor omsorg.
8. RF front-end lösningar som erbjuder en hög grad av flexibilitet (t.ex. via en stor momentan bredbandighet, avstämbarhet i frekvens/bandbredd samt rekonfigurerbara kretsfunktioner). Genom att samma komponent kan användas för olika uppgifter och frekvensområden kan massproduktions fördelar (ökad kostnadseffektivitet) uppnås.
9. Glesa arrayer av traditionell typ kan ge en begränsad kostnadsvinst. En array med switchade element, eller av MIMO-typ, kan ge en avsevärd kostnadsbesparing, dock under ganska strikta begränsningar i räckvidd och målets rörelse.

Tillämpningen avgör vilken kombination av åtgärd som är acceptabel, mest optimal eller om man vill mest kostnadseffektivt. Skillnader i avvägningarna är mycket stora beroende på tillämpningen. Militära tillämpningar är ofta sådana att svåruppnåeliga prestanda

kombinerat med stor robusthet krävs, vilket gör att det är svårt att förbilliga genom att göra enklare utan att på något sätt göra avkall på kraven.

När det gäller radarer för luft- och ytövervakning samt stridsledning så kan man kombinera teknikerna 1 eller 2, samt 3, 5, 7 och 8 för att åstadkomma ett mindre, lättare, effektsnålare och billigare system med acceptabla egenskaper jämfört med en motsvarande radar med konventionell antenn, exempel på sådana system finns hos SAAB EDS och ELTA.

Digital signalbehandling är en teknik som används på många nivåer i ett gruppantennsystem. Den kan användas i programmerbara logikkretsar för att implementera funktioner som kanalutjämning mm i en kanal eller lobformning som kräver data från alla kanaler. Signalbehandling kan också ske på högre mer symboliska nivåer t.ex. i målföljningsalgoritmer mm.

Compressive sensing (CS) är en relativt ny metod för att minska antalet pulser, frekvenssteg, signalsampel eller antennkanaler i radarsignalen till färre antal än samplingsteoremetets krav [6] och [7]. Detta kan göras utan att förlora kvaliteten i radarsignalen i form av sidolober, tvetydigheter och upplösning. Metoden bygger på att radarsignalen är gles i matematisk mening så att man kan utnyttja redundanser i mätdata. Man kan med detta göra vinster i hårdvara och datamängder utan inverkan av sidolober och tvetydigheter och med bibehållen upplösning. Det krävs dock mycket signalbehandling och att villkoren om gleshet uppfylls. Ett viktigt krav är att man inte reducerar det resulterande signal-till-brus förhållandet (SNR) jämfört med ett konventionellt radarsystem. Detta innebär att den minskade indata mängden måste ha högre SNR jämfört med motsvarande indata för ett konventionellt radarsystem. Man bör alltså inte bygga ett konventionellt radarsystem och sedan kasta bort indata utan istället ska man koncentrera sina resurser och öka SNR för de pulser, frekvenssteg, signalsampel eller antennkanaler i radarsignalen som behålls.

3 Tekniska framsteg inom projektet

Projektet har varit verksamt inom flera olika områden. Nedan följer en kort sammanfattning av verksamheten inom respektive delområde. En utförligare beskrivning finns i årsrapporterna för 2012 och 2013, se referenserna [5] och [8]. Även den tidigare och dessutom mer tekniskt inriktade rapporten ”Mikrovågssystem för 3D-markspaning - teknisk sammanfattning” [9] ger en kompletterande bild till arbetet inom delområdena.

3.1 Omvärldsbevakning av Multifunktionella Gruppantenner

Under 2013 skrev projektet en FOI-rapport [1], där gruppantennbaserade multifunktions-system i omvärlden identifierades och analyserades. Nedan följer en sammanfattning av arbetet.

Intresset för system som kan utföra mer än en uppgift växer i takt med teknikutvecklingen inom mjuk- och hårdvaruområdet. Utvecklingen innebär nya möjligheter att utforma och realisera system där vi ser fördelar som flexibilitet och multifunktionalitet. Ett och samma system kan exempelvis växla mellan att operera vid olika frekvensområden, bandbredder och effektnivåer samt utföra flera olika radarfunktioner liksom fungera som kommunikationslänk.

Teknikutvecklingen bidrar också till att kostnaderna för mer avancerade system minskar och därmed blir mer attraktiva. Dessutom bidrar teknikutvecklingen till nya och bättre delkomponenter som förbättrar prestandan för enklare arkitekturer och därmed kan komplexiteten i systemen reduceras utan att påverka prestanda nämnvärt.

I många fall realiseras flexibla systemlösningar med gruppantenner, där flera enskilda antennelement fungerar som en stor antenn. Genom fasstyrning kan antennens lobriktning styras till önskad riktning, vilket ger en stor flexibilitet, och innebär även att det inte längre behövs mekaniska delar för att rotera antennen som både är kostnads- och underhålls-krävande.

Exempelvis använder sig USA i nuläget av olika typer av radarsystem för flygtrafikledning och väderradarapplikationer. Dagens 554 radarsystem av nio olika typer för funktionerna ska ersättas med 366 enheter av en och samma typ [10].

Även för fartygsapplikationer, ser man att det börjar bli trångt. Thales i Nederländerna har tagit till sig problemet och utvecklat en integrerad mast, ”the integrated modular mast”, där E/O-sensorer och radarsensorer för flera olika frekvensband samt kommunikationsfunktioner ingår [11].

Inom rymdområdet finns redan i dagsläget exempel på system bestyckade med gruppantenner. Trenden för framtida SAR-satellitssystem är förbättrad upplösning (< 1 m på X-bandet och drygt 1 m på C-bandet), fullpolarimetrisk förmåga liksom möjlighet till interferometri under en och samma satellitpassage [12]. I nuläget är den mest avancerade tekniken som är i bruk inom ESA, European Space Agency, baserad på fasstyrd gruppantenneteknik med analog lobformning. Nästa planerade steg är dock att använda sig av fasstyrd gruppantenneteknik med digital lobformning.

Sensorstyrningens och sensorhanteringens implementeringstekniker har principiellt inte ändrats mycket på senare tid. Det främsta som hänt är att den teoretiska förståelsen för problemområdet ökat, liksom förmågan att hantera komplexa programsystem. Dessutom har datorkapaciteten förbättrats kraftigt vilket tillsammans gjort att implementeringstekniker baserade på informationsteori och optimeringslära ökat i intresse.

Beträffande arkitekturval kan det noteras att den förenklade gruppantennarkitekturen PESA (Passive Electronically Steerable Antenna) har rönt ett förnyat intresse för specifika

tillämpningar (radar, satellitkommunikation m.fl.) då tillgången till lågförlustiga fasvidare förväntas öka bl.a. genom att MEMS-tekniken (Micro Electric Mechanical Systems) prestandamässigt börjar bli en allt mer mogen teknik.

3.1.1 Trender i omvärlden

Trenderna inom området multifunktionella gruppantennor är i stort att utvecklingen går mot mer avancerade system. Vi ser dock inte att det skett tydliga genombrott tekniskt mässigt. Intresset för området är starkt och nya och mer avancerade system presenteras efterhand. Trender i omvärlden vi anser vara värda att notera innefattar följande:

- Trenden mot mer och mer avancerade gruppantennsystem fortsätter. Drivande faktorer innefattar teknikutvecklingen, med dess nya möjligheter, samt platsbrist genom att allt fler system integreras på plattformarna, exempel på detta är Thales IM400 [13].
- Efterfrågan av kostnadseffektiva systemlösningar med låga driftskostnader gör multifunktionella system alltmer attraktiva då det går att reducera antalet enheter liksom modelltyper. Exempel på detta är det amerikanska MPAR-systemet för kombinerad flygledning och väderradar [10].
- Inom stridsflygplansområdet har multifunktionella gruppantennor fått fotfäste. Exempelvis är amerikanska F-22A bestyckad med en multifunktionsradar [14].
- Forskningen inom resurshanteringsområdet går framåt, dock inte lika snabbt som hårdvaruutvecklingen. En utökad forskningsinsats krävs för att kunna använda resurserna mer optimalt.
- RF MEMS-baserade fasvidare uppvisar låga förluster i jämförelse med kommersiellt tillgängliga fasvidare vilket medför att PESA-arkitekturen på sikt kan komma att resultera i ett kostnadseffektivt alternativ för vissa tillämpningar, exempelvis energisnåla radarsensorer på mindre UAVer.
- Utvecklingen inom A/D-omvandlare fortgår i oförändrad takt mot högre dynamik och snabbare samplingstakter. Utvecklingstakten är nära en bit per fem år för en given samplingshastighet.

3.2 3D-SAR

3D-SAR applikationen är avsedd att vara en nedåttittande radar på en flygande plattform med en antennarray monterad tvärs flygriktningen. 3D-SAR ger upplösning i tre dimensioner; i SAR-led genom plattformens förflyttning i flygriktning, i riktningen tvärs förflyttningen, genom gruppantennen och i djupled genom radarns avståndsupplösning. Till skillnad från traditionell SAR med avbildning i två dimensioner, avståndsled och tvärsled, ges alltså här en upplösning i tre dimensionerna. Då betraktningens vinkel för 3D-SAR är rakt ovanifrån, reduceras problem med skuggning av föremål bakom exempelvis höga byggnader. Dessa systemegenskaper förväntas ge förbättrade möjligheter till underrättelseinhämtning i urbana miljöer, och bli ett viktigt komplement till 3D lidar, med mindre känslighet för nederbörd, rök och damm. För att uppnå hög upplösning tvärs flygriktningen krävs en stor antennlängd och därmed många antennelement. För att minska komplexiteten och kostnaden har koncept för utglesade och kompakta antennarrayer studeras [15] och en mätuppställning, se Figur 1, tagits fram för valideringsmätningar. Till att börja med utvärderades koncepten med två flyttbara antenner, en för sändning (Tx) och en för mottagning (Rx). Dessa monterades på ett 2 x 1 meter stort x-y bord [9].

Antennfunktionen realiserades i ett senare skede via multipla fysiska antennelement kombinerat med Tx och Rx switchar, se Figur 2. Arrayarkitekturen för antennen med multipla fysiska element är av en utglesad arkitektur med 16 tätt placerade Tx-element

kombinerade med 16 glest placerade Rx-element, vilket ger en lösning med färre element än vad en fullbestyckad antenn kräver (motsvarar en fullbestyckad array med 256 Rx-element), dessutom kombinerat med en kompakt realisering (endast halva fysiska storleken jämfört med en konventionell antenntlösning). Det senare genom placeringen av sändarelement på båda sidor om den utglesade mottagararrayen.

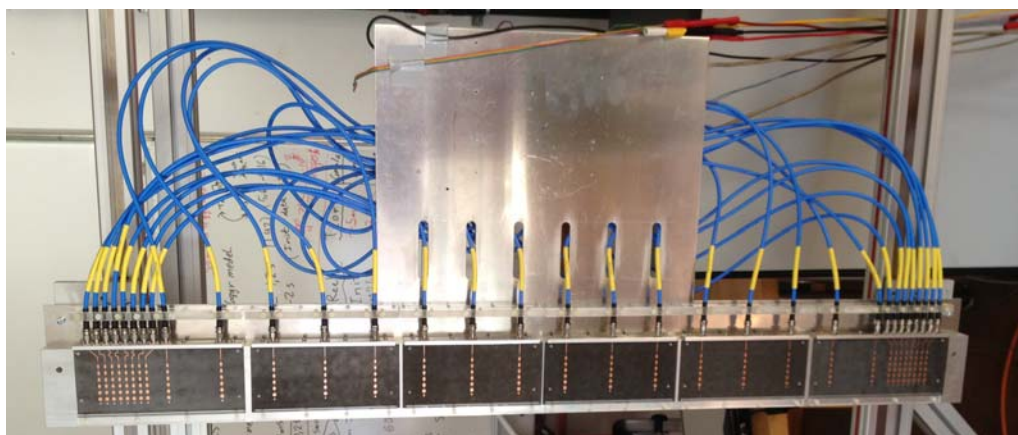


Figur 1: Mätupställning för 3D-SARmätningar med den utglesade gruppantennen.

Antennen med multipla element designades och realiserades för frekvensbandet 25-26.5 GHz. Under sommaren 2013 gjordes utomhusmätningar på bil och hörnreflektorer med antennen. Resultaten av mätningarna, se avsnitt 3.2.1, visar på 3D upplösning för de avbildade objekten och en upplösning tvärs flygriktningen på ca 15 cm vid 32 m mätavstånd, se Figur 3. Utförligare beskrivning av systemet finns att hitta i referenserna [4], [5] och [16].

Antennlösningen som presenteras i Figur 2 är designad relativt kort i SAR-led för att loben inte ska luta för mycket över bandet pga. dess seriella matning. Den korta antennlösningen ger dock ett krav på hög samplingsstäthet i rummet. En längre antenn i SAR-led skulle reducera detta krav och mättiden förkortas.

Vid en längre antennlösning krävs ett parallellt matningsnät, vilket inte får plats med nuvarande arkitektur. En möjlig lösning på problemet är att placera de utglesade mottagarelementen parvis, i en icke utglesad konfiguration, avsnitt 3.4.2 för en mer detaljerad beskrivning i området.



Figur 2: Den utglesade gruppantennen.

3.2.1 Mätresultat

3D-avbildning av en scen med en bil och en hörnreflektor, där antennarrayen har flyttats i x-y bordets horisontal-led, visas i Figur 3. Tre tydliga reflexer från bilen är synliga och den kvalificerade gissningen är att de två yttre reflexerna härstammar från bilens strålkastare och den mittre från detaljer i bilens front något lägre placerad än strålkastarna. Den högre och längre bort placerade hörnreflektorn i fotot avbildas tydligt på en högre höjd till höger i 3D-volymen.



Figur 3: Målsken (vänster) och 3D-målsvar för scenen efter inkoherent sammanslagning av de fyra delaperturerna (höger). Storleken på kuberna i högra bilden är 12,5 m i avstånd, 5 m i sida och 3 m i höjd.

Mätsträcka i SAR-led är i nuläget begränsad till mätuppställningens utsträckning på 2 meter. För att täcka stora scener behöver mätuppställningen flyttas under stor noggrannhet och genom en noggrann sammanfogning av delaperturerna kan en korrekt geometrisk avbildningsvolym genereras. Om detta görs koherent kan maximal upplösning i SAR led erhållas. Detta utförs helst med en automatisk fokuseringsalgoritm som söker optimal kontrast med olika skift. I nuläget är detta dock inte implementerat. Resultat av arbetet ovan presenterades vid EUSAR -14 [16].

Genom mätningarna har ett utglesat antennkonceptet verifierats och 3D-avbildande förmåga demonstrerats med hög upplösning av en realistisk scen. Systemet är dock i nuläget för långsamt för att användas i praktiken. Det går emellertid att snabba upp systemets mättid, exempelvis via längre antennelement i flygriktningen (se avsnitt 3.4.2), snabbare frekvenssvep för radarn, en högre dataakt vid dataöverföring, en lägre grad av utglesning eller parallella mottagarkanalerna.

3.3 Systemanalys och signalbehandling

Flera olika verksamheter inom området har belysts, däribland har en simulator för sjöstrid benämnd SADM testats. Vi har även fortsatt verksamheten mot klotterundertryckning för förbättrad upptäckt, lokalisering samt följning av markmål, exempelvis via studie av hur den effektiva klotterrangen (ett mått på hur svårt klotret är att undertrycka) beror på olika faktorer och via härledning av teoretiska villkor för total klotterundertryckning.

Vidare har avtappning till andra projekt skett, exempelvis via en vidareutveckling av en simulator för radar i JAS 39 Gripen och vid FOIs arbete för Försvarmakten inom området sjömålsrobotar.

En tidskriftsartikel om undertryckning av terrängreflekterad störning i IET Radar, Sonar & Navigation [17] har även publicerats.

3.3.1 Simulering av multifunktionsgruppantenner i sjöstrid

Vi har studerat en simulator för sjöstrid som heter SADM [2]. Den modellerar mycket av striden ovan ytan, där fartyg tillåts ha gruppantennbaserad radar som utför flera samtidiga radaruppgifter alternativt funktioner såsom volymspaning, horisontspaning, målföljning, elledning, belysning för radarluftvärnsrobotar och kommunikation. Figur 4 visar ett fartyg med multifunktionsgruppantenn där den används för flera samtidiga radaruppgifter.

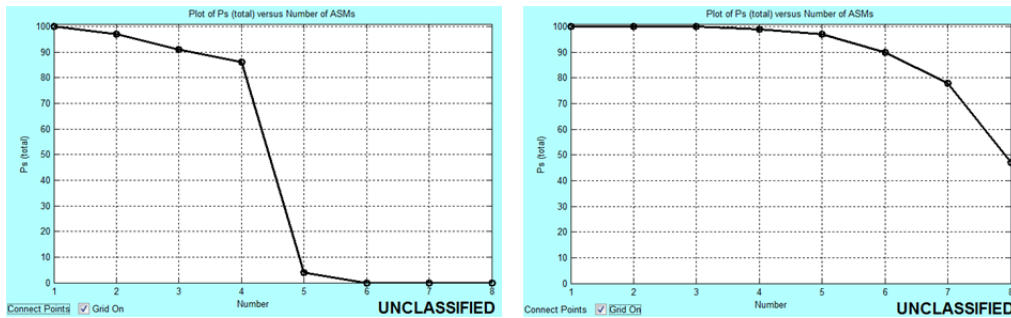
Simulatorn ger oss insikt om hur man bör prioritera och schemalägga olika uppgifter. Man kommer nämligen aldrig ha tid att göra allt man önskar. Vi ser också att sökning av mål inom stora rymdvinkelområden tar mycket tid eftersom det finns många lobpositioner medan målföljning och elledning kräver mycket mindre tid. Detta är en anledning till att det är vanligt att fartyg utöver en gruppantennradar också har en konventionell radar för volymsökning och målföljning på långt avstånd.



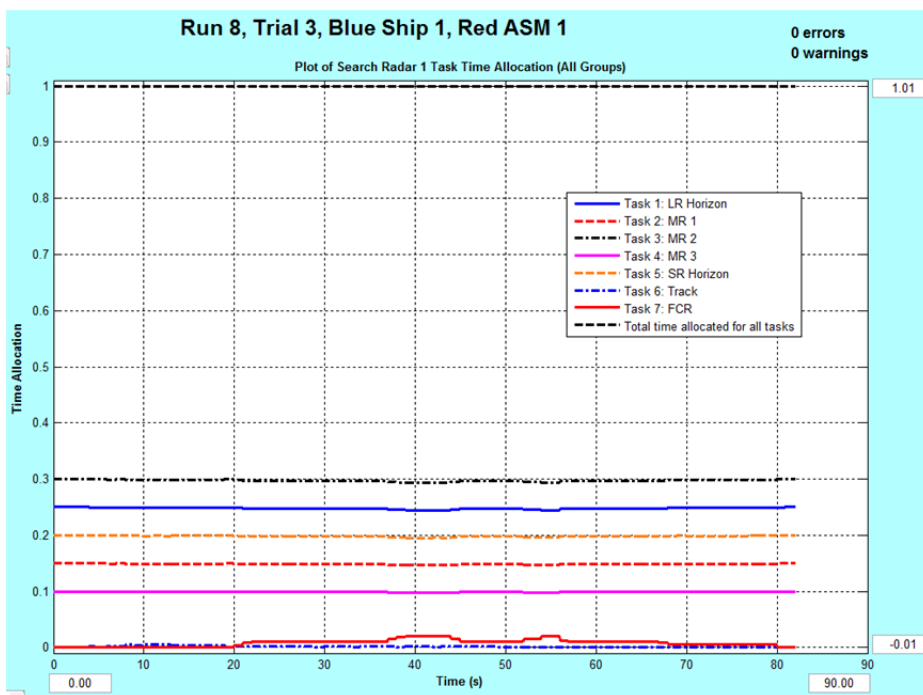
Figur 4: Fartyg med en multifunktionsgruppantennradar med fyra fasta antennaperturer. Synligt är fyra samtidiga spaningslober, en från varje antennapertur. Lobernas riktning ändras snabbt under en simulering. Bild från visualisering av en simulering med SIMDIS [18].

I en simulering låter vi fartyget i Figur 4 attackeras av upp till åtta samtidiga sjömålsrobotar i en rad simuleringar. Fartygets överlevnadssannolikhet efter upprepade simuleringar visas till höger i Figur 5. Motsvarande resultat för ett fartyg med en konventionell 2D spaningsradar med roterande antenn visas i samma figur till vänster. Som framgår har fartyget med gruppantenn en väsentligt högre överlevnadssannolikhet. Detta beror på tre saker. 1) Fartyget med gruppantennradar lyckas upptäcka och följa hot tidigare. 2) Fartygets elledningsradarkapacitet blir inte mättad. 3) Belysarna, som inte är en del av gruppantennen, ger förvarning till radarluftvärnsrobotarna, vilket gör att de kan agera snabbare. Detta sammantaget medför att fartyget med en multifunktionsgruppantenn klarar av ett tätare och större angrepp.

I Figur 6 visas resursanvändning, d.v.s. tidsanvändning för de olika radaruppgifterna i en av simuleringarna. Vi ser att målföljning och elledning inte använder mycket av tiden. Spaningsuppgifterna kräver mycket mer tid och ändå är deras resursåtgång strypt i figuren.



Figur 5: Överlevnadssannolikhet för fartyget för ökande antal anfallande sjömålsrobotar. Till vänster med en konventionell 2D spaningsradar med roterande antenn. Till höger en multifunktionsgruppantennradar med fyra fasta antennaperturer. Fartyget med multifunktionsgruppantenn överlever betydligt fler anfallande robotar.



Figur 6: Resursanvändning, d.v.s. tidsanvändning för de olika radaruppgifterna. LR_Horizon: Horisontavsökning på långt avstånd, MR_1 – MR_3: Spaning på medellångt avstånd, SR_Horizon: Horisontavsökning på kort avstånd, Track: Målföljning, Eldledning. Översta kurvan är total tid för alla radaruppgifter. Figuren visar en simulering med sju anfallande robotar.

3.3.2 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 klottret (radarekona) från marken för att undvika att målsignalen drunknar i klottersignalen. Vi har tidigare beskrivit i [9] 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 antennkanaler, d.v.s. en gruppantenn.

Området har vi arbetat med i flera år, se [8], [19], [20] och under senare tid har arbetet varit inriktat mot hur den effektiva klotterrangen beror på olika faktorer [21]. Den effektiva klotterrangen är ett mått på hur svårt klottret är att undertrycka och därmed hur svårt det är att upptäcka och inmäta markmålet. En tidskriftsartikel av detta arbete är nyligen inskickad.

3.3.3 Avtappning

Vi har deltagit i utvecklingen av en simulator för förbättrad radar i JAS 39 Gripen. En målsignalsimulering med allmänna målbånor, vandring mellan avståndsfällor och amplitud- och fasfluktuationer med målets aspektvinkel. Även funktionalitet för avancerade och bredbandiga vågformer finns implementerade.

System- och signalbehandlingskunskapen har även använts vid FOIs arbete för Försvarsmakten angående sjömålsrobotar.

3.4 Antennteknik

3.4.1 Textilintegrerade antenner

Ett aktivt område med stor potential är textilintegrerade antenner eller ”wearable antennas” på engelska. En textilintegrerad antenn förväntas ge en soldat 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 antenn-egenskaperna. 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 [8]. Ett skyddande jordplan och en distans mot människokroppen behövs därför, där distansen mellan antenn och jordplan fylls upp av ett dielektrikum.

En antenn av typen PIFA (Planar Inverted F-Antenna) har tidigare tagits fram, tillverkats och utvärderats med syfte att visa på potentialen att kunna reducera antalet externa antenner i soldaters utrustning och ersätta dessa med integrerade lösningar. En sammanfattning av arbetet redovisas i [22]. Som dielektrikum användes Rohacell©. Materialet är dock såväl styvt som sprött och är därför inte optimalt för textilintegrerade antenner. En mjukare och mer textilintegrerbar antennlösning önskades därför.

Med inspiration från [23] valdes silikon som dielektriskt material pga. att det är ett flexibelt material kombinerat med en lämpligt hög relativ dielektricitetskonstant, ϵ_r , på 2.9. Detta betyder i sin tur att längden och matningspunkten på antennen dimensioneras ner med en faktor $\sqrt{2.9}$.

En antennenprototyp, baserad på det nya dielektriska materialet designades för en centerfrekvens på 345 MHz med hjälp av EM-programvaran FEKO.

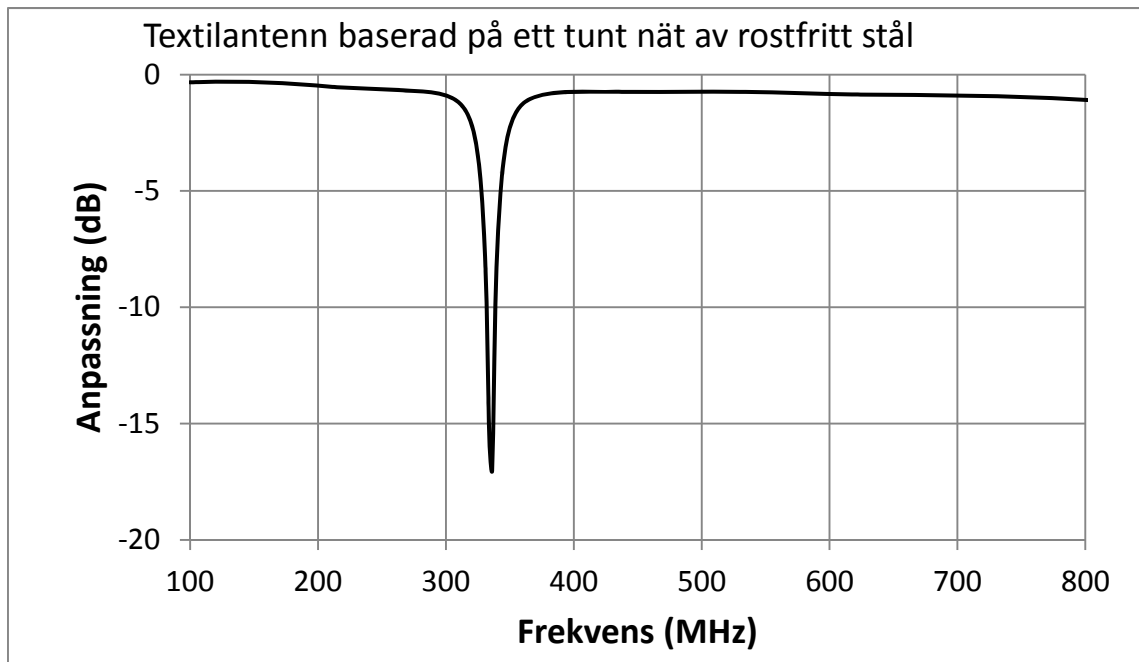
Designen implementerades i olika versioner, dels med ett kopparnät och dels med ett nät i rostfritt stål, se Figur 7. Vi konstaterar att antennen är mjuk, böjlig utan att få några permanenta veck, och har en bra ledningsförmåga.



Figur 7: Antenn med ett kopparnät (vänster) och med ett tunt nät i rostfritt stål (höger). I båda fallen är dielektrikat av silikon.

Mätningar med en nätverksanalysator av antennen i rostfritt stål (till höger i Figur 10) visar att den fungerar väl och är anpassad i närheten av den avsedda centerfrekvensen, se Figur 8. Mer information om arbetet finns dokumenterat i referens [5].

Verksamheten presenterades under sommaren 2014 för FMV där det även diskuterades beställning från FMV för vidareutveckling.



Figur 8: Mätresultat av en textilantennprototyp.

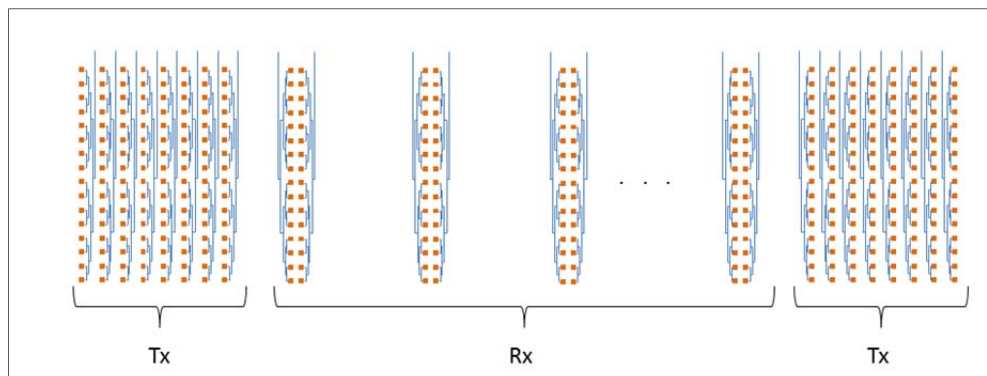
3.4.2 Utglesad gruppantenn till 3D-SARmätsystemet

Under 2012 designades en seriematad mikrostripantenn för en switchad lösningen av mätsystemet för 3D-SAR [8]. Seriematning valdes för att få en enkel tillverkning av antennen och för att det saknades utrymme för parallell matning. Ursprungligen önskades längre antennelement vilket inte var möjligt att realisera i praktiken då bandbreddskraven i kombination med krav på att lobens varierande lutning inom bandet (pga. seriematningen) endast ska vara av ringa betydelse kräver en parallell matning. Detta fanns dock inte utrymme till med den valda arkitekturen och den mindre utrymmeskrävande seriematade lösningen behövdes väljas istället, se [9].

Under 2013 implementerats antennen i mätsystemet för 3D-SAR, se avsnitt 3.2, och uppvisade där förväntade prestanda.

Mättiden med systemet var dock lång och en längre antenlösning längs flygriktningen jämfört med den framtagna vore att föredra för att kunna reducera kravet på samplingstäthet i rummet och därmed minska mättiden. Enligt tidigare stycke tillåter en parallellt matad lösning betydligt större antenlängd utan att problem med lutning införs. Svårigheten med parallell matning är platsbrist mellan antennelementen för sändararrayerna. En möjlig lösning på problemet är att istället använda sig av en annan arkitektur där de utglesade mottagarelementen placeras parvis, i en icke utglesad konfiguration (0.7λ), vilket innebär att sändarelementen kan separeras till $2 * 0.7 \lambda$, mot tidigare 0.7λ . Mer plats ges då till fördelningsnätet vilket behövs för att reducera dess interna koppling.

Arrayarkitekturen består då med denna lösning istället av åtta par mottagarantennar placerade i en utglesad konfiguration mellan de två sändararrayerna, se Figur 9, med 15 cm långa element, därmed 2.5 ggr längre än de tidigare elementen på 5 cm.



Figur 9: Arrayarkitektur för utglesad arrayantenn med parvis placerade mottagarelement.

Antennelement för en parallellt matad antenn är i nuläget designade, tillverkade och uppmätta med goda resultat. Framöver planeras hela arrayen tillverkas och därefter sammanfogas med resterande delen av 3D-SARsystemet och därefter verifieras genom mätningar.

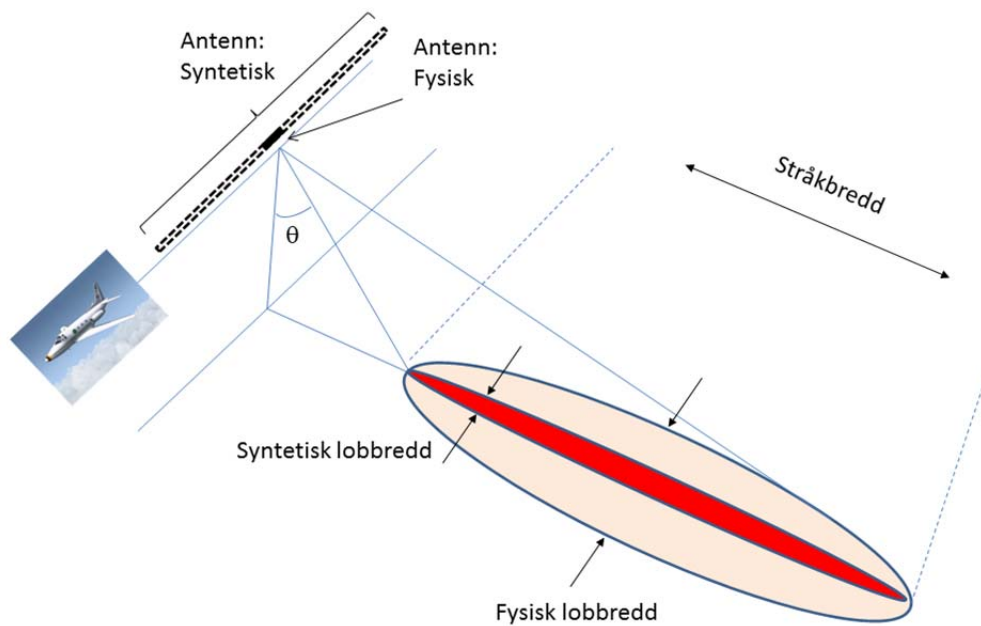
3.5 Rymd

Svenska försvaret visar alltmer intresse för rymdområdet och det är ett av försvarsmaktens i nuläget fyra fokusområden (de övriga är humanforskning, obemannade system och cyberförsvar). FOI bevakar området och Teknisk prognos - Rymd [24], finns utgivet där en sammanfattande bedömning av Technology Readiness Level (TRL) för utvalda teknologier och områden listas. Speciellt noterbart för MUGA-projekt är att områdena sensorfusion och samverkande satellitsystem bedöms ha mycket låga TRL-nivåer (3 resp. 4, dvs. proof of conceptnivå resp. delkomponentverifiering i laborativ miljö) år 2015. Det finns härmed en potential för forskning och utveckling inom områdena och vi bedömer att gruppantenneteknik kan spela en stor roll för utvecklingen.

Flexibilitet i bandbredd, yttäckning/upplösning och utsänd effekt är alla egenskaper som förväntas vara av nytta i framtida rymdtillämpningar. Även miniatyrisering av system är av stort intresse. Teknik som studeras inom MUGA, exempelvis bredbandiga antennkoncept kombinerade med flexibla bakomliggande arkitekturer med rekonfigurerbar kretselektronik, bedöms bidra till den ökade systemflexibiliteten rymdområdet ser behov av framöver. Då tillgängligt utrymme, vikt för sensorn och effekttillgången är starkt begränsad på en satellit ställs höga krav på sensorutformning där studerade koncept i MUGA-projektet kan komma till nytta.

En vanlig förekommande teknik för satellitbaserade radarsensorer är SAR där rörelsen hos plattformen för sensorn används för upplösning i flygriktningen. Upplösning i avstånd ges av den sidotittande geometrin, se Figur 13, där returen från objekt längre bort (i sidled) sett från plattformen kommer tillbaka till radarn senare än motsvarande för objekt närmare plattformen (via frekvenssvept sändpuls särskiljs tidpunkterna för returen).

Stråkbredden, se Figur 10, för systemet bestämmer vilken yta radarn täcker. En stor yta ger en snabb yttäckning, men även en lägre effekttäthet per ytenhet. Det vore därför önskvärt att kunna variera stråkbredden beroende på önskad yttäckning för att kunna fokusera radarns energi till området av mest intresse, vilket exempelvis kan göras med hjälp av gruppantenn.

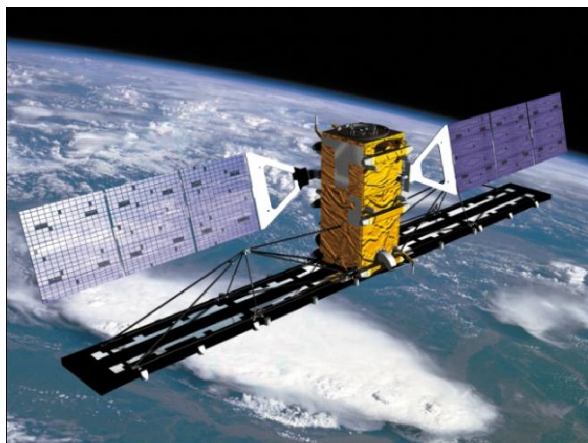


Figur 10: Schematisk beskrivning av geometrin för ett SAR-system.

Exempel på verkamma satelliter bestyckade med SAR-funktion i Europa är TerraSAR-X (X-bandet), COSMO-SkyMed (X-bandet) och RADARSAT 2 (C-bandet), se Figur 11. Alla dessa SAR-system har spotlight och stripmap SAR-funktion och använder sig av gruppantenn-teknik för att kunna styra stråkbredden och därmed även dess upplösning [11]. Tabell 1 nedan visar prestanda och funktionalitet för TerraSAR-X.

Tabell 1: Prestanda och funktionalitet för TerraSAR-X [25].

Mod	Scenstorlek (km ²)	Upplösning (m)	Max. striplängd, (km)	Polarisation
SpotLight	10 x 5	1	--	Enkel, dubbel
StripMap	30 x 50	3	1500	Enkel, dubbel, fyrdubbel
ScanSAR	100 x 150	16	1500	Enkel



Figur 11: Artist's impression av RADARSAT 2 [26].

3.6 Arkitekturer och teknikval för MAESA

Gruppantennsystem baserade på Active Electronically Scanned Array (AESA) med upp till flera tusen separata sändare/mottagare (T/R-moduler) har under senare år börjat ersätta mer traditionella (mekaniskt skannande) radar- och telekrigssystem för olika typer av mark-, sjö-, flyg- samt rymd-baserade sensorplattformar [27]. I jämförelse med flertalet av dagens militära RF-sensorsystem som är mer inriktade mot en specifik funktion (t.ex. radar eller motmedel) över ett givet frekvensområde (t.ex. vid C-band eller X-band) kommer framtida multifunktionssystem (MAESA) att ställa nya prestandakrav beträffande t.ex. systembandbredd för att i ett gemensamt system kunna upprätthålla flera samtidiga funktioner inom radar, telekrig (TK) och kommunikation [28]. Framtida högtintegrerade gruppantennsystem baserade på ny teknik för MAESA och med multi-bandkapacitet bedöms kunna resultera i förbättrade samt nya utökade förmågor då olika radar samt telekrigfunktioner (t.ex. bredbandiga störsändare) kombineras med även mindre störkänslig RF-kommunikation inom valda frekvensband (t.ex. C-band/X-band samt från L-band till Ku-band).

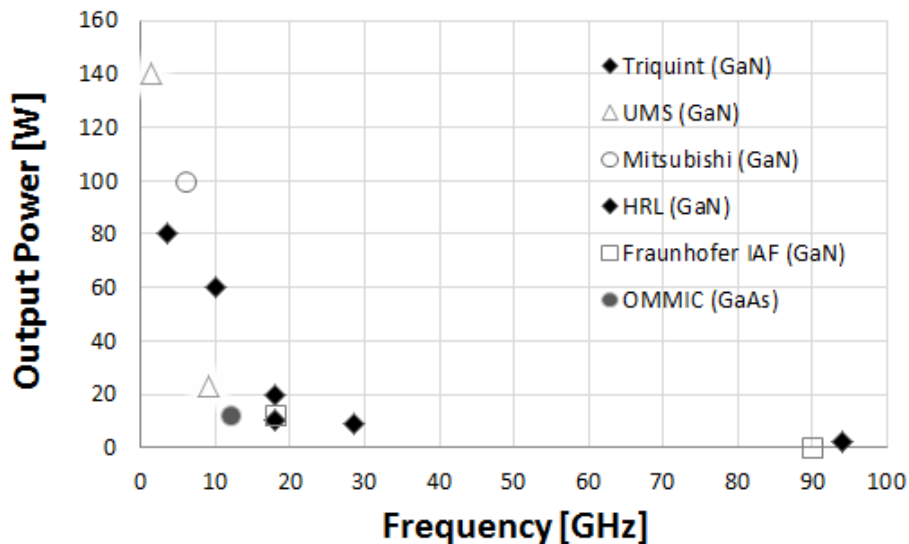
En utmaning består i att kunna reducera kostnaden och komplexiteten för AESA-system för flera olika militära ändamål då de är relativt dyra att tillverka och där priset för T/R-moduler utgör en hög andel (20-40%) av totalkostnaden. Koncept för kostnadseffektiva arkitekturer har studerats inom projektet och presenteras i [3]. Speciellt för mindre plattformar med en högst begränsad tillgång till utrymme och tillgänglig energiförsörjning för att upprätthålla olika sensorförmågor är det angeläget att kunna reducera den totala storleken, vikten och effektförbrukningen - eng. Size, Weight and Power (SWaP).

Nya teknologier kan ge helt nya möjligheter. Exempelvis bedöms den pågående komponentutvecklingen baserat på halvledarmaterialet GalliumNitrid (GaN), se avsnitt 3.6.1, kunna medföra systemförbättringar genom bl.a. högre integration och effekttålighet (vilket kan möjliggöra utökade räckvidder och/eller mera kompakta system) i jämförelse med de T/R-moduler som används i dagens operativa radar/TK-system och som mestadels utgörs av halvledarkomponenter (MMIC) tillverkade på GalliumArsenid (GaAs).

3.6.1 Utvecklingen inom GaN-området

Utvecklingen av GaN RF-komponenter (och i första hand effektförstärkare) har kommit allra längst i USA som en följd av de relativt stora statliga forskningsprogram som genomförts i nära samarbete mellan industri och akademi. De amerikanska komponenttillverkarna Triquint och Hittite var i slutet av 2013 de enda foundries som erbjuder GaN-komponenter från L-band upp till Ku-band som kommersiella produkter. I Figur 12 visas

en sammanställning av några exempel på möjliga uteffektnivåer som uppnåtts för effektförstärkare (PA) upp till 20-30 GHz samt även vid högre mm-vågs frekvenser (W-band) från olika GaN (GaAs) foundries. Bland de kommersiella produkter som Triquint för tillfället erbjuder kan t.ex. nämnas X-band samt Ku-band PA med 50-60 W resp. 20 W i maximal uteffekt [29]. Triquint's bredbandiga (2-18 GHz samt 6-18 GHz) 10 W GaN PA komponenter omfattas dock av exportrestriktioner (ITAR) [29].



Figur 12: Effektnivåer som uppnåtts för olika effektförstärkare från olika tillverkare [29], [33].

En osäkerhet kring huruvida europeiska systemleverantörer verksamma inom försvars/-flyg- samt rymdområdet kan tillförsäkra sig en strategisk tillgång till (amerikanska) GaN komponenter har föranlett företag som bl.a. Thales, EADS och Selex att bedriva utveckling av GaN-teknologi. Tysk-franska UMS (som f.ö. ägs gemensamt av Thales och EADS) är i dagsläget den enda kända europeiska tillverkaren som tillhandahåller GaN transistorer (för tillfället upp till 6 GHz). Baserat på UMS GaN-teknologi har Thales-Alenia-Space demonstrerat en 140 W GaN PA vid L-band [30]. Med inriktning mot telekom (basstationer) samt satellittillämpningar inom C-bandet har en japansk tillverkare (Mitsubishi) tagit fram en 6 GHz 100 W GaN PA [31]. För att kunna förbättra prestandan ytterligare för kommande generationer av sensorplattformar för rymd (X-band SAR) samt MAESA tillämpningar har EADS genom UMS resp. Fraunhofer IAF's GaN MMIC-processer presenterat prototyper av 8-10 GHz samt 6-18 GHz sändarmoduler med 10-23 W i uteffekt [32] och [28]. Som jämförelse kan nämnas att OMMIC (franskt foundry) erbjuder en GaAs (COTS) 8-12 GHz 12 W effektmodul [33]. Med målet att kunna uppnå än större förbättringar av RF-prestanda så kan även nämnas de pågående satsningar som genomförs framförallt i USA för att i en nära framtid kunna producera GaN-transistorer på substrat av diamant (motiverat av dess goda värmeledningsförmåga och som förväntas kunna medföra högre verkningsgrader och effekttätheter). I samband med den vetenskapliga konferensen *IEEE 2013 Compound Semiconductor Integrated Circuits Symposium* (CSICS) så hölls ett antal intressanta presentationer (från bl.a. Triquint) där det indikerades att man i USA framöver (ev. inom en femårsperiod) skulle kunna tillverka GaN-diamanttransistorer med effektnivåer på upp till 40 W/mm (5-10 gånger högre jämfört med dagens GaN-SiC transistorer/effektförstärkare) [34]-[37]. Hittills framtagna resultat visade på möjligheter att uppnå ca tre gånger högre effekttätheter baserat på GaN-diamant (15 W/mm) [34].

4 Medfinansierade projekt

Multifunktionssystem inom RF-området genererar överlag ett stort internationellt intresse och möjligheterna till internationell samverkan inom området är goda, inte minst inom EUs sjunde ramprogram samt under Horizon 2020.

Projektet har mycket goda erfarenheter av internationell samverkan där en relativt liten insats ger ett stort mervärde bl.a. genom att vi tar del av resultat från våra samarbetspartners och i förekommande fall även delar tillverkningskostnader för framtagna hårdvara (t.ex. i form av demonstratorer) eller t.o.m. erbjuds delta i tillverkningsomgångar utan merkostnader. Projektet har haft stor nytta av samarbetsprojekten och ser med tydlighet att de bidrar väsentligt till att kunna utöka våra aktuella kunskaper inom radarområdet.

Samverkan inom ramen för projekt Multifunktionella gruppantennar har skett inom fyra olika projekt: EU FP7-projekten MEMS-4-MMIC, NANOTEC och AIRBEAM samt VINNOVA projektet Multi Purpose Human Finder.

Nedan följer korta sammanfattningar av samarbetsprojekten.

4.1 MEMS-4-MMIC

Projektet MEMS-4-MMIC (*MicroElectroMechanical Systems for Monolithic Microwave Integrated Circuits*) pågick under perioden 2008-2012 och hade som målsättning att monolitiskt integrera MEMS-komponenter (switchar mm) och aktiva front-end kretsar (t.ex. förstärkare) i en GaAs MMIC halvlederprocess för att därmed åstadkomma betydligt lägre switch-förluster och därigenom förbättrad RF prestanda jämfört med dagens kommersiellt tillgängliga halvledarteknologier.

FOIs uppgift i projektet bestod i att undersöka nyttan av MEMS-baserade (låg-förlustiga) switchar, fasvridare och gruppantennar mm för ett 35 GHz multifunktionsantennsystem på en mindre UAV (med se-undvika radar, kommunikationslänk och SAR-GMTI funktioner). Resultaten från genomförda arkitekturstudier och systemsimuleringar presenterades bl.a. som konferensbidrag vid "European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP) 2010" samt vid "European Radar Conference (EuRAD) 2012" [38] och [39]. Dessutom har vi via vår aktiva medverkan i projektet kunna delta i en experimentell utvärdering av den utvecklade GaAs MMIC-processstekniken med monolitiskt integrerade MEMS switchar. Tillsammans med andra partners i projektet har vi bl.a. utvecklat och utvärderat en aktiv rekonfigurerbar MMIC-konstruktion (switchad lågbrusförstärkare) med en uppmätt brusfaktor på 2.4 dB vid 20 GHz. Resultaten presenterades vid "the International Microwave Symposium (IMS) 2012" i Montreal, Kanada [40]. De framtagna resultaten påvisar de låga förluster som dessa MEMS-switchar kan erbjuda (0.1-1 dB från DC upp till 100 GHz) vilket öppnar upp möjligheten för nya kostandseffektiva radar-arkitekturer som t.ex. passiv ESA (PESA).

Projektet Multifunktionella gruppantennar ansvarade för huvuddelen av medfinansieringen för FOIs del inom MEMS-4-MMIC.

4.2 Multi Purpose Human Finder

VINNOVA-projektet Multi Purpose Human Finder var ett samarbete mellan Cinside, Novelda (Norge) och FOI och hade som mål att ta fram en produkt för att upptäcka människor i rasmassor. Projektet började i mars 2011 och pågick till mars 2013. En gruppantenn utvecklades med styrd lob i både sändning och mottagning, därigenom fås tillgång till både avstånd och riktning information om placering av människor i rasmassor. FOI har under projektet dels arbetat med framtagandet av systemspecifikationer och systemarkitekturen, och dels tagit fram antennlösningar bestående av nio antennelement vardera på sändar- och mottagarsidan i två versioner, se [41].

Vidare har FOI studerat algoritmer för rörelsedetektion. Projektresultat presenterades i form av en poster på konferensen TAMSEC 2013 [42].

Då snabb upptäckt och positionering av människor i rasmassor kan vara livsavgörande bedöms nyttan av att ha tillgång till avstånds- och riktningssinformation till eventuella personer, vilket lobstyrning ger, vara stor. Testmätningarna med systemet visar på penetration av material och en hög känslighet för rörelse. Alla målsättningar inom projektet har inte hunnit beaktas fullt ut, men systemet kommer att vidareutvecklas inom ett nytt EU-FP7-projekt (INACHUS) som startar i januari 2015.

Nyttan för FOI har varit, förutom att vi fått erfarenheten att ta fram en ny gruppantenn, att vi lärt oss mer om se-igenom tekniken, men även systemarbete. Vi har byggt vidare på vårt kontaktnät och därmed öppnat möjligheten till nya uppdrag i framtiden genom kontakterna med Cinside och Novelda. Vår kunskaphöjd inom området har upprätthållits och utökats.

4.3 NANOTEC

EU FP7-projektet NANOTEC (NANOstructured materials and RF-MEMS RFIC/MMIC TEChnologies for highly adaptive and reliable systems) ämnar ta fram flera konceptdemonstratorer för olika säkerhetstillämpningar inom frekvensbandet 10-140 GHz (bl.a. flygradar, passiv avbildning samt en miniatyriserad handburen MIMO radar). Projektet startade i september 2011 och planeras pågå t.o.m. juli 2015 [43]. FOI ansvarar för ett arbetspaket inom projektet (konstruktion samt test). Utifrån givna systemkrav och i nära samarbete med flera projektpartners tas specifikt fram miniatyriserade (högintegrerade) delsystemlösningar som förväntas resultera i en förbättrad prestanda och/eller lägre kostnad jämfört med dagens teknik. I projektet deltar såväl europeisk försvarsindustri som mindre (säkerhets)företag samt halvledartillverkare, vilket även bidrar till en stimulerande arbetsmiljö genom den direktppling vi får mellan olika teknik- och systemleverantörer. FOIs deltagande i projektet ger nytta för FM genom att vi dels får ta del av den allra senaste teknikutvecklingen inom radarområdet samt även får ökad kunskap om nya innovativa delsystem/system-lösningar för specifika sensortillämpningar (mikro/mm-vågs radar/radiometer-system). Dessutom utökas vårt internationella kontaktnät vilket även kan resultera i nya framtida samarbeten ihop med andra deltagande parter i projektet.

Hittills under projektet har FOI tagit fram och utvärderat kritiska delsystem för en av de tre konceptdemonstratorer som avses realiseras. En av projektets målsättningar består i att utveckla 94 GHz högintegrerade (kiselbaserade) RF-MEMS switchade radiometer front-ends vilket förväntas kunna medföra förbättrad systemprestanda (högre känslighet) och/eller lägre tillverkningskostnader jämfört med den mer kostsamma Indiumfosfid (InP) processtekniken som använts i tidigare framtagna passivt bildalstrande 94 GHz sensorer. Förbättringspotentialen för den typen av passiva och aktiva mm-vågs sensorer studeras inom projektet för olika se-genom tillämpningar (upptäckt av dolda vapen och explosivämnen under kläder/textilier vid civila samt militära check-points). Några utvalda exempel på inom projektet framtagna delsystemkomponenter (kalibreringsswitch, detektorer mm) återges i referenserna [44]-[47].

4.4 AIRBEAM

AIRBEAM är ett Eu-FP7-projekt 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 gruppantennar 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.

Arbetspaketet "radar sensors" medfinansieras till största delen av MUGA-projektet och har som mål att dels identifiera och specificera radarsensorer för AIRBEAMs behov och dels utveckla simuleringsmodeller för radarsensorer. Även en hårdvarudemonstrator, i form av en fyra elements PESA-modul integrerat i ett LTCC-substrat (Low Temperature Cofire Ceramic) inklusive antennelement, fasskiftare, kombineringsnät och LNA, har tagits fram och verifieras.

Totalt har tre rapporter levererats inom arbetspaketet radar sensors, där den första identifierade och specificerade alternativ för radarsensorer till AIRBEAM. Den andra rapporten behandlade simuleringsmodeller för radarsensorer där FOIs bidrag bestod i huvudsak av att belysa inverkan av delkomponenternas prestanda för hela radarsystemets prestanda för PESA-baserade arkitekturer. Den avslutande tredje rapporten för FOIs del inom arbetspaketet hade hårdvarusidan i fokus och presenterade en tillverkad och validerad PESA-modul, integrerad i LTCC.

FOI har även deltagit i flera av projektets anordnade workshops, vilket givit ett stort utbyte för flertalet FOI-anställda.

5 Framtida utsikter och slutord

5.1 Framtida utsikter

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

Under projekttiden ser vi speciellt en stor utveckling inom multifunktions gruppantenner där system med flera olika funktioner kommer alltmer, exempelvis den amerikanska väder- och luftövervakningsradarn MPAR och fartygsradarn IM400 från Thales i Nederländerna. Även inom stridsflygplansområdet har gruppantenner med elektrisk styrning fått fotfäste. Exempel på detta är multifunktionsradarn på den amerikanska plattformen F-22A.

5.2 Slutord

Följande personer har arbetat i projektet under projekttiden 2012-2014:

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

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

6 Leveranser

Projektet har levererat forskningsresultat till kunden (FM) i form av milstolpar, men även till forskarvärlden genom deltagande och presentationer vid konferenser, både nationellt och internationellt. Kundleveranser, se kap.6.2, har skett skriftligt, men även muntligt genom föredragningar av projektresultat inför kund. I kapitel 6.1 - 6.8 sammanställs projektets leveranser.

6.1 Milstolpar

2012-06-10	Scenario för demonstration av digitala multifunktionella gruppantennar - Tekniska realiseringar (2 i kap. 6.2)
2012-12-01	Multifunktionella Gruppantennar -årsrapport 2012 (5 i kap. 6.2)
2013-06-10	Omvärldsbevakning av Multifunktionella Gruppantennsystem (8 i kap. 6.2)
2013-12-01	Multifunktionella Gruppantennar -årsrapport 2013 (9 i kap. 6.2)
2014-03-14	Kundseminarium (10 i kap. 4.2)
2014-12-01	Slutrapport. FOI rapport (det här dokumentet, 13 i kap. 6.2)

6.2 FOI rapporter och memon

FOI särtryck redovisas i nästa avsnitt (6.3).

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-marksöjning - Teknisk sammanfattning*", FOI-D--0450--SE.
2. A. Gustafsson, L. Pettersson, A. Nelander, P. Grahn, "*Scenario för demonstration av digitala multifunktionella gruppantennar - 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 Gruppantennar -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.
8. A. Gustafsson, A. Nelander, P. Grahn, L. Pettersson, "*Omvärldsbevakning av Multifunktionella Gruppantennsystem*", FOI-R--3681--SE.
9. A. Gustafsson et. al., "*Multifunktionella Gruppantennar -årsrapport 2013*", FOI-R--3754--SE.
10. A. Gustafsson, "*Redovisning av milstolpe kv1 2014 för projekt Multifunktionella Gruppantennar, Försvarmaktens ref.nr. - AF.9220409*", FOI Memo 4870.

11. A. Gustafsson, "Enbladare - 3D-SAR för robust UAV-spaning i urban miljö", FOI Memo 4905.
12. A. Gustafsson, P. Grahn, A. Nelander, L. Pettersson, R. Malmqvist "Kostnadseffektiva lösningar för multifunktionella gruppantennsystem", FOI Memo 5154.
13. A. Gustafsson, P. Andersson, S. Björklund, P. O. Frörlind, P. Grahn, R. Malmqvist, A. Nelander, A. Pohl, L. Pettersson, "Multifunktionella Gruppantenner - slutrapport", FOI-R--4003--SE.

6.3 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. 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 (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 (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 (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).

R. Baggen, M. A. Campo, R. Malmqvist, T. Vähä-Heikkilä, W. Simon, B. Grandchamp, P. A. Rolland, "Innovative MEMS-MMIC Components for Agile Antenna Frontends," Proceedings of the 7th European Conference on Antennas and Propagation, Gothenburg, Sweden, 8-12 April 2013 (FOI-S--4342--SE).

D. Dancila, R. Malmqvist, S. B. Reyaz, R. Augustine, C. Samuelsson, M. Kaynak and A. Rydberg, "Wide Band On-Chip Slot Antenna with Back-Side Etched Trench for W-band Sensing Applications," Proceedings of the 7th European Conference on Antennas and Propagation, Gothenburg, Sweden, 8-12 April 2013, pp. 1520-1522 (FOI-S--4341--SE).

S. Björklund, "The Design, Development and Use of a Matlab Toolbox for Radar Modeling, Simulation and Signal Processing," International Radar Symposium, Dresden, Germany, June 19-21, 2013 (FOI-S--4485--SE).

A. Gustafsson, C. Samuelsson, R. Malmqvist, S. Seok, M. Fryziel, N. Rolland, B. Grandchamp, T. Vähä-Heikkilä, R. Baggen, "A 0-Level Packaged RF-MEMS Switched Wideband GaAs LNA MMIC," Proceedings of the EuMIC Conference 2013, pp. 432-435, Nuremberg, Germany, Oct. 6-8 2013 (FOI-S--4451--SE).

R. Malmqvist, C. Samuelsson, S. Reyaz, A. Gustafsson, S. Seok, M. Fryziel, P. A. Rolland, B. Grandchamp, R. Baggen, "A GaAs MMIC Single-chip RF-MEMS Switched Tunable LNA," Proceedings of the IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS) 2013, Monterey, USA, Oct. 13-16 2013 (FOI-S--4484--SE).

R. Jonsson, C. Samuelsson, S. Reyaz, R. Malmqvist, A. Gustafsson, M. Kaynak, A. Rydberg, "SiGe Wideband Power Detector and IF-Amplifier RFICs for W-Band Passive Imaging Systems," Proceedings of the 36:th International Semiconductor Conference (CAS) 2013, Sinaia, Romania, Oct. 14-16 2013 (FOI-S--4500--SE).

R. Malmqvist, R. Jonsson, C. Samuelsson, A. Gustafsson, S. Reyaz, D. Dancila, A. Rydberg, B. Grandchamp, S. Seok, M. Fryziel, P. A. Rolland, P. Rantakari, M. Lahti, T. Vähä-Heikkilä, R. Baggen, "RF-MEMS Reconfigurable GaAs MMICs and Antennas for Microwave/MM-Wave Applications," Proceedings of the 36:th International Semiconductor Conference (CAS) 2013, Sinaia, Romania, Oct. 14-16 2013 (FOI-S--4499--SE).

A. Gustafsson, D. Axelsson, S. Lindström, L. G. Huss, S. Leijon, "Phased Array Radar for Human Detection in Collapsed Structures," Proceedings of the TAMSEC Conference, Stockholm, Sweden, Nov. 13-14 2013 (FOI-S--4452--SE).

A. Gustafsson, P.O. Fröling, P. Andersson, "3D-SAR Measurements Using a Sparse Array Antenna," Proceedings of the GigaHertz Symposium (Swedish Microwave Days), Chalmers, Gothenburg, Sweden, March 11-12 2014 (FOI-S--4676--SE).

R. Jonsson, C. Samuelsson, S. Reyaz, R. Malmqvist, M. Kaynak, A. Rydberg, "SiGe BiCMOS Wideband Power Detectors for W-Band Passive Imaging Systems," Proceedings of the GigaHertz Symposium (Swedish Microwave Days), Chalmers, Gothenburg, Sweden, March. 11-12 2014 (FOI-S--4722--SE).

P. O. Fröling, A. Gustafsson, "Preliminary results of 3D SAR imaging using a sparse antenna array at K-band," Proceedings of the EUSAR Conference 2014, pp. 52-54, Berlin, Germany, June 3-5 2014 (FOI-S--4808--SE).

S. Björklund, "A Three-Dimensional Displaced Phase Center Antenna Condition for Clutter Cancellation," Proceedings of the SAM-14, Sensor array and multichannel signal workshop, A Coruña, Spain, June 22-25 2014 (FOI-S-4865--SE).

R. Jonsson, "Design and Results of W-Band Power Detectors in a 130 nm SiGe BiCMOS Process Technology," Proceedings of the EuMIC Conference 2014, pp. 289-292, Rome, Italy, Oct. 6-7 2014 (FOI-S--4849--SE).

6.4 Tidskrifter

S. Björklund, A. Nelander, M. I. Pettersson, "Auxiliary Beam Terrain Scattered Interference Suppression - Reflection System and Radar Performance," IET Radar, Sonar and Navigation, Vol. 7, No. 8, pp. 836-847, 2013 (FOI-S--4433--SE).

S. Reyaz, C. Samuelsson, R. Malmqvist, S. Seok, M. Fryziel, P. A. Rolland, B. Grandchamp, P. Rantakari, T. Vähä-Heikkilä, "W-Band RF-MEMS Dicke Switch Networks in a GaAs MMIC Process," Microwave and Optical Technology Letters, Vol. 55, No. 12, pp. 2849-2853, December 2013 (FOI-S--4483--SE).

R. Jonsson, S. Reyaz, R. Malmqvist, M. Kaynak, "A W-Band Power Detector RFIC Design in 0.13 μm SiGe BiCMOS Process," accepted for publication in Microwave and Optical Technology Letter.

S. Reyaz, R. Malmqvist, A. Gustafsson, M. Kaynak, "SiGe BiCMOS high-gain and wideband differential intermediate frequency amplifier for W-band passive imaging single-chip receivers," accepted for publication in IET Microwaves, Antennas & Propagation.

6.5 Samarbetsrapporter

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

6.6 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, John Wiley & Sons, Ltd (FOI-S--4260--SE).

6.7 Granskning av tidskriftsartikel

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

6.8 Kunddagar

Projektet presenterade forskningsresultat under kunddagen 2014-03-14 vid FMV, Tre Vapen, i Stockholm.

7 Referenser

- [1] A. Gustafsson, A. Nelander, P. Grahn, L. Pettersson, ”Omvärldsbevakning av Multifunktionella Gruppantennsystem”, FOI-R--3681--SE.
- [2] BAE Systems Australia Pty. Ltd. : “SADM - The Most Versatile Model for Maritime Air Defence Analysis”, <<https://sadm.au.baesystems.com>>.
- [3] A. Gustafsson, P. Grahn, A. Nelander, L. Pettersson, ”Kostnadseffektiva lösningar för multifunktionella gruppantennsystem”, FOI Memo 5154.
- [4] A. Gustafsson, ”Enbladare - 3D-SAR för robust UAV-spaning i urban miljö”, FOI Memo 4905.
- [5] A. Gustafsson et. al., ”Multifunktionella Gruppantenn -årsrapport 2013”, FOI-R--3754--SE.
- [6] J. Ender, “A Brief Review of Compressive Sensing Applied to Radar,” Proc. International Radar Symposium, IRS 2013, DGON, Dresden, Germany, 19-21 June 2013, pp. 3-16.
- [7] W. L. Melvin, J. A. Scheer (eds.), “Principles of Modern Radar: Advanced Techniques”, SciTech Publishing, 2013.
- [8] A. Gustafsson, P. Andersson, S. Björklund, L. Kroon, A. Nelander, A. Pohl, ”Multifunktionella Gruppantenn -årsrapport 2012”, FOI-R--3544--SE.
- [9] 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-marksanning - Teknisk sammanfattning”, FOI-D--0450--SE.
- [10] D. Conway, J. Herd, “Digital Beam Phased Array Radar for Aircraft and Weather Surveillance,” Workshop notes WS20: Recent Developments in Phased Array Radar, European Microwave Week 2012, Amsterdam, The Netherlands, 28 Oct. - 2 Nov. 2012.
- [11] R. de Jongh, “Recent advances in naval phased array radar,” Workshop notes WS20: Recent Developments in Phased Array Radar, European Microwave Week 2012, Amsterdam, The Netherlands, 28 Oct. - 2 Nov. 2012.
- [12] M. Ludwig et. al., “Phased Arrays and Electronic Beam Scanning for Spaceborne SAR Systems,” Workshop notes WS20: Recent Developments in Phased Array Radar, European Microwave Week 2012, Amsterdam, The Netherlands, 28 Oct. - 2 Nov. 2012.
- [13] Thales. [Online]. Available: https://www.thalesgroup.com/sites/default/files/asset/document/Datasheet%20IM400_DS163_10_12_HR.pdf [November 28, 2014]
- [14] Northrop Grumman. [Online]. Available: <http://www.northropgrumman.com/Capabilities/ANAPG77AESARadar/Pages/default.aspx> [November 28, 2014].
- [15] L. Pettersson, A. Gustafsson, P.O. Frörlind, J. Svedin, “System concepts for 3D-radar”, FOI-D--0337--SE, 2009.
- [16] P. O. Frörlind, A. Gustafsson, “Preliminary results of 3D SAR imaging using a sparse antenna array at K-band,” Proceedings of the EUSAR Conference 2014, pp. 52-54, Berlin, Germany, June 3-5 2014.

- [17] S. Björklund, A. Nelander, M. I. Pettersson, "Auxiliary Beam Terrain-Scattered Interference Suppression: Reflection System and Radar Performance," IET Radar, Sonar & Navigation, Volume 7, Issue 8, October 2013, pp. 836 -847.
- [18] U.S. Naval Research Laboratory, "SIMDIS™", <https://simdis.nrl.navy.mil/>.
- [19] S. Björklund, "Space-Time Adaptive Processing with a Half-Cylinder Faceted Conformal Antenna," International Radar Conference, RADAR 2009, Bordeaux, France, October 12-16, 2009.
- [20] S. Björklund, T. Boman, A. Nelander, "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.
- [21] S. Björklund, "A Three-Dimensional Displaced Phase Center Antenna Condition for Clutter Cancellation," Proceedings of the SAM-14, Sensor array and multichannel signal workshop, A Coruña, Spain, June 22-25 2014.
- [22] A. Pohl, "Textilintegrerad antenn", FOI Memo 4200.
- [23] A. A. Babar, V. A. Bhagavati, L. Ukkonen, A. Z. Elsherbeni, P. Kallio, and L. Sydänheimo, "Performance of High-Permittivity Ceramic-Polymer Composite, as a Substrate for UHF RFID Tag Antennas," International Journal of Antennas and Propagation Vol. 2012, pp. 2-8, 2012.
- [24] C. Andersson, et. al., "Teknisk prognos - Rymd", FOI Memo 4541.
- [25] Sharing Earth Observation Resources. [Online]. Available: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/t/terrasar-x> [November 28, 2014]
- [26] Space news. [Online]. Available: http://www.spacenews.com/sites/spacenews.com/files/images/articles/Radarsat2_CSA4X3.jpg [November 28, 2014]
- [27] W. Holpp, "The new generation of European e-scan fighter radar," IEEE MTT-S IMS. Dig., May 2010, pp. 530-533.
- [28] U. Schmid et al., "Ultra-wideband GaN MMIC chip set and high power amplifier module for multi-function defense AESA applications," IEEE MTT Trans., Vol. 61, no 8, Aug. 2013, pp. 3043-3050.
- [29] Triquint. [Online]. Available: <http://www.triquint.com> [December 1, 2014]
- [30] S. Rochette et al, "A high efficiency 140 W power amplifier based on a single GaN HEMT device for space applications in L-band," in Proc. of the 7th European Microwave Integrated Circuits Conf. (EuMIC), Oct. 2012, pp. 127-130.
- [31] T. Yamasaki et al, "A 68% efficiency C-band 100 W GaN power amplifier for space applications," Proceedings of the International Microwave Symposium IMS 2010 Workshop, May 2010.
- [32] M. Lorcher et al, "Advanced RF sensors for SAR earth observation using high precision T/R-modules," 3rd Int. Asia-Pacific Conf. on Synthetic Aperture Radar (APSAR), 2011, pp. 1-6.
- [33] Ommic. [Online]. Available: <http://www.ommic.com> [December 1, 2014]
- [34] J. Pomeroy et al, "Improved GaN-on-SiC transistor thermal resistance by systematic nucleation layer growth optimization," in Proc of the 2013 Compound Semiconductor Integrated Circuits Symp. (CSICS 2013), pp. 126-129.

- [35] K.K. Chu et al, "Thermal modelling of high power GaN-on-Diamond HEMTs fabricated by low-temperature device transfer process," Proc. of the 2013 CSIC Symp., pp. 90-93.
- [36] B. Poust et al, "Selective growth of diamond in thermal vias for GaN HEMTs," Proc. of the 2013 CSIC Symp., pp. 86-89.
- [37] Y. Won et al, "Cooling limits for GaN HEMT technology," Proc. of the 2013 CSIC Symp., pp. 81-85.
- [38] T. Boman, R. Malmqvist, C. Samuelsson, A. Gustafsson, R. Baggen, "Antenna RF-System Simulation Including Hardware Artifacts," Proc. of the 4th European Conf. on Antennas and Propagation, Barcelona, Spain, April 2010, pp. 1-5.
- [39] A. Nezirovic, R. Malmqvist, T. Boman, A. Gustafsson, M. Karlsson, "Performance Assessment of RF-MEMS based Passive ESA for Fully-Polarimetric Ka-band SAR," Proc. of the 9th European Radar Conf., Amsterdam, The Netherlands, Oct. 2012, pp. 126-129.
- [40] 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).
- [41] L. G. Huss, A. Gustafsson, "Gruppentenn för personsökning i rasmassor", FOI Memo 3607.
- [42] Gustafsson, D. Axelsson, S. Lindström, L. G. Huss, S. Leijon, "Phased Array Radar for Human Detection in Collapsed Structures," Proceedings of the TAMSEC Conference, Stockholm, Sweden, Nov. 13-14 2013.
- [43] Project Nanotec. [Online]. Available: [http:// www.project-nanotec.com](http://www.project-nanotec.com) [December 2, 2014]
- [44] S. Reyaz, C. Samuelsson, R. Malmqvist, S. Seok, M. Fryziel, P. A. Rolland, B. Grandchamp, P. Rantakari, T. Vähä-Heikkilä, "W-Band RF-MEMS Dicke Switch Networks in a GaAs MMIC Process," Microwave and Optical Technology Letters, pp. 2849-2853, Vol. 55, No. 12, December 2013.
- [45] R. Jonsson, S. Reyaz, R. Malmqvist, A. Rydberg, M. Kaynak, "Design and Results of W-Band Power Detectors in a 130 nmSiGe BiCMOS Process Technology," Proceedings of the EuMIC Conference 2014, Rome, Italy, Oct. 6-7 2014, pp. 289-292.
- [46] R. Jonsson, S. Reyaz, R. Malmqvist, M. Kaynak, "A W-Band Power Detector RFIC Design in 0.13 μm SiGe BiCMOS Process," accepted for publication in Microwave and Optical Technology Letter.
- [47] S. Reyaz, R. Malmqvist, A. Gustafsson, M. Kaynak, "SiGe BiCMOS high-gain and wideband differential intermediate frequency amplifier for W-band passive imaging single-chip receivers," accepted for publication in IET Microwaves, Antennas & Propagation.

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



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
164 90 Stockholm

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

www.foi.se