

Medfinansierad verksamhet inom radarområdet- resultat och nytta för FoT

A. GUSTAFSSON (ED), ROBERT MALMQVIST,
ANDERS NELANDER



A. Gustafsson (Ed), Robert Malmqvist,
Anders Nelander

Medfinansierad verksamhet inom radarområdet- resultat och nytta för FoT

Titel	Medfinansierad verksamhet inom radarområdet - resultat och nytta för FoT
Title	Cofinanced activities within the field of radar- results and benefits for FoT
Rapportnr/Report no	FOI-R--4185--SE
Rapporttyp Report Type	FOI rapport FOI report
Sidor/Pages	38 p
Månad/Month	december/December
Utgivningsår/Year	2015
ISSN	ISSN 1650-1942
Kund/Customer	FM/The Swedish Armed Forces
Projektnr/Project no	E54565
Godkänd av/Approved by	Lars Bohman
Bild/Cover	Live demonstration of the use of airborne sensors Courtesy of Andreas Gustafsson

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

Sammanfattning

Projektet Gruppantennbaserade Radarsystem och tidigare gruppantenn teknikinriktade FoT-projekt på FOI har mycket goda erfarenheter av internationell samverkan (via projekt som medfinansieras) där en relativt liten insats ger ett stort mervärde bl.a. genom att vi får utökad verksamhet inom relevanta områden, kan ta del av resultat från våra samverkanspartners och i förekommande fall även delar kostnader för tillverkning av framtagna hårdvara (t.ex. i form av konceptdemonstratorer).

Samverkan inom ramen för projektet Gruppantennbaserade Radarsystem och dess föregående projekt Multifunktionella gruppantennor och Mikrovågssensorer för 3D-markspaning har skett inom inte mindre än sex olika projekt: EU FP7-projekten MEMS-4-MMIC, NANOTEC, AIRBEAM och INACHUS, VINNOVA-projektet Multi Purpose Human Finder samt det egenfinansierade EDA-projektet SPREWS.

Vi har under verksamheternas gång fått både inblick i och tillgång till state-of-the-art inom områden som kritiska kretsteknologier (ex. MEMS, SiGe, GaN), signal-behandlingsmetodik och värdering av systemprestanda samt antennutveckling. Exempelvis har förenklade subsystem för UAV-baserad radar vid 35 GHz utvärderats. Teknik för se-igenom tillämpningar vid såväl lägre frekvenser (1-2 GHz) som högre frekvenser (94 GHz) har studerats i form av olika switchkoncept (RF-MEMS baserade) och antenndesigner. Vidare har Gallium Nitrid (GaN) sändar-/mottagarmoduler för radartillämpningar testats experimentellt. På högre systemnivå har exempelvis inverkan av hårdvarufel på radarsystemprestandan undersökts. Sammantaget pekar flera av de genomförda studierna på de möjligheter och vinster som potentiellt kan uppnås med ovan nämnda teknologier och systemlösningar t.ex. i termer av reducerad storlek, vikt, effektförbrukning och kostnad vilka utgör dimensionerande faktorer i synnerhet för mindre sensorplattformar (UAV etc).

De nätverk, både nationellt, men främst internationellt, som vi samverkat med består både av akademien, institutssektorn, mindre företag och de stora industrierna. Akademien ger oss främst bättre inblick och överblick beträffande forskningsfronten och state-of-the-art, medan industrin bidrar med kunskap om dagens och morgondagens systemlösningar, inte minst insikt kring faktiska möjligheter och begränsningar. Kontakterna med europeiska leverantörer av kritiska teknologier (t ex OMMIC, UMS) inkluderas i detta och den dialogen är till extra nytta för FOI för kunskapsbyggnad inom radarområdet.

Ekonomiskt sett har samverkansprojekten bidragit med ett substantiellt tillskott till de ekonomiska förutsättningarna för FOI inom radarområdet. Den totala omsättningen av de sex medfinansierade projekten som beskrivs i den här rapporten uppgår till dryga 472 Mkr, varav uppskattningsvis dryga 20 Mkr inom radarområdet tillfallit FOI.

I den här rapporten ges en sammanfattning över verksamheten inom respektive samverkansprojekt kompletterat med en diskussion av dess nytta för FoT-verksamheten inom radarområdet.

Nyckelord: sensorer, radar, multifunktion, gruppantennor, systemintegration, värdering, förmågor, UAV, PESA, MIMO, MEMS, GaN, SiGe, rasmassor, Search-And-Rescue

Summary

The phased array antenna based radar systems project (GUARD) and earlier phased array focused research projects financed by the Swedish Armed Forces have good experiences of both national and international project cooperation (by co-financing). A relatively small effort from FOI gives us the possibility to be part of the much larger total project activities, where for example planned FOI activities gets extended by the co-financed projects, achieved results and manufacturing costs are shared.

In this report activities, experiences and benefits for our customer are described and discussed. The six cooperation (fully or partly co-financed by the GUARD-project (or earlier phased array antenna based projects at FOI)) projects given here are: the EU FP7-projects MEMS-4-MMIC, NANOTEC, AIRBEAM and INACHUS, the VINNOVA-project Multi Purpose Human Finder and the own financed EDA-project SPREWS.

During these projects FOI have got insight in the state-of-the-art in fields such as circuit technologies (e.g. MEMS, SiGe, GaN), signal processing, system assessment and antenna design. For example subsystems for UAV-based radars at 35 GHz have been developed. Concepts for See-Thru applications at lower frequencies (1-2 GHz) and higher frequencies (94 GHz) have been studied by switch circuit designs (RF-MEMS based) and antenna designs. Furthermore, experimental studies of Gallium Nitride (GaN) based transmit/receive modules for radar applications at X-band frequencies is included. At higher system levels the effect of hardware imperfections of the system performance has been evaluated. Overall, the studies indicate the potential of these technologies for improved radar sensors in terms of reduced sensor size, weight, power consumption and cost, which often are limiting factors, especially for small sensor platforms (e.g. UAVs).

The network built up by the project cooperation includes a mix of academia, institutes and smaller and large industries, which gives us insight from different system levels and is an excellent way for us to increase our knowledge in the field. The connections to the European manufacturers of critical technologies (e.g. OMMIC, UMS) is included in the above and this dialogue is of extra importance for FOI in order to maintain a high level of knowledge in the field of radars.

Economically, the project cooperation has contributed by a substantial added value to our economical funding in the radar research field. The total turn-over of the co-financed projects are close to 472 Mkr, of which approximately 20 Mkr are funding in the radar field for FOI.

Keywords: sensors, radar, multifunction, phased array antennas, system integration, capabilities, UAV, PESA, MIMO, MEMS, GaN, SiGe, debris, Search-And-Rescue

Innehållsförteckning

1	Inledning	7
2	Projekt MEMS-4-MMIC	8
2.1	Inledning.....	8
2.2	Verksamhet.....	8
2.3	Relevans för FoT.....	11
2.4	Projektdeltagare från FOI.....	12
3	Projekt SPREWS	13
3.1	Inledning.....	13
3.2	Verksamhet.....	13
3.2.1	Modellering av hårdvarufel	13
3.3	Relevans för FoT.....	14
3.4	Projektdeltagare från FOI.....	14
4	Projekt Human Finder	15
4.1	Inledning.....	15
4.2	Verksamhet.....	15
4.3	Relevans för FoT.....	16
4.4	Projektdeltagare från FOI.....	16
5	Projekt NANOTEC	17
5.1	Inledning.....	17
5.2	Verksamhet.....	17
5.3	Relevans för FoT.....	21
5.4	Projektdeltagare från FOI.....	22
6	Projekt AIRBEAM	23
6.1	Inledning.....	23
6.2	Teknikdemonstration i Portugal oktober 2015	23
6.3	Verksamhet relevant för FoT-projekt Multifunktionella Gruppantennor	24
6.4	Relevans för FoT.....	28
6.5	Projektdeltagare från FOI.....	29
7	Projekt INACHUS	30
7.1	Inledning.....	30

7.2	Verksamhet för FoT-projekt Gruppantennbaserade Radarsystem	31
7.3	Relevans för FoT.....	31
7.4	Projektdeltagare från FOI.....	31
8	Ekonomisk översikt	32
9	Slutsatser	33
10	Publikationer	34
11	Referenser	37

1 Inledning

Radar- och antennteknik 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.

Samverkan inom ramen för projekt Gruppantennbaserade Radarsystem och föregående projekt Multifunktionella gruppantennor och Mikrovågssensorer för 3D-markspaning har skett inom sex olika projekt: EU FP7-projekten MEMS-4-MMIC, NANOTEC, AIRBEAM och INACHUS, VINNOVA-projektet Multi Purpose Human Finder samt det egenfinansierade EDA-projektet SPREWS.

Erfarenheterna av den här projektsamverkan, är mycket goda och en relativt liten insats har givit ett stort mervärde. FOI får en utökad budget inom respektive område, vi får ta del av resultat från våra samverkanspartners och i förekommande fall även dela (eller erbjudas utan kostnad) tillverkning för framtagna hårdvara (t.ex. i form av konceptdemonstratorer). Vi har även byggt ut vårt kontaktnät inom området och fått inblick i och tillgång till den senaste teknologin inom kretsområdet och på signalbehandlingsområdet, men även ökat kunskapen inom antennområdet. Vi ser med tydlighet att den här typen av samverkan väsentligt bidrar till att utöka våra kunskaper inom radarområdet.

Nedan följer sammanfattningar av ovanstående samverkansprojekt där varje projektbeskrivning följs av en kortare diskussion om projektets nytta för FoT inom radarområdet.

2 Projekt MEMS-4-MMIC

2.1 Inledning

FP7-Projektet MEMS-4-MMIC (*Enabling MEMS-MMIC technology for cost-effective multifunctional RF-system integration*) pågick mellan juni 2008 och november 2012 (projektet slutredovisades för EU i januari 2013). Målsättningen var att kunna demonstrera en monolitisk integration av MEMS-switchar med låga förluster i en kommersiellt tillgänglig halvledarprocess (GaAs MMIC) och därmed uppnå förbättrad systemprestanda. Avsnitt 2.2 sammanfattar översiktligt några av resultaten inom relaterade verksamheter för de system- och delsystem(koncept)demonstratorer som utvärderats i projektet.

2.2 Verksamhet

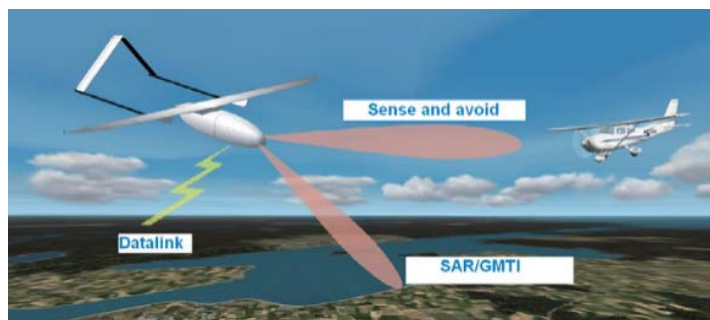
FOI medverkade i fem arbetspaket och ledde även ett av dessa (konstruktion samt test). Relaterade verksamheter i projektet har inriktats primärt mot två gruppantennbaserade applikationsexempel (se Figur 2-1). FOI har bl.a. haft som uppgift att undersöka nyttan av MEMS-baserade (låg förlustiga) switchar, fasvridare och gruppantenner för ett 35 GHz multifunktionssystem på en mindre UAV (se-undvika radar, datalänk och SAR-GMTI).

Nedan sammanfattas kortfattat några av resultaten inom projektets applikationsexempel (switchade miniaturiserade gruppantennsystemlösningar för mm-vågs radar och satcom):

- 35 GHz multifunktionsradar (elektriskt styrbar antenn med MEMS fasvridare)
- 24 GHz satellitkommunikation (elektriskt styrbar antenn med MEMS switchar)

I Figur 2-1 (a-b) visas konceptuella bilder av en mindre UAV utrustad med ett 35 GHz multifunktionsradarsystem [1] samt en planar gruppantenn för satellitkommunikation integrerad i taket på en bil (t.ex. vid 24 GHz) [2]. Gemensamt för dessa applikationsexempel är vissa begränsningar m.a.p. förväntad storlek, vikt, effektåtgång och kostnader (*SWaPC*) för möjliga systemlösningar med avsedda RF-funktioner. Till skillnad från aktivt elektroniskt styrbara (grupp)antennerna (AESA) där en T/R-modul används för varje antenn-element, vilket tenderar att bli kostsamt spec. för mindre (sensor)plattformar, så skulle det för vissa tillämpningar (t.ex. radar på kortare avstånd) kunna vara mer kostnadseffektivt att nyttja passivt elektriskt styrbara antenner (PESA). PESA innebär att endast en sändare och mottagare används för en delantenn (subarray) kombinerat med en fasvridare vid varje antenn-element. För vissa tillämpningar innebär det att en billigare och även mer effektsnål gruppantenn potentiellt kan realiseras med PESA, givet att förlusterna i fasvridarna är tillräckligt låga för att möjliggöra en viss systemprestanda (t.ex. önskad räckvidd). Detta förutsätter tillgång till relativt billiga och effektsnåla fasvridare med låga förluster. Dagens kommersiella transistorbaserade fasvridare har begränsad effektåtgång men relativt höga förluster för bl.a. mm-vågstillämpningar (6-8 dB inom Ka-bandet [3]).

Omfattande FoU-satsningar har bedrivits i omvärlden för att utveckla olika switchkoncept (kapacitiva, ohmiska etc) baserat på RF Mikro-Elektro-Mekaniska-System (MEMS). Attraktiva fördelar med MEMS switchar är dess låga förluster (0.1-1 dB upp till 100 GHz) och låga effektförbrukning vilket öppnar upp nya möjligheter t.ex. i kombination med kostnadseffektiva radararkitekturer som PESA [4]. I USA pågår relativt omfattande systemintegration av kommersiellt tillgängliga MEMS switchar, bl.a. en PESA med 5000 MEMS switchar vilken även har testats som en del av en X-bands radar [5]. Antalet europeiska RF-MEMS tillverkare är i dagsläget få (bl.a. Thales och Airbus [6], [7]).



(a)



(b)

Figur 2-1: Applikationsexempel som studerats i projektet: (a) en mindre UAV utrustad med en 35 GHz kompakt och effektsnål multifunktionsradarsensor [1] samt (b) 24 GHz gruppantenn för SatCom [2].

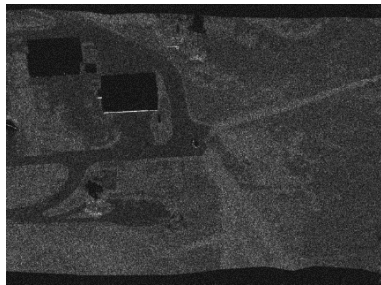
OMMIC är ett av två existerande europeiska GaN foundries (det andra är UMS som ägs av Thales och Airbus) och som sedan 1990-talet erbjuder kommersiell tillverkning av monolitiskt mikroavågsintegrerade kretsar (MMIC) på bl.a. GaAs-substrat. Inom FP7-projektet MEMS-4-MMIC har genomförts studier av realiserbarhet och potentiell nytta med MEMS switchar monolitiskt integrerade i en kommersiell halvledarprocess från OMMIC [8].

Resultaten från vid FOI genomförda arkitekturstudier och systemsimuleringar har bl.a. presenterats som konferensbidrag vid ”European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP) 2010” samt ”European Radar Conference (EuRAD) 2012” [1], [2]. I Figur 2-2(a) visas en högupplöst datorgenererad bild av ett geografiskt område (ex. scenario) baserat på en flygburen laserskanner. Radarsensorer erbjuder bl.a. allvädersförmåga men kan resultera i relativt komplexa och kostsamma systemlösningar spec. i AESA-fallet. I Figur 2-2(b-c) visas motsvarande simulerade bilder för en tänkt syntetisk apertur radar (SAR) baserat på ett 35 GHz PESA-system och där förlusterna i fasvidarna är 2 dB resp. 4.5 dB (typiska värden för MEMS resp. transistorbaserade Ka-bands 3-bitars fasvidare [3], [9]). Utifrån dessa SAR-bilder kan noteras att en högre upplösning uppnås i fallet med 2 dB i förluster något som indirekt även påvisar den potentiella nyttan med MEMS-fasvidare.

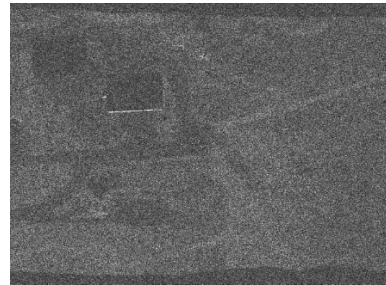
FOIs aktiva medverkan i projektet har dessutom inneburit att vi kunnat delta i en experimentell utvärdering av den utvecklade MMIC-processtekniken med monolitiskt integrerade MEMS switchar. Tillsammans med andra partners i projektet har vi tagit fram och utvärderat en konceptdemonstrator bestående av en 24 GHz switchad PESA med ett MEMS *Single-Pole-4-Through* (SP4T) switchnät och lågbrusförstärkare (LNA) integrerat på samma chip (se Figur 2-3a) [10]. Figur 2-3(b) visar simulerad och uppmätt antennvinst (genom att välja önskat switchtillstånd kan antennloben styras ut från -55° till 45°). Inom projektet framtagna resultat har även publicerats i en peer-review tidskrift [8] och vid ett antal vetenskapliga konferenser (bl.a. har FOI presenterat relaterade forskningsresultat vid ”the International Microwave Symposium (IMS) 2012” i Montreal, Kanada [11].



(a)

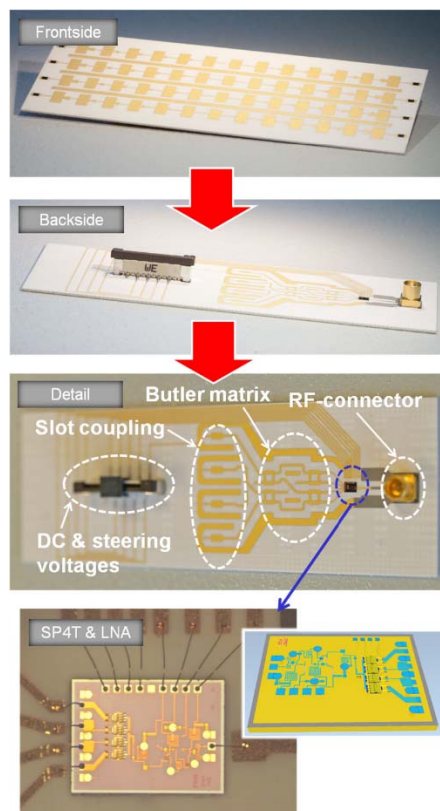


(b)

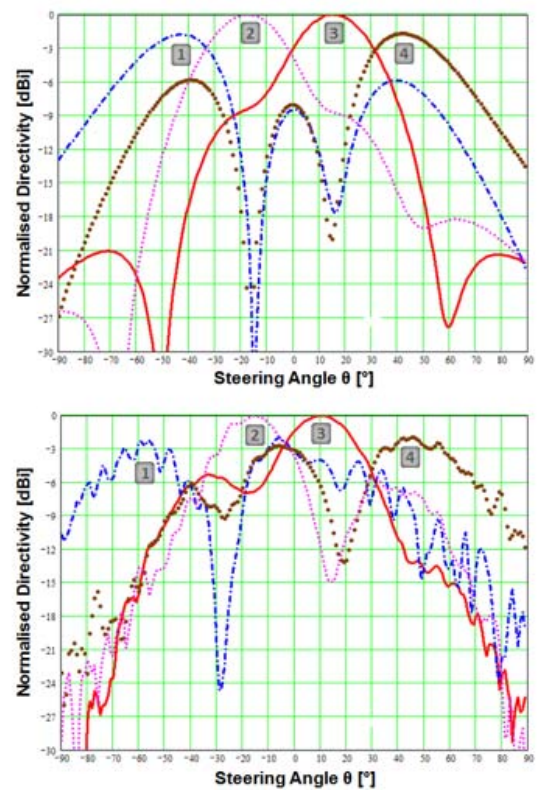


(c)

Figur 2-2: (a) Högupplöst datorgenererad bild av ett geografiskt område (med flygburen laserskanner) (b-c) samt motsvarande simulerade SAR-bilder för en mindre UAV utrustad med en 35 GHz passivt elektriskt fasstyrd gruppantenn (PESA) och givet att förlusterna i fasvidarna är 2 dB resp. 4.5 dB [1].



(a)



(b)

Figur 2-3: (a) En 24 GHz elektriskt styrd gruppantennmodul (ESA) med en RF-MEMS switchad LNA samt (b) simulerad resp. uppmätt direktivitet för fyra olika utstyrningsvinklar mellan -55° och 45° [10].

2.3 Relevans för FoT

FOIs deltagande i EU-projektet MEMS-4-MMIC (2008-2012) har medfört fördjupade kunskaper kring den senaste teknikutvecklingen inom radarområdet och speciellt m.a.p. kompakta (miniaturiserade) gruppantennlösningar för mikro- och mm-vågstillämpningar. Projektet har bidragit till vidareutveckling av en vid FOI framtagen systemsimulator som använts för att studera hur framtida multifunktionssystem kan komma att dimensioneras t.ex. för små flygande sensorplattformar utrustade med radarsensorer för mark- och luftmålsspaning. Utifrån en behovs- och scenarioanalys har dimensionerande krav analyserats för ett sensorsystem på en taktisk UAV med begränsad tillgänglig effekt. Vidare har FOI även fått ökad kunskap om nya innovativa system-/delsystemlösningar för specifika sensortillämpningar (t.ex. flerfunktionsradar). Vår medverkan i projektet har även inneburit ett utökat internationellt kontaktnät vilket kan resultera i nya framtida samarbeten ihop med andra deltagare.

Baserat på framtagna prestandakrav för en miniaturiserad 35 GHz passivt elektroniskt styrbar gruppantenn (PESA) med flerfunktionsförmåga (se-undvika radar och SAR/GMTI) har ny antennteknik i form av RF MEMS switchar och fasvridare med låga förluster studerats. Framtagna resultat visar på de potentiella vinster som kan uppnås med MEMS-baserade gruppantennsystem (t.ex. i form av reducerad komplexitet, storlek, vikt, pris och effektförbrukning). Givet att MEMS-switchar med tillräckligt hög tillförlitlighet kan tas fram till ett rimligt pris så skulle t.ex. en MEMS-baserad PESA på sikt kunna utgöra ett mer kostnadseffektivt alternativ för vissa tillämpningar (jämfört med AESA) vilket kan underlätta framtagandet av dylika radarsensorsystem med allvädersförmåga. I dagsläget begränsas detta framförallt av att det endast finns ett fåtal kommersiella tillverkare av RF-MEMS samt att flera av dessa primärt är inriktade mot civ. tillämpningar under 5-10 GHz (t.ex. WiSpry och DelfMEMS [12], [13]). Airbus och Troncis (Fr.) har nyligen annonserat ett pågående samarbete som syftar till att kunna erbjuda kommersiellt tillgängliga MEMS switchar även över dessa frekvenser för bl.a. radartillämpningar [7].

I punktform kan nyttan för FoT-verksamheten inom radarområdet sammanfattas enligt följande:

- De inom projektet framtagna resultaten har bidragit till ökad kunskap om hur framtida kompakta sensorsystem kan dimensioneras och integreras (t.ex. i skrovet på obemannade flygande plattformar) med förbättrad säkerhet t.ex. i samband med nationella eller internationella operationer.
- Projektet har genomförts i nära samarbete med övriga deltagande parter (bl.a. Saab). Svensk och europeisk industri har tillförts ny kunskap och därigenom utökade möjligheter att ta fram mer kvalificerade sensorsystem.
- FOI har bedrivit studier på system och tekniknivå för ett gruppantenn-baserat 35 GHz multifunktionssystem på en mindre UAV bl.a. utifrån av Saab framtagna specifikationer för se-undvika radarfunktionen. Resultaten från genomförda studier visar på betydelsen av låga fasskiftare-(switch) förluster för en sådan miniaturiserad, effektsnål flerfunktionsradarsensor (PESA) på mindre flygburna plattformar.
- FOI har tillsammans med andra industripartners i projektet (IMST, OMMIC) medverkat i framtagandet av en 24 GHz fasstyrd gruppantenn (MEMS switchad LNA MMIC) för radar samt satellitkommunikation. Den 24 GHz kompakta gruppantennlösningen har validerats experimentellt och utgör en skalmodell av en motsvarande MEMS-MMIC antenn vid 35 GHz.

2.4 Projektdeltagare från FOI

Robert Malmqvist (Point of Contact (PoC))

Carl Samuelsson

Andreas Gustafsson

Tomas Boman

Stig Leijon

Rolf Johnsson

3 Projekt SPREWS

3.1 Inledning

EDA-projektet SPREWS (Signal Processing for Radar and Electronic Warfare Systems) startade i februari 2009 och avslutades under januari 2012. FOI deltog med finansiering från FoT-projektet My3D i delprojektet SP1 "Clutter suppression using STAP for radar modes with ambiguous waveforms".

FOI var ansvarigt för ett 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.

FOI deltog dessutom i delprojekten SP3 "ESM signal processing for LPI signals and SEI", SP5 "Signal Processing for Radar systems in networks" och SP6 "Signal Processing for ESM systems in networks".

3.2 Verksamhet

Delprojektets syfte har varit att förbättra radarsystems förmåga att detektera långsamma eller allt mer smyganpassade mark- och luftmål från flygburna radarsystem. Det som behövs är att undertrycka markklotter och störning. Intressant att studera har varit användning av gruppantennor med delantennor och vågformer med mångtydigheter i avstånd och Doppler. Vi har velat hitta robusta och enkla algoritmer för undertryckningen.

SPREWS delprojekt SP1 har innehållit fem arbetspaket. Arbetspaketet "Influence of system hardware imperfections" behandlar modellering och värdering av inverkan av hårdvarufel för flygburen radar med STAP. FOI har haft ansvaret för detta arbetspaket och dess två rapporter. Övriga arbetspaket har vi deltagit i som kravställare och granskare. FOIs verksamhet och resultat sammanfattas i [14].

3.2.1 Modellering av hårdvarufel

I ett radarsystem kan inte hårdvarufel undvikas. Hårdvarufel innebär att hårdvaran har egenskaper som är oönskade eller okända. Felen kan uppkomma bland annat på grund av:

- Inte helt kända antennelementpositioner
- Elektromagnetisk koppling mellan antennelementen
- Olika frekvensegenskaper hos antennkanalerna
- Spektral orenhet vid sändning eller mottagning
- Begränsat momentant dynamikområde
- Samplingsjitter (oexakta samplingstidpunkter)
- Kvantisering i AD-omvandlarna

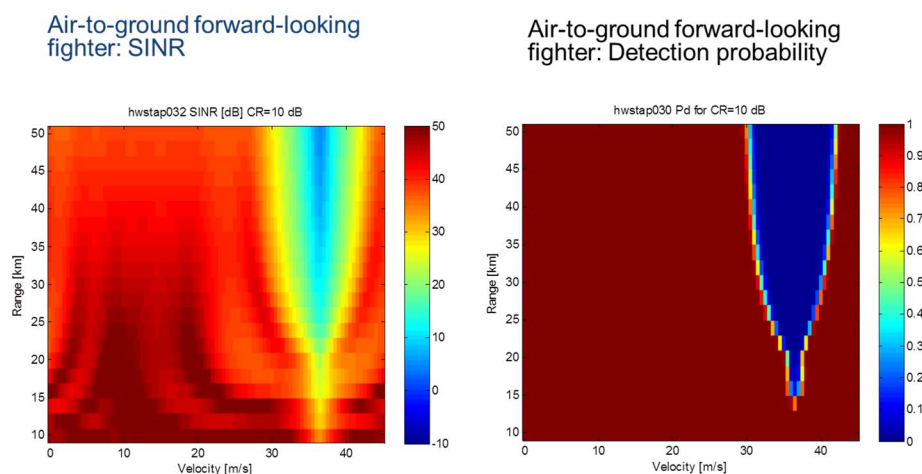
Hårdvarufel i en radar försämrar prestanda i form av SINR (Signal to Interference and Noise Ratio), upptäcktssannolikhet, upptäcktsavstånd, minsta målhastighet för upptäckt, inmättningsnoggrannhet och möjlighet att klassificera målet. Även antalet antennkanaler som behövs för att undertrycka klotter, störare och annan interferens ökar. Det senare är en viktig aspekt då det är kostsamt att ha många antennkanaler.

Man försöker vid tillverkningen och användningen av radarn mäta upp och kompensera för hårdvarufelen genom kalibrering. Kalibreringen måste regelbundet upprepas då hårdvarufelen varierar med tiden och med driftsbetingelserna. Kalibreringen kan hantera

de största felen men det kommer ändå att finnas kvar små hårdvarufel eftersom kalibreringen kan vara alltför gammal vid användningen och eftersom man inte kan mäta och kompensera felen exakt. Det vi fokuserat på i vårt arbete är kvarvarande hårdvarufel efter kalibrering.

Den första rapporten FOI ansvarade för inom SPREWS behandlade hårdvarufel och identifiering och modellering av relevanta hårdvarufel i flygburen radar med STAP. Ett antal hårdvarufel definierades för radar med aktiva elektriskt styrda gruppantennar (AESA). Modeller för flera hårdvarufel togs fram och flera av dessa implementerades i STAP-simulatorens SPREWS STAP Data Generator.

Den andra rapporten FOI ansvarade för behandlade analys och värdering av hårdvarufel ur ett systemperspektiv. Vi modellerade och analyserade hårdvarufelen med delvis nya metoder. STAP-signaler genererades med simulatorens hårdvarufel för typsystemen och scenarierna med radar i stridsflygplan och radar i spaningsflygplan värderades. Vi tog fram en acceptabel nivå på hårdvarufel för att få tillräckliga detektionsprestanda i de olika scenarierna, där vi satte gränsen för acceptabel felnivå till en ökning av MDV (Minimum Detectable Velocity = minsta målhastighet för upptäckt) med 50%. Hårdvarufelen angav vi som en nivå på CR (Cancellation Ratio). CR är ett mått på hur lika antennenkanalerna är. Olikheter i antennenkanalerna kan orsakas många olika typer av hårdvarufel. Olikheter påverkar direkt radarns förmåga att undertrycka klotter, störning och annan interferens med hjälp av STAP. Ett exempel på resultat visas i Figur 3-1.



Figur 3-1: SINR [dB] och upptäcktssannolikhet för nosradar mot markmål som funktion av avstånd och hastighet för CR = 10 dB.

3.3 Relevans för FoT

Vi ser tydligt nyttan med att ha deltagit i SPREWS genom den stora kompetens och nyvunna forskningskunskap vi har fått tillgång till genom en relativt blygsam insats från FOI:s sida. Projektet har också ökat kunskaperna hos samtliga deltagare. Vi har också fått kunskaper om de andra delprojekten inom SPREWS. Samarbetet har också möjliggjort andra projekt och andra typer av samarbeten inom Europa och EDA, vilket det pågående ACACIA-projektet är ett exempel på.

3.4 Projektdeltagare från FOI

Anders Nelander (PoC)
Svante Björklund
Tomas Boman

4 Projekt Human Finder

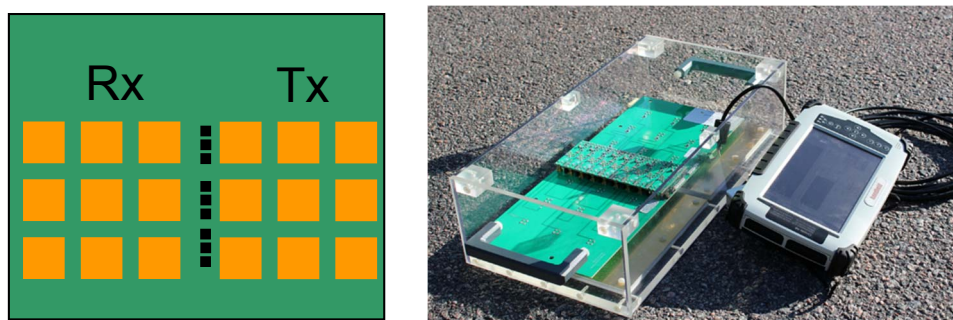
4.1 Inledning

VINNOVA-projektet Multi Purpose Human Finder var ett samarbete mellan Cinside, Novelda (Norge) och FOI och hade som mål att ta fram en gruppantennbaserad radar för att upptäcka levande människor begravda i rasmassor. Projektet började i mars 2011 och pågick till mars 2013.

4.2 Verksamhet

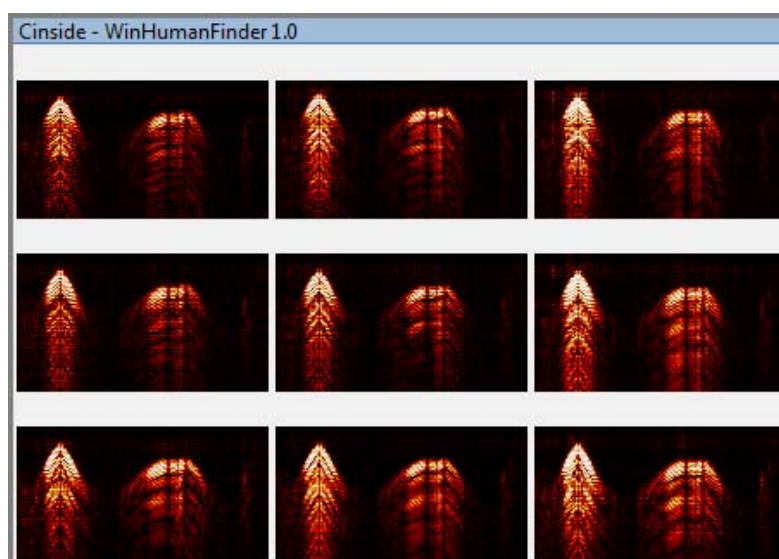
En gruppantenn utvecklades med möjlighet till styrd lob i både sändning och mottagning med syfte att kunna detektera, riktningsbestämma och bedöma avståndet till levande människor begravda i rasmassor.

FOI har dels arbetat med framtagandet av systemspecifikationer och systemarkitekturen, och dels med antennlösningen bestående av en liten gruppantenn om nio antennelement vardera på sändar- och mottagarsidan i två versioner, se [15]. Figur 4-1 visar antenndesignen med elementplaceringen tillsammans med ett foto över experimentsystem.



Figur 4-1: Antenndesign (vänster) respektive experimentsystem för HumanFinder (höger).

Figur 4-2 visar mätresultat för systemets nio kanaler för ett föremål i rörelse. Tid ges på x-axeln och avståndet till objektet i rörelse på y-axeln. Intensiteten hos målet presenteras via ljusstyrkan där en kraftig reflektion ger en ljus avbildning.



Figur 4-2: Mätresultat för systemets nio kanaler. Målet är ett föremål i rörelse där x-axeln markerar tid för mätningen och y-axeln avståndet till objektet. Intensiteten visas via ljusintensiteten där en kraftig reflektion ger en ljus avbildning.

Antennens funktion har verifierats med goda resultat via mätningar. Testmätningarna med systemet visar på penetration av material och en hög känslighet för rörelse. Lobstyrningen var dock inte driftsatt vid projektets slut på grund av tidsbrist, men planeras att bli gjord under vidareutveckling av experimentsystemet inom ett nytt EU-FP7-projekt (INACHUS [33], se avsnitt 7) som startade i januari 2015.

Projektnresultat presenterades i form av en poster på konferensen TAMSEC 2013 [16].

4.3 Relevans för FoT

Nytan för FOI har varit, förutom att vi fått erfarenheten att ta fram en ny gruppantenn, att vi fått en inblick i se-igenom tekniken och de villkor som gäller inom det området. På systemsidan har FOI i nära samarbete med Cinside bidragit med design av radarelektronik-kortet. Vidare har vi byggt ut vårt kontaktnät och därmed öppnat möjligheten till nya uppdrag i framtiden genom kontakterna med Cinside och Novelda. Överlag har FOI vidareutvecklat kunskapen på antenn och gruppantennområdet.

FOIs deltagande i det nya EU-projektet INACHUS är ett tydligt exempel på hur vår befintliga kunskap gör FOI attraktiva som partner inom nya projekt, vilket hjälper oss att vidmakthålla och utveckla de kunskaper och kontaktnät som krävs för att på ett effektivt sätt kunna följa utvecklingen i omvärlden på området.

4.4 Projektdeltagare från FOI

Andreas Gustafsson (PoC)
Lars-Gunnar Huss
Stig Leijon
Lars Pettersson
Amer Nezirovic

5 Projekt NANOTEC

5.1 Inledning

FP7-projektet NANOTEC (*NANOstructured materials and RF-MEMS RFIC/MMIC TEChnologies for highly adaptive and reliable systems*) startade i september 2011 och avslutades i juli 2015. Projektets slutredovisning för EU hölls vid Airbus i Ottobrunn, Tyskland den 8 oktober 2015. En målsättning i projektet har varit att kunna demonstrera möjligheten och nyttan med att använda RF-MEMS switchar med låga förluster för olika systemtillämpningar (radar, radiometer) från X-bandet upp till frekvenser över 100 GHz. I avsnitt 5.2 sammanfattas översiktligt några av resultaten inom relaterade verksamheter som bedrivits för de system- och delsystemdemonstratorer som tagits fram inom projektet.

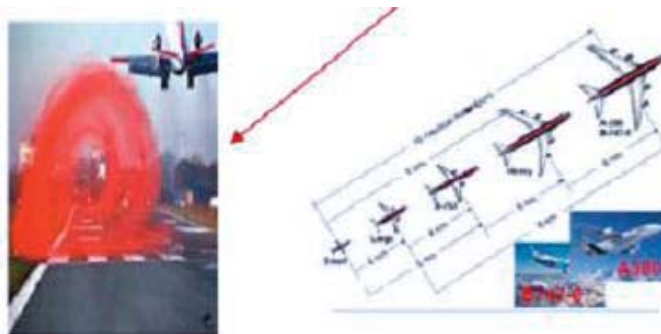
5.2 Verksamhet

FOI har medverkat i fem arbetspaket och ledde även ett av dessa (konstruktion samt test). Utifrån specificerade prestandakrav på system-/delsystemfunktioner, angivna av de företag som ansvarat för respektive demonstrator (Thales, Alfa Imaging och Airbus) har nya miniatyriserade (högintegrerade) system- och delsystemlösningar tagits fram i projektet. Projektets primära syfte och målsättning har varit att kunna applicera och demonstrera nya systemtekniklösningar baserat på RF-MEMS och MMIC/RFIC med förbättrad prestanda och/eller lägre kostnad jämfört med dagens kommersiellt tillgängliga teknik. I projektet har medverkat såväl europeisk försvarsindustri som mindre företag inom säkerhetsområdet samt halvledartillverkare (foundries) vilket bidragit till en stimulerande arbetsmiljö genom direkt återkoppling mellan olika teknik- och systemleverantörer.

Nedan sammanfattas kortfattat några av resultaten för projektets tre teknikdemonstratorer inom switchade gruppantennsystemlösningar för radar och radiometertillämpningar:

- X-bands radar för luftmålsspaning (kompakta, robusta, kostnadseffektiva gruppantennar baserat på RF-MEMS switchade reflect-arrays och GaN T/R-moduler)
- 94 GHz radiometer (ett passivt bildalstrande system baserat på MEMS-switchade mottagarmoduler för att upptäcka dolda vapen, explosivämnen under kläder)
- 140 GHz MIMO radar (en kostnadseffektiv, kompakt radar för att t.ex. kunna se genom kläder, väskor samt landnings-/antikollisionsradar på helikopter och UAV)

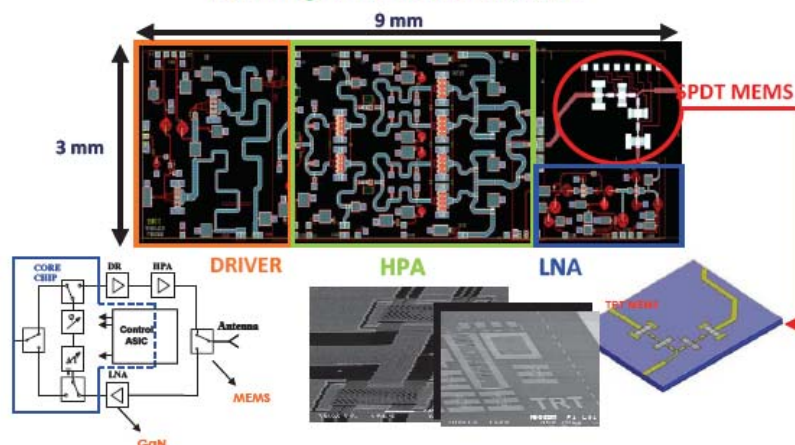
I samband med *European Microwave Week 2013* i Nürnberg, Tyskland (6-11 okt.) hölls en översiktlig workshop om inledande resultat från NANOTEC baserat på ovan nämnda demonstratorverksamheter [6]. Jämfört med mekaniskt skannande radarsensorer och aktivt elektroniskt styrbara antenner (AESA) vilket förutsätter en T/R-modul för varje antenn-element (kanal) så kan s.k. *reflect-arrays* (eng.) möjliggöra en reducerad komplexitet (lägre hårdvarukostnad) för vissa radartillämpningar. I de senare fallet används endast en gemensam T/R-modul för att belysa och ta emot den reflekterade radarsignalen. Radar på flygplatser (t.ex. för att upptäcka drönare, flygplan) samt även radar för mer långräckviddig luftmålsspaning utgör tänkbara applikationer där den studerade GaN och MEMS-switchade (fasstyrda) gruppantenn-tekniken skulle kunna användas (se Figur 5-1) [6], [17]. Högre effekttålighet (robusthet) samt möjlighet till elektriskt styrbarhet med relativt låga förluster (låg effektförbrukning) är typiska egenskaper för dessa teknologier. Raytheon och Saab uppges vara först med att introducera GaN-tekniken i olika radarsystem [18].



Figur 5-1: Exempel på tillämpning för den inom projektet studerade X-band gruppantenn-tekniken (förbättrad radar på flygplatser för upptäckt av t.ex. andra flygplan samt drönare)[17].

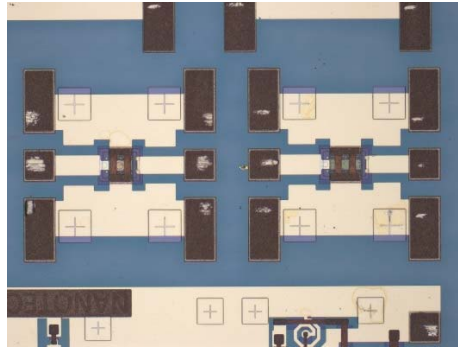
Figur 5-2 visar en av Thales realiserad GaN och RF-MEMS switchad T/R-modul (single-chip) vid X-bandet [6]. De framtagna MEMS-switcharna ska tåla en ineffekt på upp till 30 W, ha en maximal förlust på 0.3 dB samt uppvisa mer än 20 dB i isolation. I jämförelse med den idag mer allmänt tillgängliga GaAs-tekniken så erbjuder en motsvarande högintegrerad robust T/R-modul i GaN-utförande flera attraktiva fördelar så som högre uteffekt och verkningsgrad över en relativt stor bandbredd. Detta bedöms vara av betydande intresse för radar- och telekrigstillämpningar (t.ex. för framtida mark- och flygburna-system inom sensorkedjan).

Demonstration of the feasibility of a monolithic integration of MMIC & RF-MEMS technologies on GaN/SiC substrate



Figur 5-2: Monolitiskt integrerad (single-chip) GaN och RF-MEMS switchad T/R-modul vid X-bandet [6].

FOIs bidrag inom ovan nämnda X-bands demonstratoraktiviteter har utgjorts av on-wafer mätningar av olika typer av teststrukturer (RF-MEMS switchar, GaN LNA, passiver m.m.) som tillverkats inom projektet. Figur 5-3 visar transistorer på GaN/SiC-substrat vilka uppvisar lovande resultat i termer av uppmätt brusfaktor och linjäritet (effekttålighet) [19].

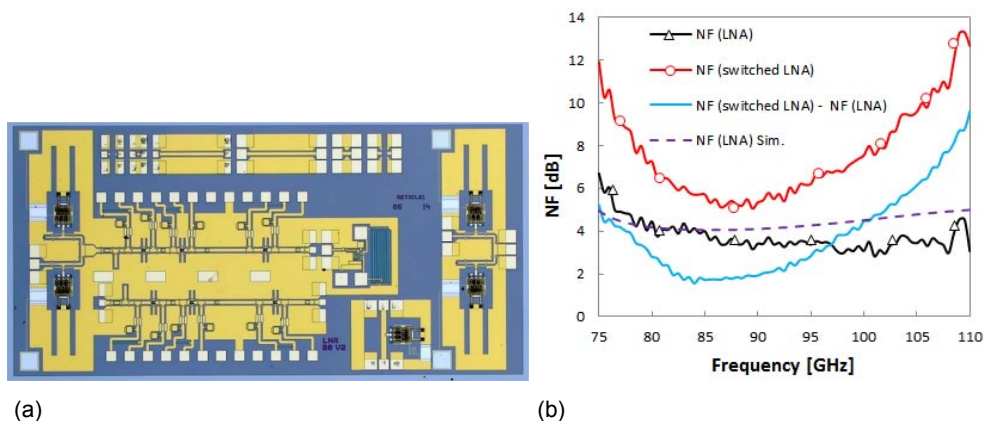


Figur 5-3: Inom projektet experimentellt utvärderade transistorer tillverkade på GaN/SiC-substrat [19].

En gemensam målsättning för projektets tre konceptdemonstratorer består i att kunna realisera högintegrerade MEMS-switchade mottagare och transceiver front-ends med förbättrad systemprestanda (högre känslighet, effekttålighet, miniaturisering) och/eller lägre tillverkningskostnader jämfört med kommersiellt tillgängliga teknologier baserat på III-V material (GaAs, InP).

FOIs medverkan i projektet har primärt varit inriktat mot simulering och karaktärisering av framtagna delsystemlösningar för ett passivt bildalstrande 94 GHz radiometersystem från företaget Alfa Imaging [20]. I deras befintliga W-bands system används 2-chips mottagare (LNA och detektor) tillverkade i en dyr processteknik (InP) vilket även har en direkt inverkan på kostnaden för dessa system [21].

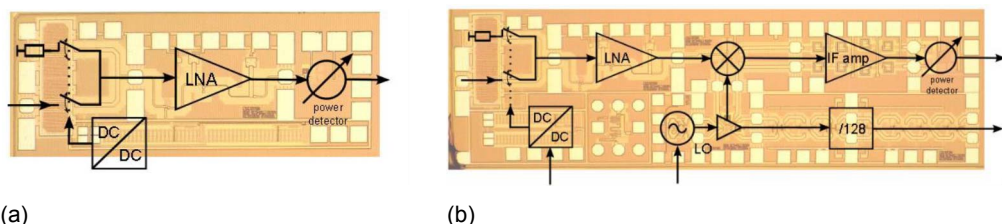
Syftet har varit att undersöka om det är möjligt att uppnå en bättre/liknande RF-prestanda (känslighet) och högre integrationsgrad (lägre kostnader) med mottagar-chip tillverkade på GaAs och kisel. Figur 5-4a-b visar ett chip-foto samt uppmätt brusfaktor för en 94 GHz GaAs LNA med och utan en MEMS Dicke (kalibrerings) switch integrerad på samma chip [22]. Dessa och andra resultat från projektet som publicerats i tidskriftsartiklar, vid konferenser samt i en doktorsavhandling tidigare i år [23] visar på de möjligheter som potentiellt kan uppnås med monolitiskt integrerade MEMS LNA:er och andra mottagarfunktioner för radiometersystem (t.ex. relativt låg brusfaktor, hög känslighet och hög integrationsgrad).



Figur 5-4: (a) W-band LNA MMIC med och utan en monolitiskt integrerad RF-MEMS Dicke switch samt (b) jämförelse mellan uppmätt brusfaktor för W-band LNA med och utan MEMS Dicke switch [22].

Baserat på den senaste kiselbaserade processtekniken öppnas det upp nya möjligheter att uppnå ännu högre integrationsgrader och lägre kostnader för mottagare (front-ends) vid mm-vågsfrekvenser. I Figur 5-5a-b visas fotografier av 94 GHz MEMS-switchade mottagar-chip (med och utan nedblandning till en lägre mellanfrekvens) som tillverkats i IHPs 0.13 μm SiGe BiCMOS process [24]. Dessa mottagare som tagits fram i ett

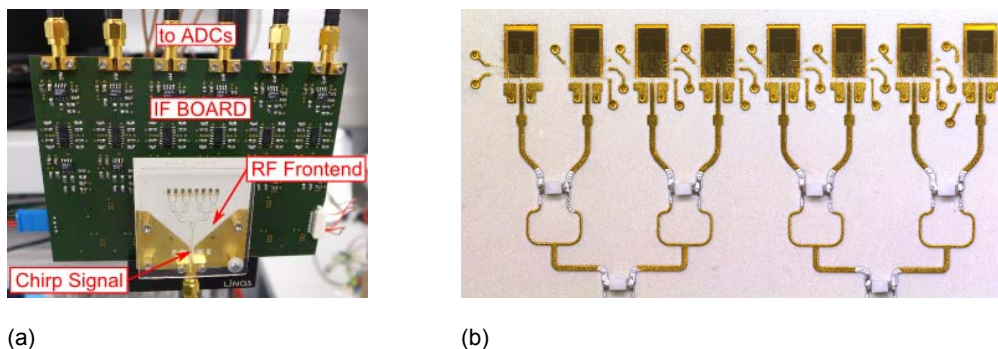
samarbete mellan UULM, FOI och UU uppvisar en RF-prestanda (t.ex. LNA med 3-4 dB i brusfaktor) som är i närheten av vad som uppnåtts för de InP-baserade mottagare som använts i några av dagens kommersiellt tillgängliga W-bands radiometersystem [21]. Givet att en tillräckligt hög tillverkningsvolym kan uppnås för den aktuella tillämpningen så kan kiselbaserade front-ends komma att resultera i avsevärt billigare radiometersystem (jämfört med de dyrare III-V-baserade mottagare som typiskt används i kommersiella W-bands system). Inledande systemtester med de kiselbaserade W-bands mottagarna påbörjades innan projektet avslutades i juli 2015 (bl.a. i ALFA Imagings nuvarande radiometersystem).



Figur 5-5: (a-b) SiGe W-bands MEMS-switchade mottagarchip med och utan nedblandning [24].

Figur 5-6a-b visar fotografier av en i NANOTEC framtagen prototyp av en 140 GHz radarsensor baserat på en 1-dimensionell (1D) MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) antenn-array (2 Tx och 6 Rx element) samt inzoomade delar av det fördelningsnät som används för att distribuera FMCW chirp-signalen (15-17.5 GHz) till sändar- och mottagarchipen [25]. Systembandbredden är i detta fall 120-140 GHz vilket ger en avståndsupplösning på 7.5 mm. De tillverkade SiGe BiCMOS Tx/Rx-chipen innehåller en åttafaldig multiplikatorkedja samt högeffekt/lågbrus-förstärkning, nedblandning och on-chip antenner.

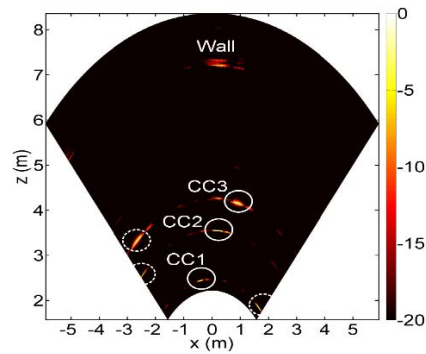
I jämförelse med en fullt bestyckad gruppantenn innebär den switchade MIMO-tekniken att ett mycket färre antal antennelement (och sändar-/mottagarkanaler) nyttjas vilket resulterar i en avsevärt billigare hårdvarurealisering (dock tar det en viss tid att samla in mätdata då t.ex. sändarelementen switchas av och på något som kan begränsa användningen till mera stillastående mätobjekt). I Figur 5-7a-b visas tre hörnreflektorer utplacerade på några meters avstånd i ett rum samt en motsvarande 2D radarbild där dessa mätobjekt avbildats med den i projektet framtagna 140 GHz (1D) MIMO-radarsensorn.



Figur 5-6: (a) 140 GHz 1D MIMO-radarsensor med 2 Tx chip och 6 Rx chip tillverkade i SiGe BiCMOS med on-chip antenner och (b) delar av fördelningsnätet för distribution av FMCW chirpsignal till sändare- och mottagarchipen som monterats i kaviteter för att minimera bondtrådarnas längd [25].



(a)



(b)

Figur 5-7: (a) Tre hörnreflektorer utplacerade på olika positioner i ett rum samt (b) motsvarande 2D radarbild där mätobjekten avbildats med hjälp av 140 GHz 1D MIMO-radarsensorn [25].

För vissa säkerhetstillämpningar (se-genom kläder, väskor etc) förutsätts avbildning i tre dimensioner. Den framtagna 140 GHz 1D MIMO-radarsensorn kan därför betraktas som ett första steg på vägen att kunna generera 3D bilder med en motsvarande 2D Rx/TX MIMO-baserad antensystemlösning vilket även behandlats inom projektet. De realiserade 140 GHz Rx/Tx-chipen är tillverkade i IHPs $0.13\ \mu\text{m}$ SiGe BiCMOS processteknologi (SG13S) vilket medför en hög integrationsgrad (potentiellt låg kostnad) för mm-vågs tillämpningar med krav på kompakta och kostnadseffektiva systemlösningar. IHP har tagit fram lågförlustiga MEMS-switchar i deras SiGe-processer vilket öppnar upp för MEMS-switchade mm-vågs transceiver-chip (dvs. med möjlighet att switcha mellan sändare- resp. mottagningsfunktion). I det framtagna 140 GHz 1D MIMO-radarsystemet används istället separata Tx- och Rx-chip som kan stängas av och på.

Utöver ovan nämnda säkerhetstillämpningar kan den studerade MIMO-tekniken även vara av potentiellt intresse för andra typer av (avbildande) mm-vågs radarsensorer med krav på en relativt hög upplösning så som t.ex. i antikollision-/landningsradarsystem för helikoptrar och UAV:er [26]. Honeywell och Universitet i Adelaide (Aust.) har undersökt möjligheter att realisera olika MIMO-baserade radarsystem för den typen av flygburna sensorplattformar vid 94 GHz och 24 GHz (valet av systemfrekvens inverkar på storleken på antennaperturen vilket kan vara dimensionerande i synnerhet för mindre plattformar).

5.3 Relevans för FoT

FOIs medverkan inom EU-projektet NANOTEC (2011-2015) har bl.a. resulterat i ökade kunskaper kring den senaste teknikutvecklingen inom radarområdet och speciellt m.a.p. kompakta (miniaturiserade) gruppantennlösningar för mikro- och mm-vågstillämpningar. FOI har även fått ökad kunskap om nya innovativa system-/delsystemlösningar för specifika sensortillämpningar (radar-/radiometersystem). Genom vårt aktiva deltagande i flera av projektets demonstratorverksamheter har vår värderingsförmåga stärkts gällande applicerbara teknikval på system- och delsystemnivå. Beträffande kravprofil och därav möjliga teknikköslösningar skiljer sig de inom projektet studerade sensortillämpningarna åt (t.ex. korthållsradar och långgräckviddiga radarsystem). Vår medverkan i projektet har även inneburit ett utökat internationellt kontaktnät vilket kan komma att resultera i nya framtida samarbeten ihop med deltagande parter i projektet.

Exempel på några potentiella användningsområden för de i projektet framtagna teknikdemonstratorerna (baserat på bl.a. GaN, SiGe och RF-MEMS) sammanfattas enl. nedan.

- Fäststyrda robusta gruppantennor (hög effekttålighet) för luftmålsspaning respektive bredbandiga telekrigssystem inom bandet 1-20 GHz.
- Miniaturiserade och kostnadseffektiva gruppantennor baserat på MIMO-arkitekturer för landnings- och antikollisionsradar på UAV och helikopter.
- Aktiva och passiva mm-vågssensorer (radar/radiometer) för se-genom-kläder etc (detektion av dolda vapen och sprängämnen vid check-points).
-

5.4 Projektdeltagare från FOI

Robert Malmqvist (PoC)
Carl Samuelsson
Andreas Gustafsson
Tomas Boman
Stig Leijon
Rolf Johnsson

6 Projekt AIRBEAM

6.1 Inledning

AIRBEAM är ett Eu-FP7-projekt som startade 2012-01-01 och pågår fram till 2015-12-31. FOI deltar i fem olika arbetspaket i projektet varav vi leder två av dem, *radar sensors* (där Gruppantennbaserade radarsystem samfinansierar FOIs deltagande) och *platform and sensor management*. Projektets mål är att kombinera (i teorin och i viss mån i praktiken) visuella, IR och radarsensorer 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 allvarligare industriutsläpp ingår i projektet.

FOI har varit inblandade främst inom området radarsensorer, dels genom värdering av nyttan med flygande sensorer som CARABAS/LORA-systemet och dels inom miniatyriseringsmetodik för framtida flygburna radarsensorer. FOI har även deltagit i framtagningen av relevanta scenarier (ex. detektering av omkullfallna träd vid snöstormar) och "path planning" av UAV:er. En studie av lämpliga hyperspektrala sensorer för UAV:er har också bidragits med. En översikt av FOIs verksamhet inom AIRBEAM ges i Tabell 6-1.

Övrig verksamhet inom AIRBEAM FOI inte deltagit i inkluderar optiska sensorer, kommunikationsfrågor och datafusion.

Tabell 6-1: Översikt av FOI verksamhet inom AIRBEAM.

Arbetspaket	Verksamhet
WP 1.1 - Scenarios	Framtagningen av relevanta scenarier
WP2.2 - Radar	Värdering och miniatyrisering
WP2.3 – Hyperspectral sensors	Studier av lämpliga hyperspektrala sensorer
WP4.3 – Path planning	Path planning av UAV:er
WP5.2.5 – Simulation exercise	Demonstration av mervärde via kombinerad av luftburna och satellitbaserade radarsensorer

Som slutmål för projektet har två teknikdemonstrationer ägt rum för att visa nyttan med flygburna sensorer (visuella och IR-kameror). Avsnitt 6.2 sammanfattar intryck från teknikdemonstration #2 som hölls den 8 oktober 2015 i närheten av Beja Air Base i östra Portugal.

Avsnittet 6.3 och 6.4 nedan presenterar verksamheten inom AIRBEAM som berör radar och gruppantennbaserat område och diskuterar projektets nytta för FoT-verksamheten.

6.2 Teknikdemonstration i Portugal oktober 2015

Den 8 oktober hölls en teknikdemonstration inom AIRBEAM där fyra olika luftburna plattformar (aerostat UAV (Patroller, 250 kg payload) [27], liten UAV eBee [28] samt en oktokopter (Altura AT-8)) påvisade nyttan med luftburna sensorer. Plattformarna var bestyckade med visuella och IR-kameror.

Demonstrationen ägde rum i närområdet kring Beja Air Base i östra Portugal med följande scenario: En flygburen guldtransport tvingas nödlanda på Beja Air Base pga. problem med flygplanet. Guldets lastas om till vidare marktransport och GNR (Guarda Nacional Republicana) i Portugal kontaktas för att säkra transporten. Under transporten uppkommer

en brand i omgivningen och även förekomst av kriminella element. Uppgiften för sensorerna är att dels följa transporten, men även upptäcka incidenterna längs vägen för att guldlasten ska kunna färdas säkert mot banken

De luftburna sensorerna ger en lägesbild som samlas i ett informationscenter. Efter en viss bearbetning av informationen översänds den till GNR för att ge dem en god bild av området vid och kring transportkonvojen.

Under demonstrationen levererades kontinuerligt visuella och IR-bilder från UAV:n Patroller och aerostaten till informationscentret. På storbildsskärmar (c:a 8 st) presenterades livebilder från sensorerna. Från centret manövrerades kamerorna i vinkel och zoomningsgrad.

Branden upptäcktes, både visuellt och med IR. Dessutom kunde en inkräktare (intruder) följas från luften för att senare gripas.



Figur 6-1: UAV av typen Patroller, utvecklad av AIRBEAM partner Sagem. Observera klotet som hänger under flygplanskroppen, vilken innehåller visuella och IR-kamerorna.

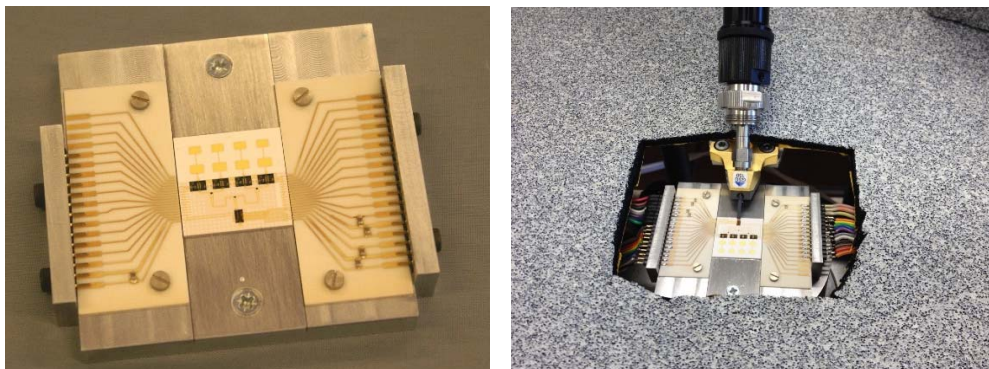


Figur 6-2: Exempel på informationsunderlag från UAV Patroller.

6.3 Verksamhet relevant för FoT-projekt Multifunktionella Gruppantenner

Arbetspaketet "*radar sensors*" är det WP som anknyter mest mot projekt Multifunktionella Gruppantenner och hade som mål att dels identifiera och specificera

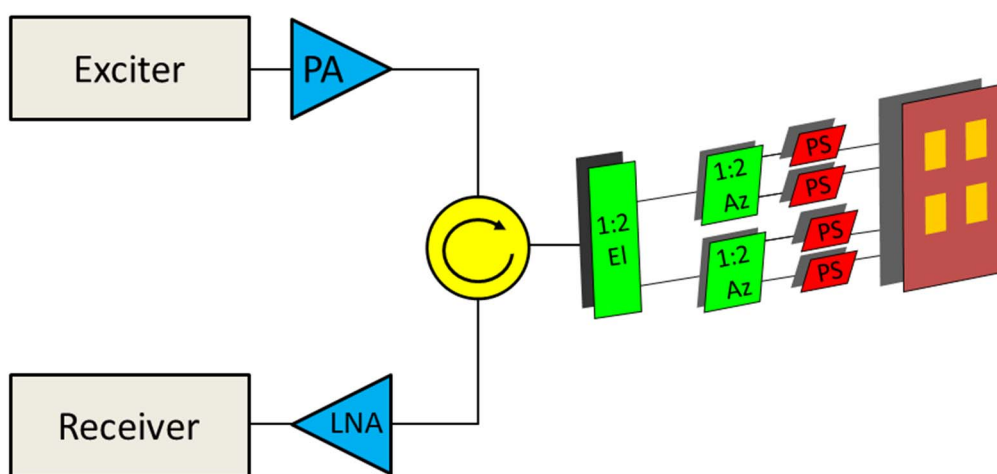
radarsensorer för AIRBEAMs behov och dels utveckla simuleringsmodeller för radarsensorer. Även en hårdvarudemonstrator, i form av en fyra elements PESA-modul integrerat i ett LTCC-substrat (Low Temperature Cofire Ceramic) inklusive antennelement, fasskiftare, kombineringsnät och LNA, togs fram och verifierades, se Figur 6-3.



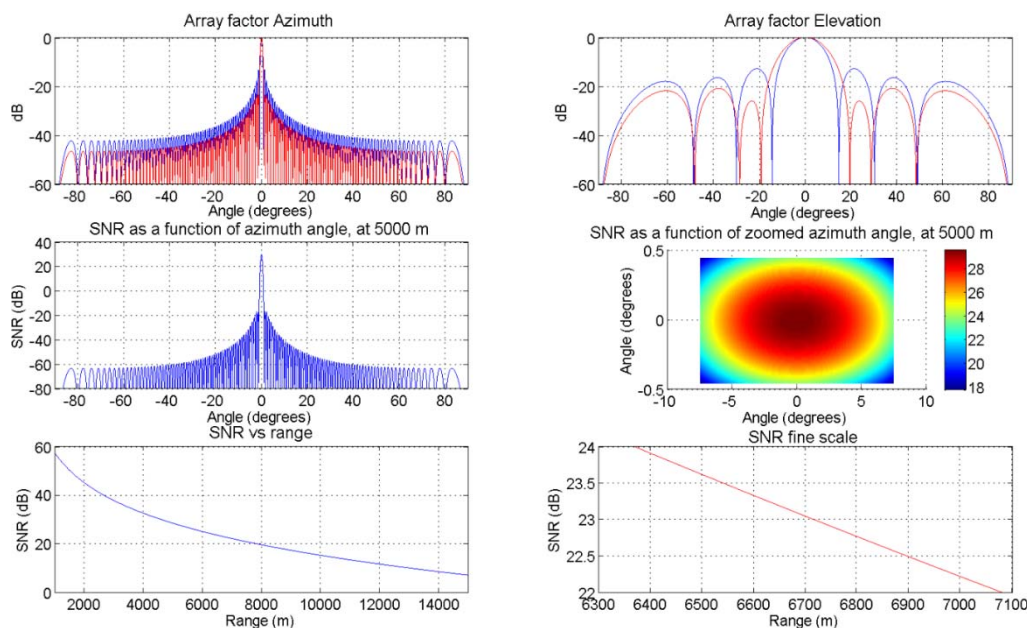
Figur 6-3: PESA modul inkluderande antenn, fasskiftare, kombineringsnät och lågbrusförstärkare.

Totalt innehöll arbetspaketet fyra rapporter, där FOI var inblandade i alla och som utgjorde leveranser i projektet [29]-[32]. Den första rapporten identifierade och specificerade alternativ för radarsensorer till AIRBEAM. FOI beskrev SAR- (Syntetisk AperturRadar) systemen CARABAS/LORA som är utvecklade på FOI. Vidare skrevs ett avsnitt om miniatyriserade radarkoncept via konforma antenntlösningar, förenklade radararkitekturer, multistatiska arrayer, 3D-SAR. Rapporten berörde även den senaste utvecklingen inom MEMS-baserade fasskiftare.

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. Figur 6-4 presenterar den studerade radararkitekturmodellen vi utgått från vid radarprestandasimuleringarna i Matlab. I Figur 6-5 presenteras simulerad gruppfaktor för den antagna 2-dimensionella gruppantennen (128 x 8 element) tillsammans med SNR (Signal-to-Noise-Ratio) för olika målavstånd.



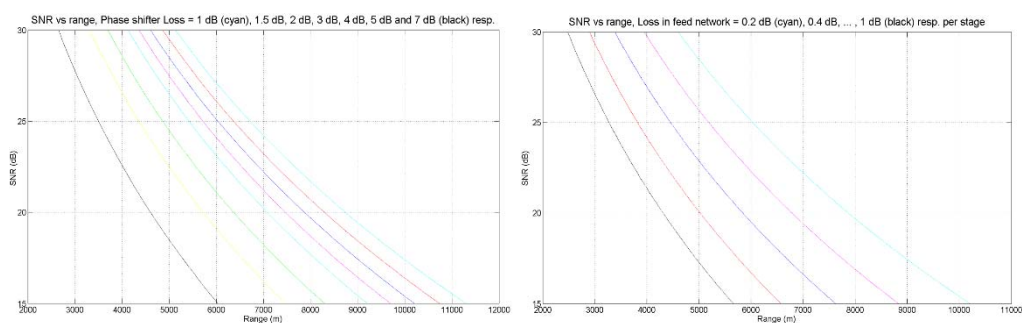
Figur 6-4: Modellen för en två-dimensionell radararkitektur som studeras inom AIRBEAM.



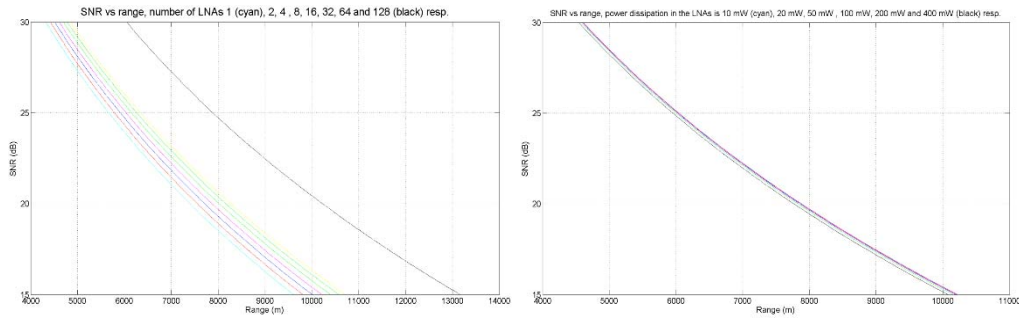
Figur 6-5: Simulerad gruppfaktor för den antagna 2-dimensionella gruppantennen (128 x 8 element) och SNR (Signal-to-Noise-Ratio) för olika målvstånd.

I Figur 6-6 visas simulering av antennens SNR som funktion av upptäcktsavstånd vid varierande fasskiftarförluster (1dB, 1.5dB, 2dB, 3dB, 4dB, 5dB resp. 7 dB). Figur 6-6 visar även SNR som funktion av upptäcktsavstånd vid varierande förluster per kombineringssteg i effektdelarna/kombinerarna (0.2dB, 0.4dB, 0.6dB, 0.8dB resp. 1dB), markerade med grönt i Figur 6-4.

Vidare ges i Figur 6-7 SNR som funktion av upptäcktsavstånd vid varierande subarraystorlekar (vilket ger antalet förstärkare (LNA) i radarkedjan). Subarraystorlek 128 innebär 1 LNA, storleken 64, 2 LNA:er osv. till subarraystorlek 1, dvs 128 st förstärkare. Figur 6-7 presenterar även SNR som funktion av upptäcktsavstånd vid varierande effektförbrukning för förstärkarna (10mW, 20mW, 50mW, 100mW, 200mW resp. 400mW per st) i fallet med 8 st förstärkare (subarraystorlek på 16 antenner per st).

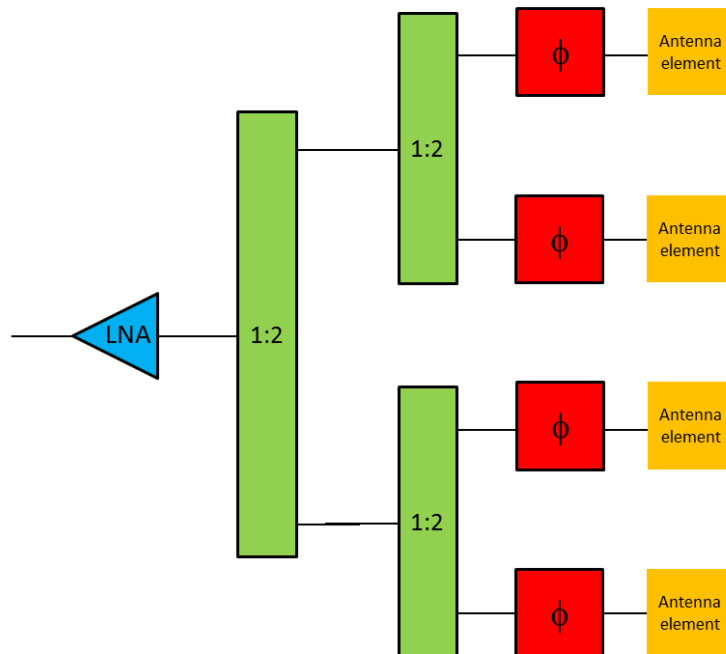


Figur 6-6: Vänster: SNR som funktion av upptäcktsavstånd vid varierande fasskiftarförluster (1dB, 1.5dB, 2dB, 3dB, 4dB, 5dB resp. 7 dB). Höger: SNR som funktion av upptäcktsavstånd vid varierande förluster per steg i effektdelarna/kombinerarna (0.2dB, 0.4dB, 0.6dB, 0.8dB resp. 1dB).



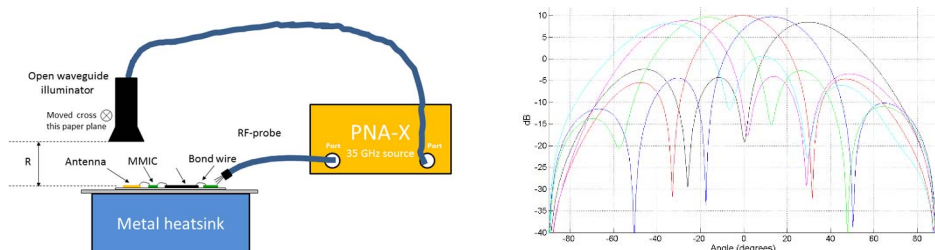
Figur 6-7: Vänster: SNR som funktion av upptäcktsavstånd vid varierande subarraystorlekar (vilket ger antalet förstärkare (LNA) i radarkedjan). Subarraystorlek 128 (1 LNA), 64 (2 LNA:er) osv. till subarraystorlek 1, dvs 128 st förstärkare. Höger: SNR som funktion av upptäcktsavstånd vid varierande effektförbrukning för förstärkarna (10mW, 20mW, 50mW, 100mW, 200mW resp. 400mW per st) i fallet med 8 st förstärkare (subarraystorlek på 16 antenner per st).

Den tredje rapporten inom arbetspaketet hade hårdvarusidan i fokus och hade som huvudfokus att realisera och validera en PESA-modul (1 kanal med en subarraystorlek om 4 element), integrerad i LTCC, se Figur 6-3.



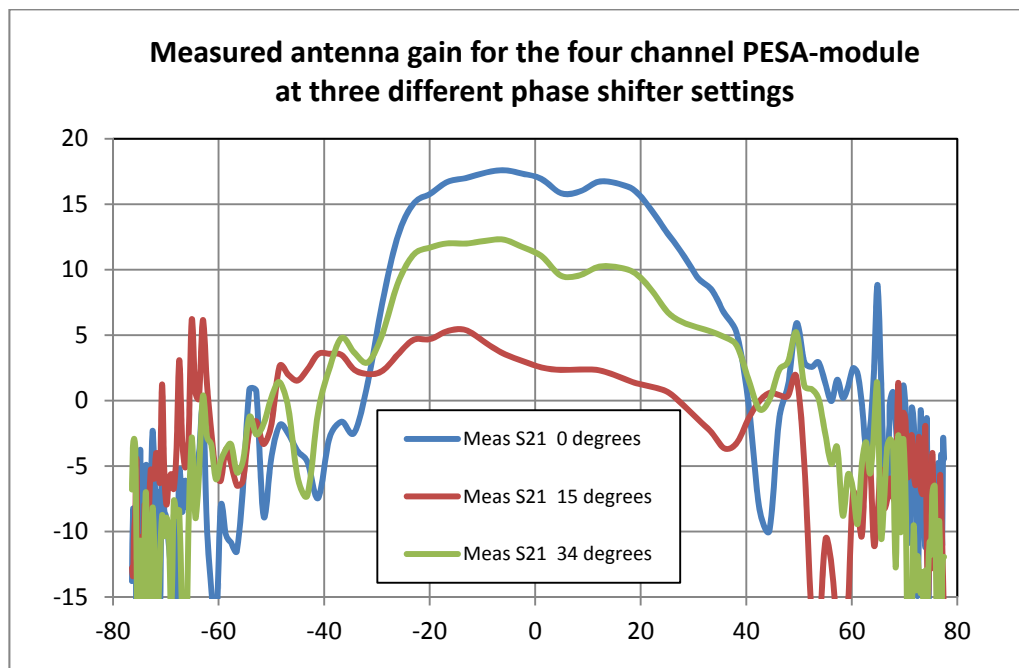
Figur 6-8: Schematisk modell av den realiserade PESA-modulen.

En schematisk modell av modulen visas i Figur 6-8. I Figur 6-9 presenteras mätupställningen respektive simulerat antenndiagram vid olika utstyrning av loben (elektrisk utstyrning).



Figur 6-9: Mätupställning för mätning av antenndiagram och elektrisk utstyrning av loben (vänster) respektive simulerat antenndiagram (höger).

Figur 6-10 presenterar mätresultaten för utstyringsvinklarna 0, 15 resp. 34 grader. På grund av att flera av fasskiftarna inte fungerade tillfredsställande blev mätresultaten inte goda och någon elektrisk utstyrning kunde inte påvisas. Fortsatt utveckling för de OMMIC-tillverkade MEMS-switcharna krävs för att de framöver ska kunna ingå som komponent i radarsystem.



Figur 6-10: Uppmätt antenndiagram vid utstyringsvinklarna 0, 15 resp. 34 grader.

Det fjärde och avslutande rapporten inom arbetspaketet belyser mogna radarsensorer relevanta för AIRBEAM-scenarier med dess prestanda och operativ metodik. I FOIs huvudkapitel beskrivs hur CARABAS/LORA systemet kan användas för att kunna detektera trädffällning efter exempelvis svåra stormar. Den kommande forskningssatelliten BIOMASS nämns som sensorbärare och dess nytta vid samma typ av scenario berörs.

6.4 Relevans för FoT

Projektet har inneburit att FOI har kunnat vidareutveckla tidigare kunskap inom radarområdet, både på systemsidan och komponentområdet genom dels studien av inverkan av parametrar som subarraystorlekar och fasskiftarförluster, och dels via realiseringen av PESA-modulen. En inblick om befintliga system i omvärlden och hos projektpartnererna har vi också fått via diskussioner och rapportskrivande. Utöver detta har vi deltagit i flera av projektets anordnade workshops, vilket givit ett stort utbyte för flertalet FOI-anställda.

Projekt AIRBEAM har kopplat väl till befintlig verksamhet inom området på FOI och bidragit väsentligt till vår kunskapsuppbyggnad inom radarområdet, exempelvis via simuleringsstudien beskriven i föregående kapitel.

Teknikdemonstrationen i Portugal gav FOI en tydlig inblick i den operativa nyttan med luftburna sensorer, vilket ger oss en bra förståelse för hur systemnivån är. Detta är en förutsättning för att kunna bedriva relevant forskning och utveckling på lägre systemnivåer.

6.5 Projektdeltagare från FOI

Andreas Gustafsson (PoC)
Robert Malmqvist
Stig Leijon
Anders Gustavsson
Lars Ulander
Per-Olov Frölind
Lars Falk
Peter Rindstål
Patrik Thorén
Linnéa Axelsson
David Bergström
Jonas Allvar
Karl-Göran Stenborg
Anna Linderhed
Ola Friman
Agnes Rensfelt
Kristoffer Hultgren
Anna Önehag
Viktor Deleskog
Fredrik Bissmarck
Petter Ögren
Helene Hultgren

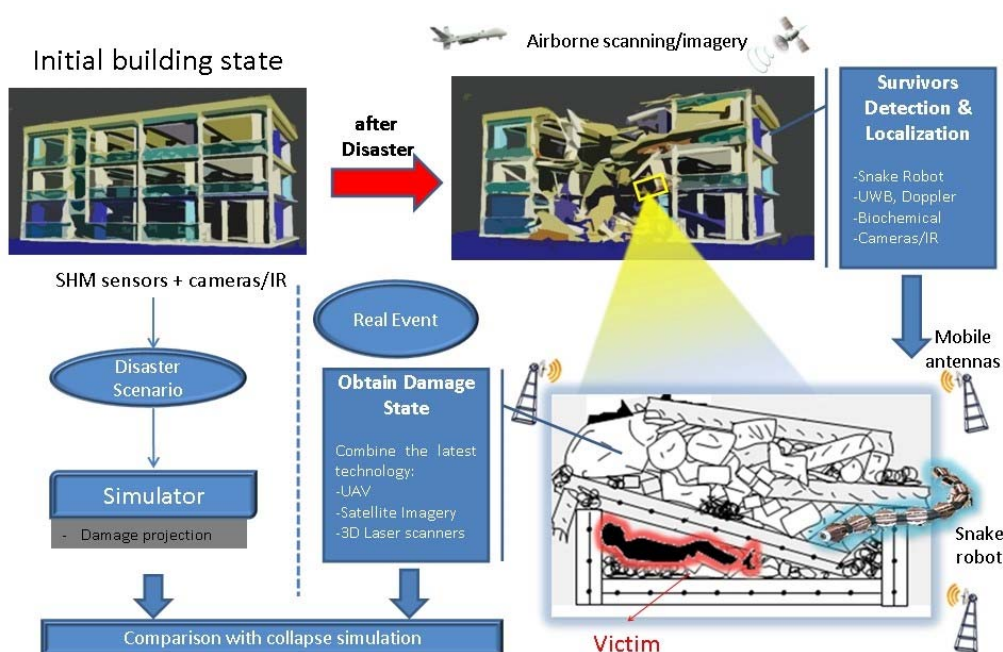
7 Projekt INACHUS

7.1 Inledning

INACHUS är det nyaste projektet som beskrivs i den här rapporten och är ett Eu-FP7-projekt som startade 2015-01-01 och planeras pågå fram till 2018-12-31. Projektet koordineras av ICCS, Gr och totalt deltar 20 partners (inklusive end-users) från 10 länder. Från Sverige deltar, förutom FOI, även Cinside och Södertörns brandförsvär (end-user).

Projektets syfte är att ta fram teknik och metodik för att kunna detektera och lokalisera levande människor begravnade i rasmassor. Kärnan i projektet är att utveckla en ormliknande robot, bestyckad med sensorer för att detektera människor i rasmassor (radar, elektronisk näsa, högtalare, mikrofon, IR- och visuella kameror). Ormen ska kunna ta sig in i håligheter större än 20 cm och kunna förflytta sig inåt i rasmassan.

Den huvudsakliga tillämpningen för projektet är tekniskt stöd till Search-And-Rescue (SAR) personal vid räddningsaktioner efter jordbävningar. Figur 7-1 ger en illustration av INACHUS-konceptet.



Figur 7-1: Illustration av INACHUS-konceptet.

FOI deltar i sex olika tekniska arbetspaket varav den huvudsakliga verksamheten sker inom två arbetspaket; WP5 - Victim localisation solutions som FOI leder där sensorer utvecklas (FOI studerar radarsensorer och seismiska sensorer) och WP4 - Wide area surveillance tools där 3D-laserskanningsmetodik studeras. FOI är dessutom inblandade i både framtagning av relevanta scenarier och inom området integration/validering av utvecklad teknik.

7.2 Verksamhet för FoT-projekt Gruppantennbaserade Radarsystem

Under projektets första år har fokus varit på behovs- och scenariodefinition. Under två workshops har tekniska presentationer presenterats för och diskuterats med end-users för att identifiera och analysera behovsbilden för att i förlängningen skapa relevanta tekniska lösningar på SAR-styrkornas behov.

Inledande arbete under arbetspaket WP5 – Victim localisation solutions, har dock kommit igång med dels verifiering av en ny version av den tidigare utvecklade HumanFinder-antennen för ytsökande radarfunktion och dels design av en antennlösning för radarn som ska implementeras i ormen (se avsnitt 7.1).

Projektet presenterades nyligen i form av en poster på konferensen TAMSEC 2015 [33].

7.3 Relevans för FoT

Den inblick FOI får av situationen för slutanvändarna är oerhört värdefull för att vi ska kunna rikta in oss på de mest relevanta tekniska lösningarna. Dialogen med slutanvändarna innebär att vi får en korrekt bild över arbetet i fält och behovet av ny teknik. FOI får en unik chans att få hands-on av behovet i verkligheten, vilket även ger nytta inom FoT-verksamheten, där i förlängningen FOI-utvecklad teknik, metodik och koncept ska komma till nytta.

Vidare stöds två kärnkompetenser inom FoT-projektet GUARD genom INACHUS via den antenn och radarsystemdesign som ingår, som i sin tur stärker vår expertroll inom gruppantennbaserad radar.

7.4 Projektdeltagare från FOI

Gustav Tolt (PoC)
Andreas Gustafsson
Tomas Boman
Fredrik Bissmarck
Håkan Larsson
Christina Grönvall
Hans Habberstad
Jonas Nygårds

8 Ekonomisk översikt

Ekonomiskt sett har samverkansprojekten bidragit med ett substantiellt tillskott till de ekonomiska förutsättningarna inom radarområdet. Summeras bidraget från de sex projekten presenterade i den här rapporten fås följande. Observera att eftersom det ingår en varierande växlingskurs i beräkningarna är inte siffrorna helt exakta i kr.

- Den totala omsättningen av projekten uppgår till 472 306 kkr
- FOIs andel i de här projekten är 31 705 kkr
- Varav FOIs insats inom radarområdet uppgår till 20 547 kkr
- FoT-projekten har medfinansierat med en sammanlagd summa om 11 621 kkr
- Kvoten för den totala projektomsättningen och medfinansieringen uppgår till 40

Tabell 8-1 ger en mer detaljerad översikt och presenterar en ekonomisk översikt för respektive projekt.

Tabell 8-1: Ekonomisk sammanställning av medfinansierade projekt presenterade i den här rapporten. Till största delen är projektens budgetar angivna i EUR med en växlingskurs som varierar i tid. Växlingskursen för omräkningen i tabellen till SEK är antagen till 1 EUR = 9 SEK.

Projekt	Omsättning (kkr)	FOIs omsättning (kkr)	FOIs insats på radarområdet (kkr)	Medfinansiering (kkr)
MEMS-4-MMIC	34 212	6 570	6 570	1 600
SPREWS	75 870	3 600	1 800	3 600
Human Finder	10 000	2 747	2 747	1 374
NANOTEC	87 226	4 597	4 597	1 240
AIRBEAM	139 500	5 749	2 133	1 608
INACHUS	125 498	8 442	2 700	2 199
Summa	472 306	31 705	20 547	11 621

9 Slutsatser

Samverkan med externa projekt inom ramen för projekt Gruppantennbaserade Radar-system och föregående projekt (Multifunktionella gruppantennor och Mikrovågssensorer för 3D-markspaning) är omfattande.

Många FOI:ter har fått möjlighet att arbeta i samverkansprojekten, vilket givit en stor spridning av uppnådda projektresultat, men även bidragit till nätverksbyggande inom FOI.

FOI har deltagit i projekten på flera olika systemnivåer och därmed både varit verksamma på applikationsnivå (ex. via specificering av kommunikationssystem för bilapplikationer och deltagande i en teknikdemonstration av sensorer på flygande plattformar) och på en subsystemnivå (ex. design av radarmottagarmodul med förenklad arkitektur och utveckling av nya kretskoncept för radiometersystem mot säkerhetstillämpningar).

Via samverkansprojekten har våra nätverk utökats och vi har fått inblick i state-of-the-art inom områden som kretsteknologier, signalbehandlingsmetodik och antennutveckling, men även kunskap om dagens och morgondagens systemlösningar, inte minst insikt kring faktiska möjligheter och begränsningar. Samverkansprojekten har även innefattat kontakter med europeiska leverantörer (OMMIC och UMS) av kritiska teknologier.

FOI har ökat förståelsen inom den operativa nyttan inom radarområdet, vilket är en förutsättning för att kunna bedriva relevant forskning och utveckling på lägre systemnivåer.

Ett deltagande i ett projekt har i några fall även lett till ett nytt projekt via de kontaktnät som byggs upp via samverkan. Exempel på detta är NANOTEC, ACACIA och INACHUS-projekten.

Ekonomiskt sett har samverkansprojekten bidragit med ett substantiellt tillskott till de ekonomiska förutsättningarna inom radarområdet. Den totala omsättningen av de medfinansierade projekten uppgår till dryga 472 Mkr, varav uppskattningsvis dryga 20 Mkr tillfallit FOI inom radarområdet.

10 Publikationer

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 pp. 28, Stockholm, Sweden, Nov. 13-14 2013.

G. Tolt, A. Gustafsson, D. Axelsson, et. al., "The EU FP7 project INACHUS," Proceedings of the TAMSEC Conference pp. 37, Stockholm, Sweden, Nov. 24-25 2015.

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

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

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

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

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

Rantakari P., R. Malmqvist, C. Samuelsson, R. Leblanc, D. Smith, R. Jonsson, W. Simon, J. Saijets, R. Baggen, and T. Vähä-Heikkilä, "Wide-Band Radio Frequency Micro Electro-Mechanical Systems Switches and Switching Networks using a Gallium Arsenide Monolithic Microwave-Integrated Circuits Foundry Process Technology," IET Microwaves, Antennas & Prop., Vol. 5, no. 8, 2011, pp. 948-955.

Malmqvist R., C. Samuelsson, A. Gustafsson, D. Smith, T. Vähä-Heikkilä, and R. Baggen, "Reconfigurable RF-MEMS Circuits and Low Noise Amplifiers Fabricated using a GaAs MMIC Foundry Process Technology," MEMSWAVE2011, Athens, Greece, June 2011.

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

Malmqvist R., C. Samuelsson, A. Gustafsson, D. Smith, T. Vähä-Heikkilä, and R. Baggen, "Monolithic Integration of Millimeter-Wave RF-MEMS Switch Circuits and LNAs using a GaAs MMIC foundry process technology," IEEE Int. Microwave Series (IMWS) on Millimeter Wave Integration Techn., 15-16 Sept. 2011, Sitges, Spain, pp. 148-151.

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

Malmqvist R., C. Samuelsson, W. Simon, D. Smith, P. Rantakari, T. VähäHeikkilä, S. Reyaz, J. Varis, and R. Baggen, "*Reconfigurable Wideband LNAs using Ohmic Contact and Capacitive RF-MEMS Switching Circuits*," European Microwave Integrated Circuits Conf. (EuMIC), 10-11 Oct. 2011, Manchester, UK, pp. 160-163.

Jonsson R., C. Samuelsson, S. Reyaz, R. Malmqvist, D. Smith, M. Richard, P. Rantakari, T. Vähä-Heikkilä, and R. Baggen, "*An Experimental Study of Standard Packaged/Unpackaged GaAs MMIC based RF-MEMS Limiter Test Circuits*," Int. Semiconductor Conf. (CAS), 17-19 Oct. 2011, Sinaia, Romania, pp. 203-206. (Best Paper Award – announced at CAS2012, 16 Oct. 2012).

Malmqvist R., C. Samuelsson, A. Gustafsson, P. Rantakari, S. Reyaz, T. VähäHeikkilä, A. Rydberg, J. Varis, D. Smith, and R. Baggen, "*A K-Band RF-MEMSEnabled Reconfigurable and Multifunctional Low-Noise Amplifier Hybrid Circuit*," Active and Passive Electronic Components, Vol. 2011, Article ID 284767, 7 pages (Dec. 2011).

Malmqvist R., C. Samuelsson, A. Gustafsson, D. Smith, H. Maher, T. VähäHeikkilä, and R. Baggen, "*RF-MEMS based GaAs MMICs – System Integration, Applications and Test Results*," GigaHertz Symposium (GHz2012), 6-7 March 2012, Stockholm, Sweden.

Malmqvist R., C. Samuelsson, A. Gustafsson, H. Maher, T. Vähä-Heikkilä, and R. Baggen, "*A K-Band Single-Chip Reconfigurable/Multi-Functional RF-MEMS Switched Dual-LNA MMIC*," IEEE Int. Microwave Symp. (IMS), 17-22 June 2012, Montreal, Canada, pp. 1-3.

Baggen L., W. Simon, T. Vähä-Heikkilä, R. Malmqvist, H. Maher, S. Seok, "*MEMS-4-MMIC The Next Step in Combined GaAs MEMS-MMIC Technology*," 15th Int. Symp. On Antenna Technology and Applied Electromagnetics (ANTEM), 25-28 June 2012, Toulouse, France, pp. 1-5.

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.

Nezirovic A., R. Malmqvist, T. Boman, A. Gustafsson, and M. Karlsson, "*Performance Assessment of RF-MEMS-based Passive ESA for FullyPolarimetric Ka-Band SAR*," European Radar Conf. (EuRAD), 1-2 Nov. 2012, Amsterdam, The Netherlands.

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.

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.

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.

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.

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.

- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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).
- R. Jonsson, "*Design and Results of W-Band Power Detectors in a 130 nmSiGe BiCMOS Process Technology*," Proceedings of the EuMIC Conference 2014, pp. 289289-292292, Rome, Italy, Oct. 6-7 2014.

11 Referenser

- [1] 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, Nov. 2012, pp. 126-129.
- [2] 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.
- [3] TriQuint Semiconductor, *35 GHz 5-Bit Phase Shifter*, aug. 2008, TGP2102. [Online]. Available: www.triquint.com
- [4] K. Van Caekenberghe, T. Vaha-Heikkilä, G. Rebeiz, and K. Sarabandi, "Ka-band MEMS TTD passive electronically scanned array (ESA)," in IEEE Antennas and Propagation Society Int. Symp., July 2006, pp. 513-516.
- [5] J. Maciel, J. Slocum, J. Smith, and J. Turtle, "MEMS electronically steerable antennas for fire control radars," IEEE Radar Conf., April 2007, pp. 677-682.
- [6] A. Ziaei, "Implementation of Capacitive RF MEMS Switches into a Monolithic GaN on SiC Microwave Technology," Workshop Proceedings (RF-MEMS RFIC/MMIC Technologies for Highly Adaptive and Reliable RF Systems – Results of the FP7 NANOTEC Project), EuMW 2013, Nuremberg, Germany, Oct. 2013.
- [7] <http://www.tronicsgroup.com/Airbus-Group-and-Tronics-partner-on-RF-MEMS-switches>
- [8] P. Rantakari, R. Malmqvist, C. Samuelsson, R. Leblanc, D. Smith, R. Jonsson, W. Simon, J. Saijets, R. Baggen, and T. Vähä-Heikkilä, "Wide-Band Radio Frequency Micro Electro-Mechanical Systems Switches and Switching Networks using a Gallium Arsenide Monolithic Microwave-Integrated," IET Microwaves, Antennas & Prop., Vol. 5, no. 8, 2011, pp. 948-955.
- [9] J. Hacker, R. Mihailovich, M. Kim, and J. DeNatale, "A Ka-band 3-bit RF MEMS true-time-delay network," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 51, no. 1, Jan. 2003, pp. 305-308.
- [10] R. Malmqvist et al., "An RF-MEMS based SP4T switched LNA MMIC used in a 24 GHz Beam-Steering Antenna Module," Proc. of the 10th European Microwave Integrated Circuits Conference, Sept. 2015, pp. 329-332.
- [11] R. Malmqvist et al., "A K-Band Single-Chip Reconfigurable/Multi-Functional RF-MEMS Switched Dual-LNA MMIC," Proc. of the Int. Microwave Symposium IMS 2012, Montreal, Canada, June 2012. (FOI-S--4257--SE).
- [12] www.wispry.com
- [13] www.delfmems.com
- [14] S. Björklund, A. Nelander, m.fl. "Summary report SPI", SPREWS deliverable D1010, 2012, FOI-SH--0087--SE.
- [15] L. G. Huss, A. Gustafsson, "Gruppantenn för personsökning i rasmassor", FOI Memo 3607.
- [16] 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 pp. 28, Stockholm, Sweden, Nov. 13-14 2013.

- [17] D. Dancila, "Monolithically Integrated RF-MEMS Actuated Patch-Slot Element for X-Band Reconfigurable Reflectarrays," Workshop Proceedings (RF-MEMS RFIC/MMIC Technologies for Highly Adaptive and Reliable RF Systems – Results of the FP7 NANOTEC Project), EuMW 2013, Nuremberg, Germany, Oct. 2013.
- [18] <http://aviationweek.com/technology/innovation-laureate-raytheon-and-saab-gan-galvanizers>
- [19] R. Malmqvist et al., "Characterisation of Low-Noise and High-Linearity GaN HEMTs Fabricated Using a CPW based MMIC Process," Subm. to GHz 2016.
- [20] <http://www.alfaimaging.com>
- [21] J.J. Lynch et al., "Passive Millimeter-Wave Imaging Module With Preamplified Zero-Bias Detection," IEEE MTT Trans., Vol. 56, no. 7, July 2008., pp. 1592-1600.
- [22] S. Reyaz et al., "A W-Band RF-MEMS Switched LNA in a 70 nm mHEMT Process," Int. J. of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, Vol. 25, No. 7, Sept. 2015, pp. 639-646.
- [23] S. Reyaz et al., "Reconfigurable and Wideband Receiver Components for System-on-Chip Millimetre-Wave Radiometer Front-ends," PhD Thesis, Uppsala University, Feb. 2015 (ISSN 1651-6214, ISBN 978-91-554-9145-1).
- [24] A. Strodl et al., "RF-MEMS Switched W-Band MM-Wave Passive Imaging System in a 0.13 μm SiGe BiCMOS Technology," Proc. of MEMSWAVE 2015, Barcelona, Spain, July 2015.
- [25] T. Spreng et al., "Wideband 120GHz to 140GHz MIMO Radar: System Design and Imaging Results," Proc. of the 45th European Microwave Conference, Paris, France, Sept. 2015, pp. 430-433.
- [26] G. A. Rankin et al., "Radar Imaging: Conventional and MIMO," Proc. of the 4th Int. Conference on Communications and Electronics, Hue, Vietnam, Aug. 2012, pp. 171-176.
- [27] UAV Patroller. [Online]. Available: <http://www.sagem.com/aerospace/uav-systems/patroller-systems> [October 15, 2015]
- [28] UAV eBee. [Online]. Available: <http://uav.vgt.vito.be/content/ebec> [October 15, 2015]
- [29] A. Gustafsson, A. Gustavsson, R. Malmqvist, C. Savarino, E. Williams, L. Brooker, "Specification of radar sensors for AIRBEAM scenarios," deliverable D22.1 in EU FP7-project AIRBEAM, grant agreement no 261769.
- [30] A. Gustafsson, C. Savarino, Susana Uruñuela Hernández, "Radar sensor models for demonstration by simulation," deliverable D22.2 in EU FP7-project AIRBEAM, grant agreement no 261769.
- [31] A. Gustafsson, "Design and evaluation of a miniaturized Ka-band phased array antenna front-end," deliverable D22.3 in EU FP7-project AIRBEAM, grant agreement no 261769.
- [32] A. Gustavsson, L. Ulander, A. Gustafsson, C. Savarino, "Radar sensors for real demonstrations," deliverable D22.4 in EU FP7-project AIRBEAM, grant agreement no 261769.
- [33] G. Tolt, A. Gustafsson et. al., "The EU FP7 project INACHUS," Proceedings of the TAMSEC Conference pp. 37, Stockholm, Sweden, Nov. 24-25 2015.

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