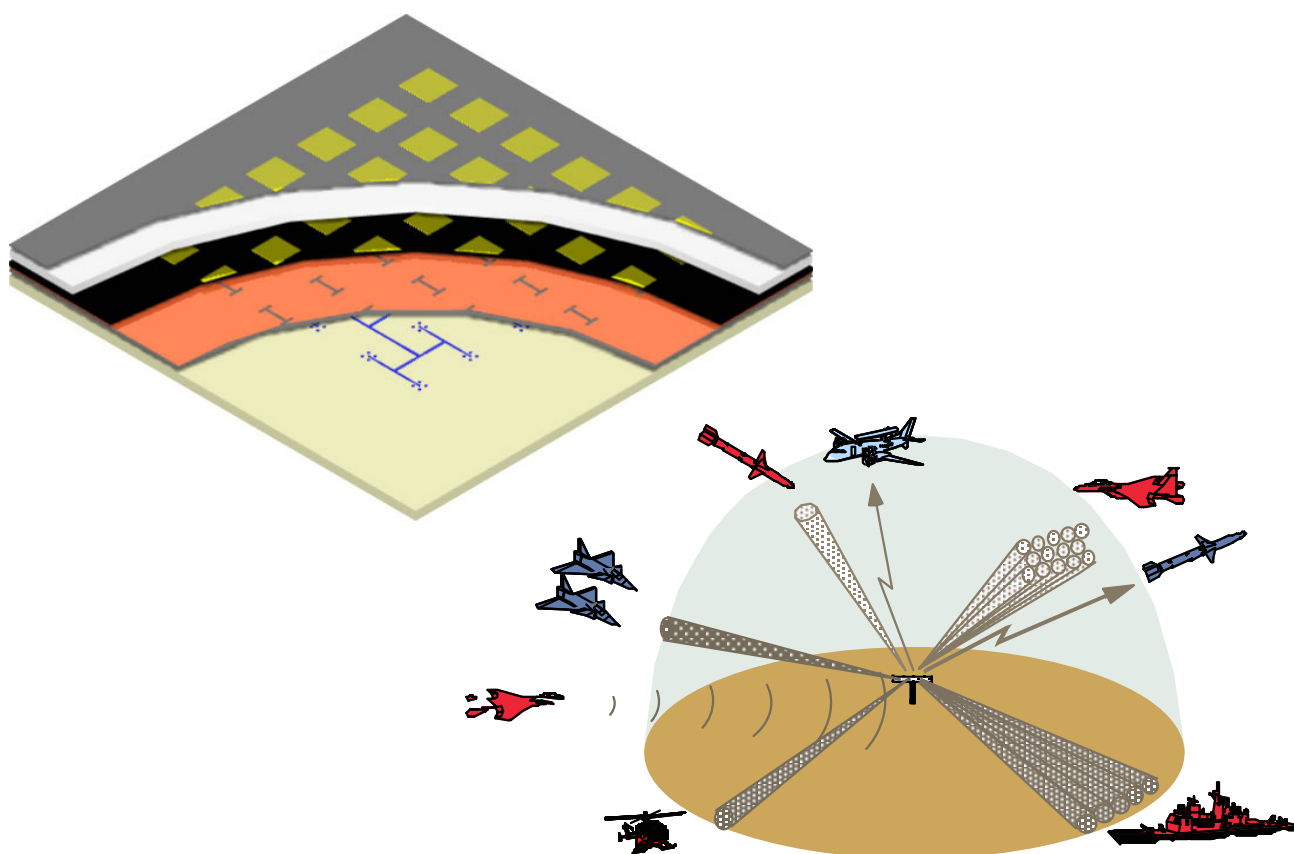


R. Erickson (red.)

Forskning inom framtida radarsystemteknik 2001-2003 Slutrapport projekt AMALIA



TOTALFÖRSVARETS FORSKNING SINSTITUT

Sensorteknik

Box 1165

581 11 Linköping

FOI-R--1043--SE

December 2003

ISSN 1650-1942

Användarrapport

B. Carlegrim, R. Erickson, P. Grahm, A. Gustafsson,
L.-G. Huss , A. Nelander, L. Pettersson, A. Pohl

Forskning inom framtida radarsystemteknik 2001-2003 Slutrapport projekt AMALIA

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Sensorteknik Box 1165 581 11 Linköping	Rapportnummer, ISRN FOI-R--1043--SE	Klassificering Användarrapport
	Forskningsområde 4. Spaning och ledning	
	Månad, år December 2003	Projektnummer E3041
	Verksamhetsgren 5. Uppdragsfinansierad verksamhet	
	Delområde 42 Spaningssensorer	
Författare/redaktör B. Carlegrim L.-G. Huss R. Erickson (red) A. Nelander P. Grahn L. Pettersson A. Gustafsson A. Pohl	Projektledare Roland Erickson	
	Godkänd av	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning FM	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig	
Rapportens titel Forskning inom radarsystemteknik 2001-2003 Slutrapport projekt AMALIA		
Sammanfattning (högst 200 ord) Rapporten sammanfattar verksamhet och resultat från ett treårigt forskningsprojekt, inriktat på radarsystemteknik i mikrovågsområdet. Forskningen har fokuserats mot att studera realiserbarhet och tillämpbarhet av mycket kompakta aktiva gruppantennor för radarapplikationer. Konceptet bygger på stark integration av antenn och bakomliggande elektronik i en tunn flerlagerstruktur, s.k. smart-skin. Tillämpningsområden inkluderar flerfunktionsradar på stridsflygplan, UAV och fartyg, fordonsburen radar, m fl. Projektets resultat visar på möjligheter att reducera volymen och komplexitet i antennens mottagarelektronik och byggsätt vilket pekar på att väsentliga kostnadsreduktioner för tekniken bör vara möjliga i framtiden. Slutsatserna bygger bl a på framtagandet och utvärderingen av en liten konceptdemonstrator som utvecklats inom projektet. Utvärderingen uppvisar god överensstämmelse med förväntade resultat. För att studera möjligheterna att utöka antenners täckningsområde och förbättra omvärldsuppfattningen har metoder att utforma antenner konformt dvs utmed en krökt yta studerats. Verksamheten har koncentrerats på att bygga upp analys- och syntesmetoder för att ge en grund för framtida studier av konforma antenner. Systemutformning och signalbehandling har studerats för att undersöka tillämpbarheten av tekniken. Verksamheten har studerat metoder och algoritmer för signalbehandling för radar- och multifunktionssystem med digitala gruppantennor. Verksamheten har också utvecklat olika systemkoncept och spelkort. Arbetet har bidragit till utformning av försvarets framtida sensor- och ledningssystem.		
Nyckelord antenn, gruppantenn, konform antenn, mottagare, radar, flerfunktionsradar		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 44 s.	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Sensor Technology P.O. Box 1165 SE-581 11 Linköping	Report number, ISRN FOI-R--1043--SE	Report type User report
	Programme Areas 4. C4ISR	
	Month year December 2003	Project no. E3041
	General Research Areas 5. Commissioned Research	
	Subcategories 42 Surveillance Sensors	
Author/s (editor/s) B. Carlegrim L.-G. Huss R. Erickson (red) A. Nelander P. Grahn L. Pettersson A. Gustafsson A. Pohl	Project manager Roland Erickson	
	Approved by	
	Sponsoring agency Swedish Armed Forces	
	Scientifically and technically responsible	
Report title (In translation) Research on radar system technology 2001-2003. Final report project AMALIA		
Abstract (not more than 200 words) This report summarizes activities and results of a three year research project directed towards techniques for microwave radar systems. The focus has been on implementation and application of very compact active array antennas for radar. The concept is based on a tight integration of the antenna elements and feed electronics in a tile structure – a so called Smart Skin with applications such as multipurpose radars for fighter airplanes, UAV, land vehicle radars, ships etc. The result shows that it is possible to reduce complexity and volume of the feed electronics as well as architecture of the array antenna, potentially making the technique more affordable in the future. These conclusions are based on the design and experimental evaluation of a small concept demonstrator. The evaluation shows excellent agreement with expected results. To investigate the possibilities to enhance the area of coverage, with the objective to improve the situation awareness, methods to design conformal antennas have been studied. Focus has been on developing methods for analysis and synthesis for future studies of conformal antennas. System design and signal processing have been studied in order to investigate applications of the technique. The research has focused on methods and algorithms for signal processing for radar and multifunction systems using digital beamforming array antennas. Various system concepts have also been developed.		
Keywords antenna, phased array, conformal antenna, receiver, radar, multi function radar		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 44 p.	
	Price acc. to pricelist	

Innehållsförteckning

1	Inledning.....	7
2	Försvarsnytta och kunskapsspridning	9
2.1	Nytta för försvaret	9
2.2	Samverkan med försvaret, försvarsindustri och universitet	10
2.3	Internationellt samarbete	11
3	Gruppantenn - en översikt	14
3.1	Gruppantenn, allmänt	14
3.2	Analog lobformning	14
3.3	Digital lobformning.....	15
3.4	Byggsätt.....	16
3.5	Multifunktionssystem.....	17
4	Forskningsresultat	18
4.1	En gruppantennedemonstrator i multilagerteknik - design och utvärdering.....	18
4.1.1	Antennapertur.....	20
4.1.2	Mottagare	23
4.1.3	Utvärdering av demonstratorantennen	26
4.2	Konforma antenner.....	30
4.2.1	Konforma antenner, allmänt.....	30
4.2.2	Elektromagnetisk analys	31
4.2.3	Antennendiagramsyntes	32
4.3	Systemteknik	33
4.4	Signalbehandling och polarimetri	36
5	Sammanfattning	39
6	Slutord	40
7	Leveranser och publikationer	41
8	Referenser.....	43

1 Inledning

Denna rapport sammanfattar verksamhet och resultat från ett treårigt forskningsprojekt, inriktat på radarsystemteknik i mikrovågsområdet. Forskningen har rört kompakta, högintegrerade och aktiva elektriskt styrda gruppantennor (AESA) för radartillämpningar. Tillämpningsområden inkluderar flerfunktionsradar i stridsflygplan, flerfunktionssystem på UAV och fartyg, fordonsburen radar, och andra radarsystemtillämpningar för spaning, följning och vapenstyrning.

Forskningsinsatserna motiveras av AESA:ns stora fördelar i viktiga taktiska sammanhang, jämfört med alternativa antennteknologier. Flera utredningar och studier har pekat på behovet av tekniken i försvarstillämpningar inklusive FoRMA [1], IPT-UAV [2], FM-studier [3], PerP-studier [4], AESA-inriktade studier [5,6,7] och systemsimuleringsinriktad forskning [8].

Till fördelarna med aktiva gruppantennor hör både ökade prestanda och utökad och mer flexibel funktion, speciellt i kombination med digital mottagning. Jämfört med alternativa antennteknologier ger AESA:

- bättre omvärldsuppfattning
- större målföljningskapacitet
- bättre förmåga att upptäcka rörliga markmål och överföra radarbilder i realtid
- bättre störtålighet
- högre tillförlitlighet
- avsevärt bättre förmåga att integrera flera funktioner i samma sensor

I framtidens konflikter kommer det sannolikt att vara allt viktigare att radarsensorer kan utöka sina funktioner för många olika behov och sensoruppgifter. Det gäller inte minst för försvarsförband som är organiserade i nätverksstrukturer eller deltar i internationella operationer, vilket exempelvis arbetet inom FoRMA visat [1]. För att effektivt integrera flera funktioner inom radar, kommunikation och telekrig i en gemensam antenn är aktiv gruppantenneteknik närmast en förutsättning [8]. En fördel specifik för en digital AESA är att uppgraderingar och anpassningar av radarn för nya behov underlättas jämfört med konventionella radarsystem. Funktionerna definieras i större utsträckning i mjukvara vilket förenklar uppgraderingar och modifieringar av funktioner och minskar behovet av kostsamma uppgraderingar av hårdvaran [9].

Genomslaget för tekniken är dock beroende av forsknings- och utvecklingsinsatser inom vissa teknikområden för att vara praktiskt och ekonomiskt tillämpbar. En av nyckelfrågorna är vilka möjligheter som finns att reducera komplexitet och fysisk volym på gruppantennen vilket potentiellt kan minska kostnaderna för realisering. Om utrymmeskravet för radarantennen kan minskas eller antennen tom göras tunn nog att integreras i farkostens skrov kan tekniken dessutom bli tillgänglig för fler typer av sensorbärare/plattformar som UAV:er och mindre markfordon.

Utvecklingen av mikrovågssystem går därför nu mot allt kompaktare antensystem, baserade på allt högre integrationsgrad av både kretsar, strukturintegrerade antenner och funktionsintegration. En tydlig forskningstrend är att utveckla radarsystemen till rekonfigurerbara flerfunktionssystem, som utöver radar inkluderar t ex kommunikation,

datalänkar, signalspaning och störning i samma system. Det medför ökade möjligheter att i framtiden utrusta även små farkoster som UAV:er med avancerade radarsensorer till lägre kostnad per funktion. Inslaget av aktiva gruppantennar spås öka väsentligt i försvarssystem i framtiden [10,11,12,13].

Inom AMALIA-projektet, som bedrivits 2001-2003, har verksamheten därför fokuserats mot att studera realiserbarhet och tillämpbarhet av mycket kompakta gruppantennar, enligt det s.k. ”Smart-skin”-konceptet. Konceptet bygger på stark integration av antenn och bakomliggande elektronik i en tunn flerlagerstruktur. Målsättningen för projektet har varit att ta fram ett tekniskt underlag för att kunna stödja försvaret och försvarsindustrin i utformningen av framtida radar- och flerfunktionssystem.

Forskningen har behandlat såväl grundläggande tekniska frågeställningar kring mottagarelektronik och antennteknik såväl som system- och signalbehandlingsfrågor, med tyngdpunkt på de två förstnämnda. För att påvisa realiserbarhet hos konceptet, och ge praktisk erfarenhet av möjligheter och begränsningar med tekniken har en liten konceptdemonstrator utvecklats inom projektet. För att studera möjligheterna att utöka antenners täckningsområde och förbättra omvärldsuppfattningen har metoder att utforma antenner konformt, dvs utmed en krökt eller fasetterad yta, studerats. Systemutformning och signalbehandling har studerats för att bedöma tillämpbarheten av tekniken. En betydande del av forskningen har varit av generisk karaktär. Tillämpningarna har varit fokuserade på radar men resultaten och metoderna kan appliceras också på andra områden som kommunikationsantennar, satellitnavigationsmottagare, signalspaningsutrustning, och flerfunktionssystem.

Projektet vilar på en långvarig kunskaps- och kompetensuppbyggnad på FOI inom området mikrovågsbaserade gruppantennar. Projektets medarbetare arbetar på institutionerna för mikrovågsteknik, radarsystem, radarsensorer samt data- och informationsfusion. En omfattande samverkan med FMV, försvarsindustri, forskningsinstitut och universitet har bedrivits genom separata beställningar utöver FM-uppdraget. Projektet har varit svensk part i ett avtalsbundet samarbete med TNO och NLR i Nederländerna.

2 Försvarsnytta och kunskapsspridning

2.1 Nyttan för försvaret

Radar- och multifunktionssystem baserade på aktiva gruppantennor, i synnerhet digitala, har stor utvecklingspotential och användbarheten i försvarstillämpningar har pekats ut i flera utredningar och studier, [1-8], se avsnitt 1. Inslaget av aktiva gruppantennor förutspås öka avsevärt i försvarssystem i framtiden [10-13], men i vilken takt beror framför allt av kostnaderna för tekniken. Avgörande är att dessa står i relation till nyttan och ekonomiska resurser. Projektets resultat visar på några möjligheter att reducera volym och komplexitet hos både MMIC^a-elektroniken (sändar- och mottagarelektronik) och byggsättet (packaging) vilket pekar på att väsentliga kostnadsreduktioner för tekniken bör vara möjliga i framtiden, i linje med den fallande kostnadstrend som pågått under ett antal år [10,14]. Dessa två områden bedöms stå för majoriteten av kostnaden för antennen. Uppskattningar från exempelvis Alenia Marconi Systems anger att av den totala kostnaden för en aktiv gruppantenn står MMIC-elektroniken för 40%, byggsätt 40% och resterande 20 % är testning [15]. Genom att använda förenklade produktionssätt och reducera komplexiteten provas idag tekniken till och med för civila radarapplikationer. Exempelvis har tyska FGAN i samarbete med STN ATLAS Electronics tagit fram en experimentell AESA för civil applikation på kommersiella fartyg [16].

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

- Kunskapsöverföring till FMV och försvarsindustri genom FMV-finansierade program, se avsnitt 2.2, Figur 1 och Tabell 2.
- Deltagande i uppföljningar av flertal FMV-finansierade industriprogram inriktade på gruppantennstillämpningar som EMW NORA studier, SAAB AESA studier [5], AESA simulering FLSC [7].
- Deltagande i studier, exempelvis FM-studie [3], IPT-UAV, FoRMA/PerP, antennlösningar för studieprojekt om aerostatradar.
- Projektets forskare har genom omfattande samverkan med försvarsindustri, universitet och forskningsinstitut vidareutvecklat ett nationellt nätverk inom forskningsområdet.
- Projektmedarbetare har deltagit i NBF-inriktad kursverksamhet för försvaret.
- Kompetens, kunskap och tekniskt underlag som byggts upp inom projektet har också kommit flera andra försvarsmaktsuppdrag tillgodo inom FOI inom telektrigområdet (VMS-Flyg), radarområdet (radarsystemteknik för bredbandsradar) och kommunikationsområdet (elektrisk styrning av kommunikationsantennor) samt inom systemsimuleringsverksamhet (multifunktionsantennor) finansierad inom Strategiska forskningskärnor.

^a MMIC – Monolithic Microwave Integrated Circuit

- Projektets deltagande i bilateralt och multinationellt europeiskt samarbete har medfört att projektet kunnat ta del av utländska forskningsresultat och att de egna resultaten kunnat värderas i ett internationellt perspektiv.

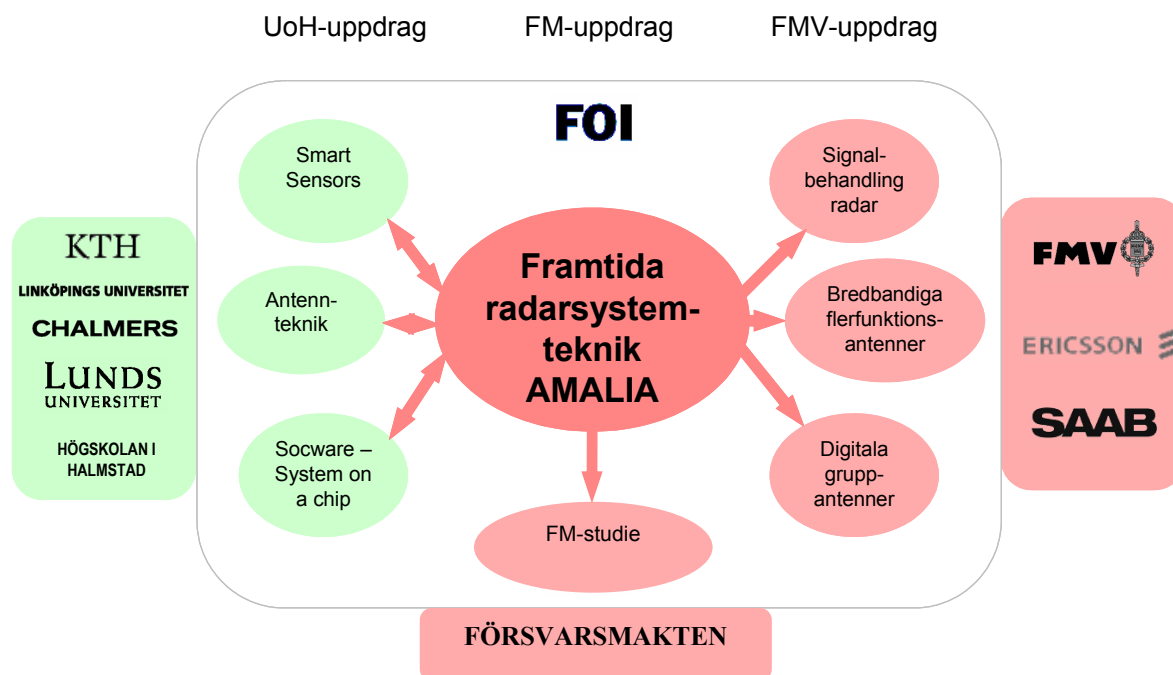
Projektets resultat har dokumenterats i rapporter och publikationer vars forskningskvalitet säkrats genom internationell publicering. Tabell 1 innehåller en översikt av publikationstyperna och en detaljerad förteckning finns i avsnitt 7.

<i>Publikationstyp</i>	<i>Antal</i>
Rapporter/Memo	15
Konferensbidrag	15
Doktorsavhandlingar	1
Tidskriftsartiklar	3

Tabell 1. Tabell över projektets publikationer.

2.2 Samverkan med försvaret, försvarsindustri och universitet

Under projektperioden har kunskapsöverföring skett fortlöpande till FMV och försvarsindustri (EMW och SAAB), främst genom FMV-finansierade program Digitala Gruppantennor (DGA), Bredbandiga FlerfunktionsAntennor (BFA) och Signalbehandling Radar, se Figur 1 och Tabell 2.



Figur 1 Illustration av samverkan och kunskapsöverföring mellan FM-uppdraget AMALIA, FM, FMV, försvarsindustri och universitet och högskola (UoH).

Projektet har också haft nära samarbete med universitet och högskola. Två medarbetare har adjungerade professorer inom antennteknik respektive mikrovågskretsar på LiTH med finansiering utanför projektets ram. En betydande avtappning har också skett genom det SSF-finansierade programmet Smart Sensors där EMW och SAAB stått som referensgrupp och industrimottagare av forskningsresultat.

<i>Beställningar och samarbeten</i>	<i>Parter</i>	<i>Beställare</i>
Digitala gruppantennor	EMW, FOI, CTH, LiTH, SAAB, Acreo	FMV
Radarsystem och bredbandiga flerfunktionsantennor	SAAB, EMW, FOI, CTH, KTH	FMV
Signalbehandling radar	FOI, SAAB, EMW	FMV
Jämförelse aktiva och passiva ESA	FOI	FMV
AESA simulering	FOI, FLSC, EMW, SAAB	FMV
Smart Sensors – Radar on a Chip & Architectures for MSSP	FOI, LiTH, CTH, HH, KTH, Acreo Projektkoordination & referensgrupp: EMW, SAAB	SSF
Antennteknik	LiTH (Adj. Professor från FOI), KTH (Adj. Prof. från EMW och USAF), CTH, LTH	SSF
Socware – system on a chip	LiTH (Adj. Professor från FOI), Acreo	SSF

Tabell 2. Beställningar och samarbeten utöver FM-uppdraget.

2.3 Internationellt samarbete

Inom ramen för projektet har avtalsbunden forskningssamverkan bedrivits med TNO-FEL och NLR i Nederländerna. Samarbetet som inleddes 2001 avser området "Conformal Smart Skin Antenna Technology for Digital Beamforming Applications" och pågår fram till maj 2004. Detta program föregicks under perioden 1996 till 2000 av en samverkan med samma parter inom området "Smart Skin Array Technologies". Fem nyckelområden identifierades initialt, på vilka det nuvarande samverkansprogrammet har fokuserats.

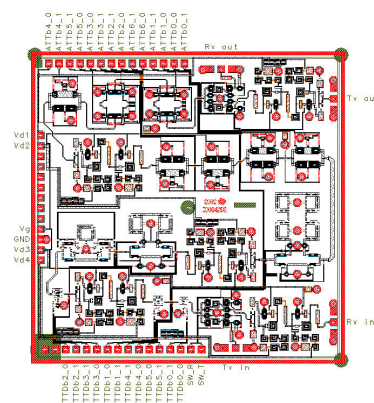
1. Numerical analysis of both waveguide and microstrip conformal antenna arrays
2. Design and evaluation of demonstrator antenna arrays
3. Design of highly integrated receiver-on-a-chip modules and DC&RF multilayer interfaces
4. Packaging and manufacturing of demonstrators
5. Evaluation of the demonstrators

Samarbetet har organiserats i ett antal arbetspaket. Förutom *Management* har samverkansprogrammet bestått av följande rubriker:

- Digital beamforming and signal processing
- Conformal antenna arrays
- Integrated receiver-on-chip modules in a multilayer environment
- Demonstrators

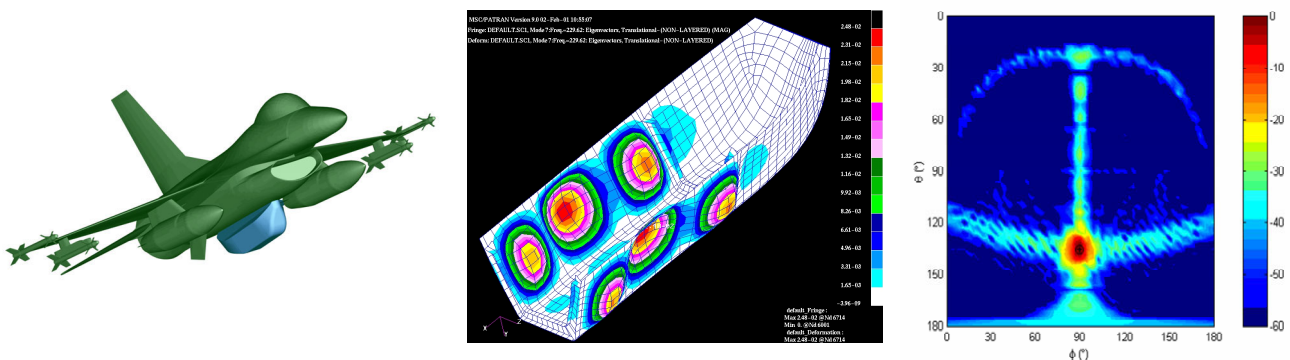
Progress Meetings har hållits med ca sex månaders intervall, vid TNO-FEL, NLR och FOI. Under dessa möten har naturligtvis avtals- och projektledningsärenden tagits upp, men större delen av mötena har utnyttjats till att utbyta information om pågående verksamhet vid respektive institut. Därvid har en god uppfattning erhållits om hur respektive organisations projekt i samverkansprogrammet framskridit.

TNO-personal och FOI-medarbetare har, inom ramen för samarbetet också gemensamt designat en core-chip MMIC, se Figur 2. Detta arbete utfördes på FOI under ca två månader vintern 2001/02. Vid tillverkning av denna MMIC-krets kunde en gemensam wafer beställas av TNO och FOI. På samma wafer processades dessutom FOIs mottagar-, blandar- och filterkretsar. Personal från FOI deltog även vid utvärdering av core-chip kretsarna vid TNO-FEL. Denna verksamhet har resulterat i ett gemensamt konferensbidrag [17].



Figur 2. Core-chip MMIC designat och tillverkat i samverkan mellan TNO-FEL och FOI.

Verksamheten vid NLR har huvudsakligen inriktats på studier av icke-plana antennstrukturer och numeriska analysmetoder för att karaktärisera egenskaper hos dessa. Exempelvis har antenndiagram för en gruppantenn på en spaningspod beräknats med förutsättningen att antenntyten utsätts för deformation på grund av vibration, se Figur 3.



Figur 3. Spaningspod på flygplan utsatt för vibration (vänster och mitten), samt resulterande distorterat antenndiagram (till höger).

Projektet deltar i ett CEPA 1 program för informationsutbyte, IEX 1.21 Non-planar arrays, och har deltagit i initiering av ett program inom Multistatic Radar Technology där utkast till avtal finns. En workshop i ämnet har genomförts på FOI november 2003 med deltagare från SE, UK, NO och GE. Projektet har också deltagit i EU:s COST-program Innovative antennas resp Smart antennas. Projektet utgör också grunden för FOI:s deltagande i ett nybildat program inom EU:s 6:e ramprogram, Antenna Centre of Excellence, med deltagare från europeiska universitet, forskningsinstitut och industrier.

3 Gruppantennner - en översikt

3.1 Gruppantennner, allmänt

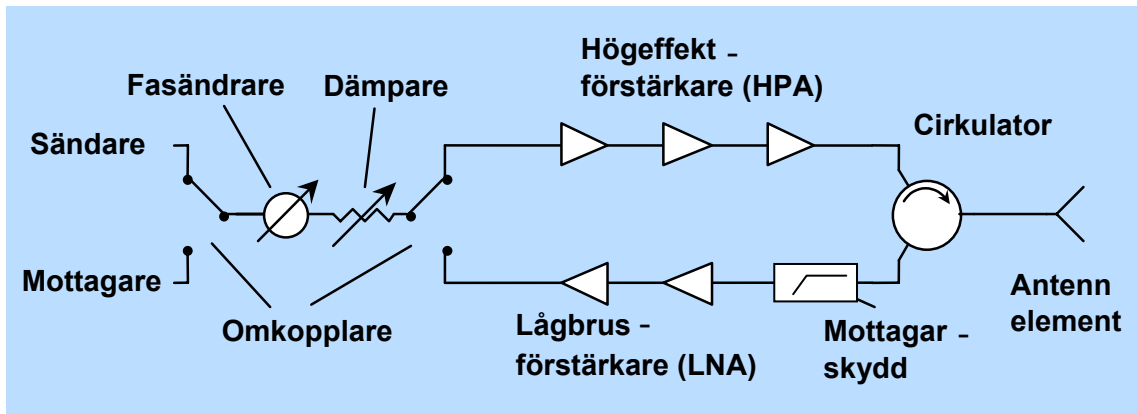
En gruppantenn består av en apertur med ett antal antennelement i ett periodiskt mönster och ett fördelnings-/kombineringsnät. Signalen till eller ifrån ett visst element kan varieras individuellt till såväl fas som amplitud med hjälp av fördelningsnätet. Man kan därigenom skaffa sig god kontroll över antennens strålningsegenskaper och även manipulera dessa dynamiskt. Den framtida hotbilden kan i en avancerad radar inte mötas med mekanisk avsökning utan kräver den dynamiska eller elektroniska avsökning som gruppantennen erbjuder.

För en plan gruppantenn med en skara av identiska element i en identisk omgivning är strålningsdiagrammet en produkt av en gruppfaktor och en elementfaktor. Grupp faktorn beskriver fördelningsnätets egenskaper och element faktorn är ett mått på antennelementets egenskaper i sin omgivning. Fördelningsnätets funktion kan realiseras enligt så kallad analog eller digital princip eller kombinationer av dessa. Analog eller digital lobformning utgör två principiellt olika sätt att förändra grupp faktorn och därmed gruppantennens strålningsdiagram. Vid analog lobformning styrs excitationerna (vikterna) med fysiska komponenter som fasändrare och dämpare/förstärkare. Vid digital lobformning ansätts excitationerna (vikterna) mjukvarumässigt i en digital processor.

3.2 Analog lobformning

I en passiv gruppantenn alstras sändareffekten i en central generator (vanligen ett vandringsvågrör, TWT) och distribueras via fördelningsnätet till varje antennelement. På motsvarande sätt sammanläggs signalerna i mottagningsfallet till en enda mottagare. Antennens strålningsegenskaper styrs här med variabla fasändrare i fördelningsnätet ("phased array"). Man kan även införa icke-konstant amplitudfördelning genom att fördelningsnätet delar signalen olika mellan utgångarna efter en viss fördelning eller dynamiskt genom att variera förstärkningens/dämpningens storlek. Genom valet av amplitudfördelning påverkas huvudlobens form och sidolobernas nivå. Lägre sidolobsnivå medför lägre störkänslighet i sidolobsområdena men också bredare huvudlob och därmed kortare räckvidd. Konstant amplitudfördelning medför högsta möjliga huvudlobsnivå med en första sidolob på -13 dB för en rektangulär apertur.

I en aktiv gruppantenn integreras effektgenerering och lågbrusförstärkning nära antennaperturen. Sändarsignalen genereras vanligen centralt även här men distribueras på låg effektnivå via fördelningsnät till en S/M (Sändar/Mottagar)-modul, Figur 4, där fasändring och förstärkning upp till slutlig effektnivå sker. Mottagna signaler förstärks i en lågbrusförstärkare och fasändras på motsvarande sätt i S/M-modulen, innan de kombineras i en central mottagare.



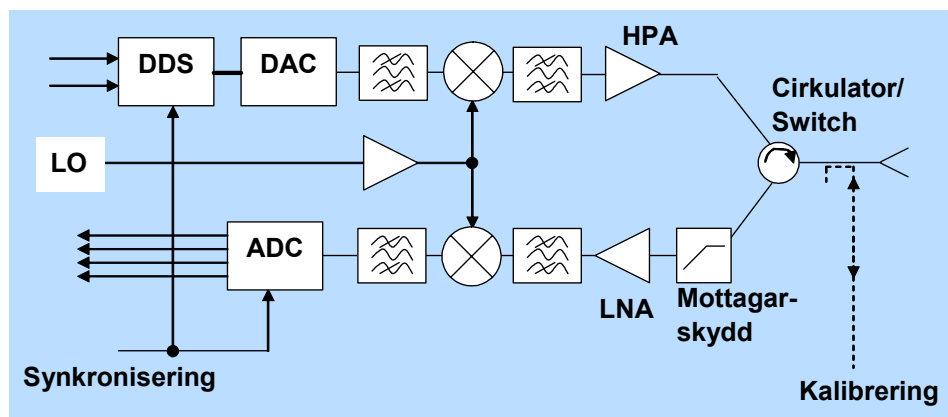
Figur 4. Blockschema för analog sändar/mottagarmodul.

En aktiv gruppantenn har ett antal potentiella fördelar jämfört med den passiva konfigurationen. Förstärkarnas placering nära antennelementen minskar mikrovågsförlusterna och prestanda i form av utsänd effekt och brusfaktor förbättras. Totalverkningsgraden är också bättre för halvledargenererad effekt. I en aktiv gruppantenn med distribuerad effektgenerering blir vidare tillförlitligheten bättre, eftersom fel i enstaka S/M-moduler får liten inverkan på den totala funktionen.

US Defense Science Board talar om tio gånger mindre effektförluster och tre till fem gånger lägre vikt för en aktiv gruppantenn och dessutom 10-100 ggr högre tillförlitlighet med litet eller inget underhållsbehov som följd [10]. Detta ger sammantaget stor fördel för en aktiv gruppantenn i taktiska sammanhang. En jämförelse mellan en aktiv gruppantenn kontra en passiv gruppantenn i några viktiga taktiska frågeställningar uppges visa på fördelar med en aktiv gruppantenn i samtliga fall. Den enda egentliga nackdelen med aktiv gruppantenn är fortfarande till viss del komplexiteten men framför allt kostnaden som dock har minskat betydligt under senare år.

3.3 Digital lobformning

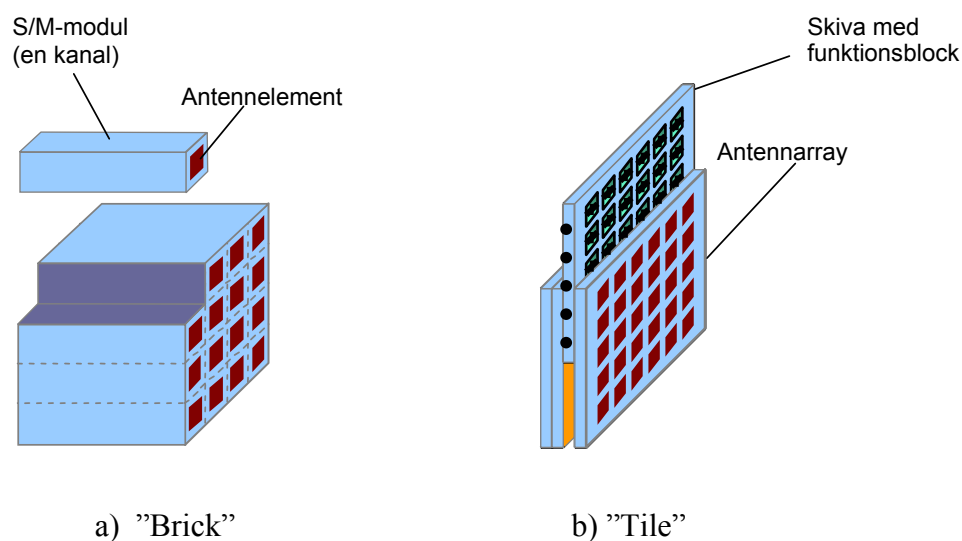
I en modul för digital lobformning placeras den digitala hårdvaran så nära antennelementet, alternativt subarrayerna, som det är tekniskt och ekonomiskt möjligt. Digital lobformning har sin största fördel vid mottagning men i Figur 5 visas en modul som är digital för både sändning och mottagning. Sändpulsens vågform kan genereras lokalt i en krets för digital direktsyntes (DDS), där amplitud, fördröjning och vågform kan styras. Denna passerar sedan en DA-omvandlare (DAC) och uppkonverteras till mikrovågsfrekvens varefter signalen förstärks till högre effekt. Vid mottagning förstärks och filtreras signalen innan den AD-omvandlas (ADC). Karakteristiskt för digital lobformning är att signalen från antennelementet/subarrayerna digitaliseras, filtreras och decimeras samt att denna digitala signal sedan behandlas i realtid i en snabb specialdesignad processor. Med denna signalprocessor kan betydligt mer avancerade funktioner utföras jämfört med analog lobformning. Nya funktioner som kan realiseras är exempelvis multipla simultana lober, högupplösning och adaptiv störundertryckning. Eftersom funktionerna delvis definieras i mjukvara kan systemet rekonfigureras och modifieras i programvara. Begränsande för tekniken är idag i huvudsak kostnaden, dynamiken och i viss mån bandbredden samt tillgång till tillräcklig beräkningskraft för signalbehandling i realtid.



Figur 5. Blockschemata för digital sändar/mottagarmodul.

3.4 Byggsätt

Byggsättet (eng. "packaging") i en aktiv gruppantenn är av avgörande betydelse för såväl prestanda som kostnadseffektivitet. Förstärkare på både sändar- och mottagarsidan bör elektriskt placeras så nära antennelementet som möjligt. Utrymmet bakom en antennarray för utstyrning i två dimensioner är dock ytterst begränsat. Om gallerlober skall undvikas är tvärsnittet för varje kanal begränsat till en yta av ca en halv gånger en halv våglängd vilket motsvarar 50 x 50 mm vid 3 GHz (S-band) och 15 x 15 mm vid 10 GHz (X-band). Volymens tredje dimension är dock flexibel, men ju kortare desto bättre. Man kan vid uppbyggnaden av den aktiva gruppantennen snitta upp den tillgängliga volymen i moduler på olika sätt. Det ursprungliga och hittills vanligaste sättet är att varje modul tilldelas en fullständig sändar- och mottagarkanal (Figur 6a). Modulerna blir då stavformade ("brick" i amerikansk litteratur) med en längd som, åtminstone för X-bandsfrekvenser och uppåt, vanligen är avsevärt större än tvärsnittsdimensionen. Det kan ibland vara lämpligt att sammanföra flera S/M-kanaler till samma mekaniska enhet och man erhåller då multipelmoduler ("tray") vanligast dubbel- eller kvadrupelmoduler. En nackdel är att antennen tenderar att uppta en stor volym och kräver mer komplicerade tillverkningssätt. En fördel är att det är relativt enkelt att byta ut felaktiga moduler.

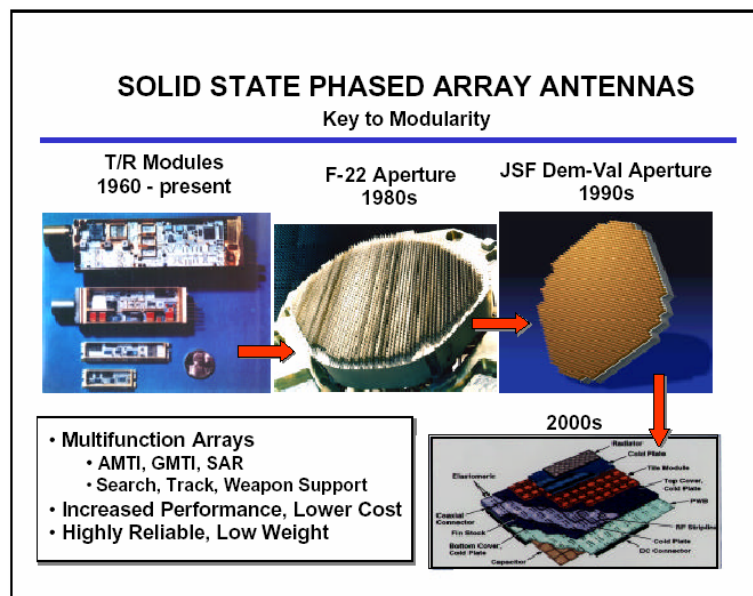


Figur 6. Jämförelse mellan olika arkitekturer för aktiv gruppantenn. Uppbyggnad med stavmoduler, "brick", och skivmoduler, "tile".

Ett alternativ är att istället placera kretsarna i lager parallellt med aperturytan enligt Figur 6b. Antennelementen i en subarray placeras då i ett lager, MMIC-kretsarna i ett annat, fördelningsnät i ett tredje, etc i en flerlagerstruktur, se avsnitt 4.1. Dessutom kan det finnas lager för styr- och logikkretsar och för kylkanaler. Hela gruppantennen kan på detta sätt göras betydligt tunnare, vilket underlättar integrering i olika mekaniska strukturer. Detta byggsätt ("tile") utgör grunden för att realisera "Smart Skin"-konceptet. En fördel är att byggsättet underlättar massproduktion liknande den som används vid vanlig kretskortstillverkning, vilket kan medföra sänkta produktionskostnader. En nackdel är att om ett antennelement visar sig vara felaktigt och elementet är kritiskt för antennens funktion måste hela skivmodulen (subarrayen) bytas. För många applikationer påverkar dock bortfallet av enstaka element inte funktionen nämnvärt (graceful degradation) och felaktiga element kan accepteras utan åtgärd.

3.5 Multifunktionssystem

Nu aktuella gruppantennsystem är i allmänhet fokuserade på en tillämpning, d v s man har separata system för funktioner inom radar, telekrig och kommunikation. I framtiden bör man kunna avsevärt reducera antalet antenner på en plattform genom att skapa integrerade multifunktionssystem för flera vitala mikrovågsfunktioner, vilket bör kunna både förbättra funktionaliteten och reducera kostnaderna. Utvecklingen inom MMIC-området är av avgörande betydelse för möjligheterna att realisera gruppantennsystem i miniaturiserat och integrerbart utförande. Här pågår en fortsatt mycket intensiv utveckling mot högre integration och nya kretslösningar. Figur 7 illustrerar utvecklingen inom aktiv gruppantennsteknik sedd av US-DoD från 60-talet och framåt. Den starkt ökande civila marknaden ger här en avsevärd draghjälp vad gäller design- och tillverkningskostnader. Den volymmässigt största utvecklingen av multifunktionssystem med aktiva elektroniskt styrda gruppantenner sker inom det amerikanska JSF-projektet F-35 Joint Strike Fighter och dess nosmonterade AESA MIRFS/MFA. Multifunktionssystemet innehåller radarfunktioner för sökning, följning, igenkänning och avbildning av mål, telekrigfunktioner för signalspaning, varning och störning samt robotstyrningsfunktioner och kommunikationsfunktioner.



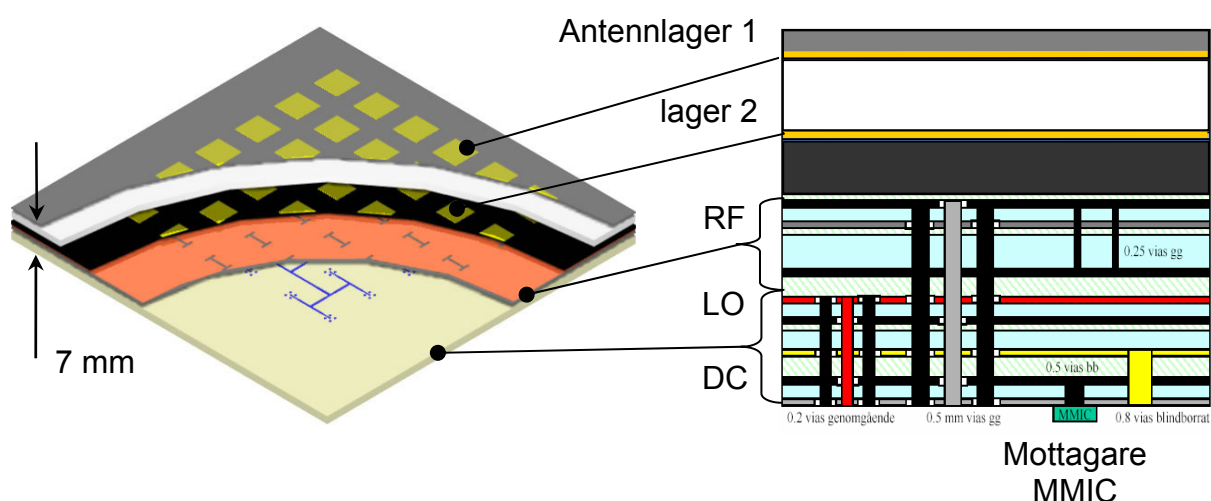
Figur 7. Utvecklingen inom aktiv gruppantennsteknik sedd av US-DoD [10].

4 Forskningsresultat

Projektet har studerat realiserbarhet och tillämpbarhet av gruppantennerna med fokus på sk "Smart-skin"-teknik. Forskningen i projektet har behandlat såväl grundläggande tekniska frågeställningar kring mottagarelektronik och antennteknik som system- och signalbehandlingsfrågor, med tyngdpunkt på de två förstnämnda. För att påvisa realiserbarhet hos "Smart-skin"-konceptet, och ge praktisk erfarenhet av möjligheter och begränsningar med tekniken har en liten konceptdemonstrator utvecklats inom projektet vilket behandlas i avsnitt 4.1. För att studera möjligheterna att utöka antenners täckningsområde och förbättra omvärldsuppfattningen har metoder att utforma antenner konformt, dvs utmed en krökt eller fasetterad yta, studerats och exempel på forskningsresultat redovisas i avsnitt 4.2. Systemutformning och signalbehandling har studerats för att bedöma tillämpbarheten av tekniken vilket behandlas i avsnitten 4.3 och 4.4.

4.1 En gruppantennndemonstrator i multilagerteknik - design och utvärdering

En gruppantennndemonstrator för mottagning bestående av 16 antennelement, 16 mottagarkanaler och därefter 16 AD-omvandlare har tillverkats och utvärderats inom projektet. Demonstratorn har givit möjligheten att sätta de delsystem vi utvecklat i projektet i en helhetslösning och utvärdera hur väl de fungerar i ett system. Delsystem vi utvecklat är antennelement, byggsätt och mottagarchip. Demonstratorantennen är byggd med "smart skin"-teknik, vilket innebär att en specifik funktion för alla kanaler i mottagaren placeras i ett lager, exempelvis antennelement eller mottagarchip, se Figur 8. Detta ger ett mycket tunt byggsätt och ger möjligheter att integrera antennen exempelvis i skrovet på en farkost. Tjockleken för demonstratorn är endast 7 mm. En beskrivning av demonstratorn ges i Figur 9.



Figur 8. Schematisk illustration av demonstratorantennens uppbyggnad i "smart skin"-teknik, där antenner, ledningsnät för RF^b, LO^c och DC^d-signaler, och mottagarelektronik integrerats i en kompakt (7 mm) flerlagerstruktur, "tile". Sprängskiss (vänster) och tvärsnitt, ej skalenlig, (höger).

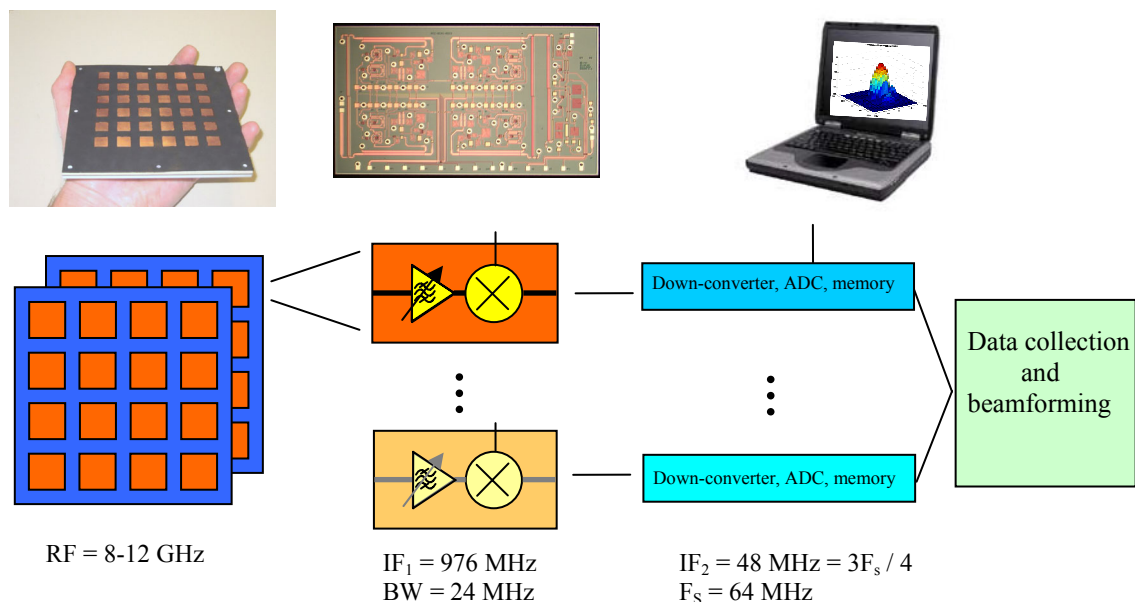
^b RF Radio Frequency

^c LO - Local Oscillator

^d DC - Direct current, sv beteckning likspänning

Det finns flera fördelar med att använda sig av digital lobformning mha många AD-omvandlare. Antennloben kan styras elektriskt, dvs. den kan ta emot signal från många olika riktningar utan att antennen flyttas mekaniskt. Flera samtidiga lober, adaptiv störundertryckning liksom andra algoritmer såsom högupplösning går också att realisera.

Figur 9 visar uppbyggnaden av demonstratorn. Antennelementen är placerade på ena sidan av antennmodulen. Ett andra antennlager är placerat ett visst avstånd under det första lagret, detta för att öka antennens bandbredd. På den andra sidan av modulen placeras mottagarchipen, där en del av mottagningsfunktionen är implementerad. Mellan antennelement och mottagarchip finns LO-fördelningsnätet och DC-distributionen. Övriga delar av mottagarkanalerna och AD-omvandlare samt minne är monterade på separata multilagerkort av standardtyp. Dessa kort är framtagna inom projektet, men består till största delen av inköpta komponenter. Antennmodulen och AD-omvandlarkorten är sammankopplade via koaxialkablar.



Figur 9. Uppbyggnaden av demonstratorn med antennmodul (vänster), mottagarchip (mitten) och AD- och mätuppsamlingskort samt mätdator (höger).

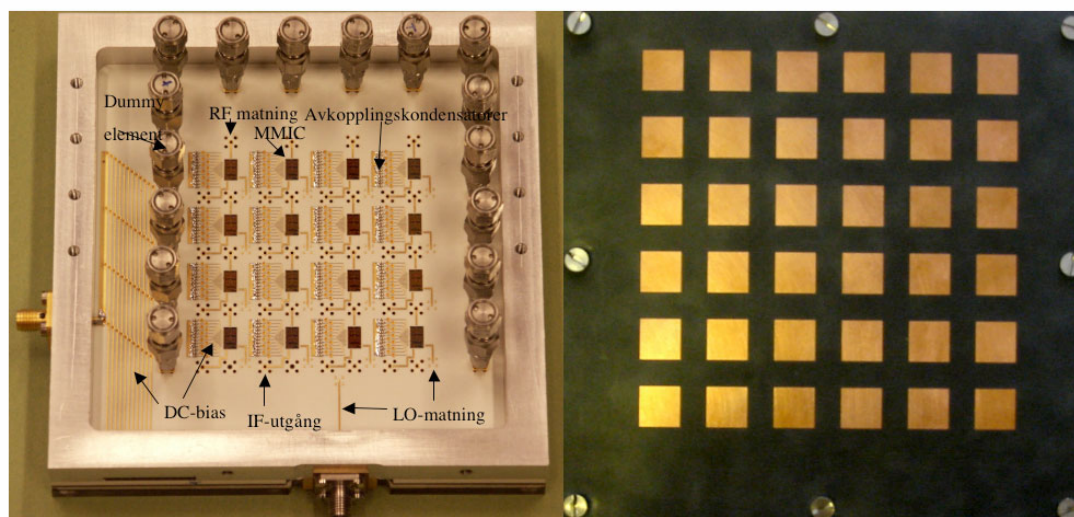
Demonstratorn fungerar väl. Alla 16 kanaler är i funktion och vi ser en god överensstämmelse med förväntade resultat.

Kapitlen *Antennapertur* (4.1.1) och *Mottagare* (4.1.2) ger en översiktlig beskrivning av de delsystem vi utvecklat och kapitlet *Utvärdering av demonstratorn* (4.1.3) presenterar resultat från mätningar på demonstratorantennen och belyser nyttan med tekniken.

4.1.1 Antennapertur

Nedan beskrivs den X-bands gruppantenn, uppbyggd i flerlagerteknik, s.k. tile-teknik, som tagits fram inom projektet under tidsperioden 2001-2003. I ref. [18] ges en mer detaljerad beskrivning av arbetet med antennaperturen.

Ett fotografi på antennenmodulen visas i Figur 10. Storleken på denna är $125 \times 127 \text{ mm}^2$ och tjockleken är ca 7 mm. Gruppantennen består av 36 antennelement varav de yttre används som passiva, sk dummy-element. I en större gruppantenn blir andelen dummy-element lägre, om de alls behövs. Antennelementen består av aperturkopplade, kvadratiska, mikrostrippatchar i dubbla lager. De två lagren med olika patchstorlekar ger antennen en relativt stor bandbredd. Fördelen med att använda aperturkopplade element är att de inte matas galvaniskt, vilket medför en enklare sammansättning av modulen.



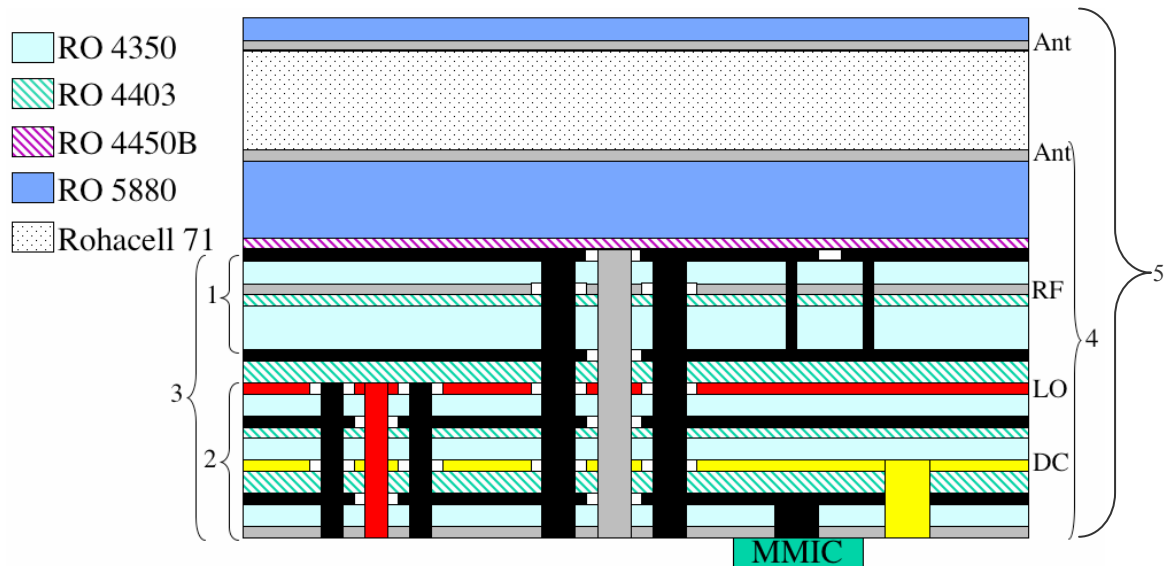
Figur 10. Fotografi av komponentsidan samt det övre antennlagret på demonstratorn.

Byggsättet som valts är mönsterkortsteknik med material lämpliga för frekvenser på X-bandet. De basmaterial som använts är RO 4350 och RO 4403 (preg) från ROGERS. Dessa material har, förutom låga förluster, även fördelen att de är kompatibla med tillverkningsproceduren för mönsterkort. De material som används samt deras dielektricitetskonstanter, ϵ , och förlustfaktorer, $\tan \delta$, illustreras i Tabell 3.

Material	Funktion	ϵ	$\tan \delta$
RO 4350	Dielektrikum	3.48	0.004
RO 4403	Lim	3.17	0.005
RT/Duroid 5880	Dielektrikum	2.2	0.0009
RO 4450B	Lim	3.54	0.004
Rohacell 71	Dielektrikum	1.09	0.004

Tabell 3. Data för material som använts vid tillverkningen av antennenmodulen.

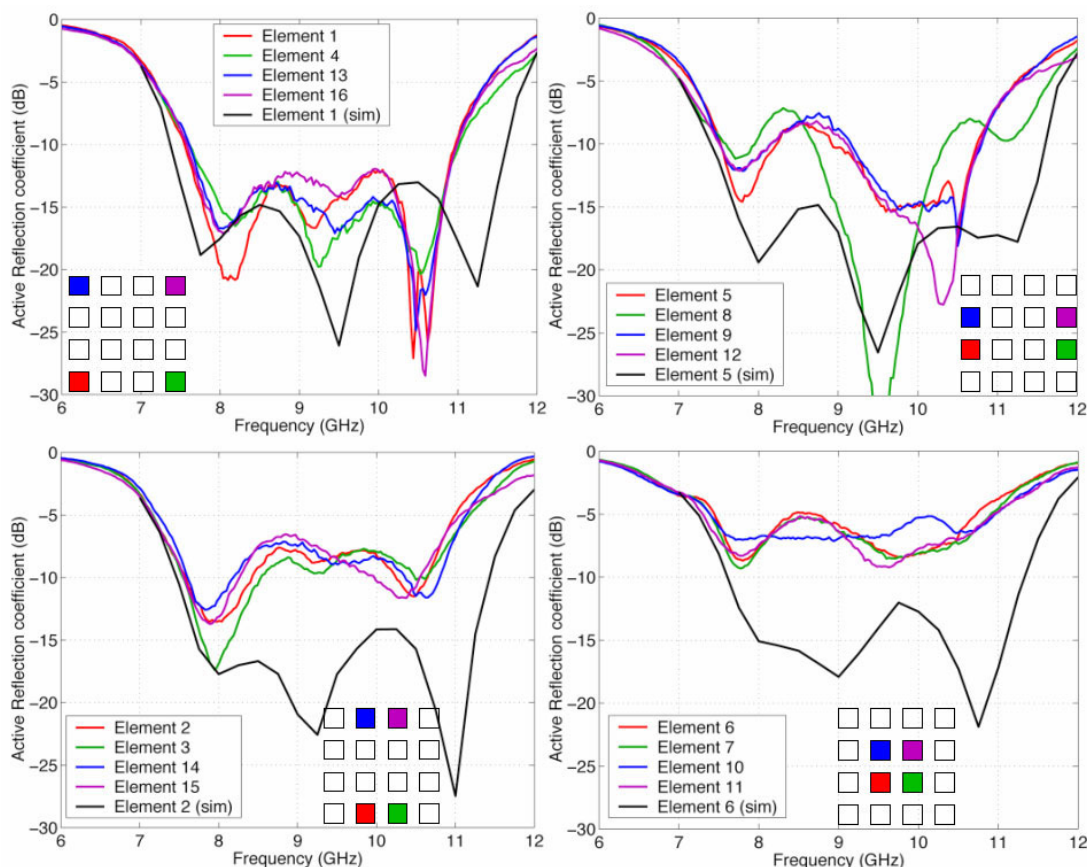
Kortet tillverkas i fem steg, se Figur 11: I steg 1 tillverkas den stripledning (grå) som matar antennerna och de vertikala tvärförbindelserna, sk viahål som förbinder jordplanen (svart). I steg 2 tillverkas LO-fördelningsnätet (rött) samt DC-biasnätet (gult) och LO-matningen förbinds med kretslagret. DC-matningen och jord ansluts till kretslagret, nederst i figuren, med blinda viahål. Steg 3 är att limma ihop del 1 och 2 till ett kort och tillverka de viahål som ansluter antennerna med kretslagret. Under steg 4 och 5 limmas det nedre respektive det övre antennlagret fast, se Figur 11.



Figur 11. Schematisk lagerstruktur av mottagaren (ej skalenlig). Siffrorna 1-5 indikerar tillverkningssteg, se text. Materialtyperna finns specificerade i Tabell 3.

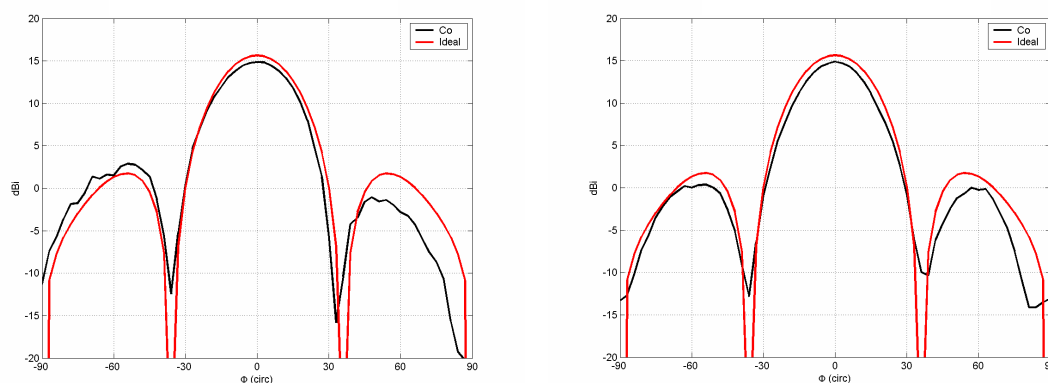
Gruppantennen har designats med hjälp av elektromagnetiska beräkningsprogram, Ensemble och HFSS från Ansoft. Utdata från beräkningsprogrammen är bland annat reflektions- och kopplingsparametrar. Dessa har använts för att beräkna den totala sk aktiva reflektionen, inkluderande kopplingarna till de övriga elementen. Antennelementen har optimerats för att få en så låg reflektionsfaktor som möjligt vid utstyrning rakt fram över frekvensintervallet 8-12 GHz.

Reflektions och kopplingsparametrar har mätts på antennmodulen. Figur 12 visar totala, aktiva reflektionen beräknad utifrån mätningarna för utstyrning rakt fram som funktion av frekvens för alla 16 elementen. I samma diagram återfinns även reflektionen baserad på simulerade data. Avvikelsen mellan uppmätt och simulerad reflektion beror i första hand på att kopplingen i E-planet är starkare än beräknat.



Figur 12 Beräknade aktiva reflektionskoefficienter för de 16 antennelementen.

Det har även utförts antennmätningar i FOI:s stora ekofria mätthall. Elementens antenndiagram, dvs ett elements strålningskaraktistik som funktion av vinkel, mäts. Resultaten illustreras i figur 5 där den totala antennvinsten, erhållen genom fasriktig summation av elementdiagrammen, jämförs med den ideala antennvinsten^e. De relativt små avvikelserna som finns i huvudloben beror bl a på resistiva förluster, reflektionsförluster samt elementens icke-identiska omgivning.



Figur 13. Summerad antennvinst (—) i H- resp. E-plan, jämfört med den ideala antennvinsten^e (—) vid 8 GHz.

^e Med ideal antennvinst menas här antennvinsten för en 4×4 elements gruppantenn med elementdiagram $g = 4\pi A / \lambda^2 \cos \theta$, där A är arean av en enhetscell i gruppantennen, λ är våglängden och θ vinkeln från normalen.

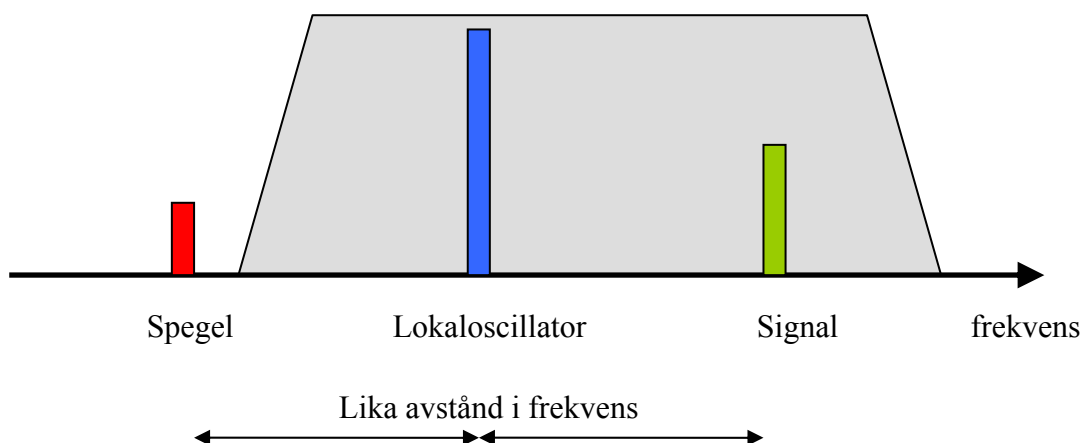
4.1.2 Mottagare

I ref. [19], ges en mer detaljerad beskrivning av vårt arbete med mottagarchipet.

Under de senaste åren har det på FOI bedrivits forskning inriktad mot metoder för att förenkla dagens radarmottagare. En målsättning har varit att reducera antalet nedblandningssteg i mottagarna för frekvenshoppande radarer med stor radarbandbredd för att därigenom kunna reducera mottagarnas storlek, komplexitet och kostnad.

En mottagare med stor radarbandbredd, se Figur 14, baserad på endast två nedblandningssteg vid X-band ställer kravet på det spegelfrekvensundertryckande filtret att det ska vara momentant smalbandigt samtidigt som det ska kunna förflytta sig över hela den önskade radarbandbredden. För att uppfylla detta krävs ett styrbart filter [20].

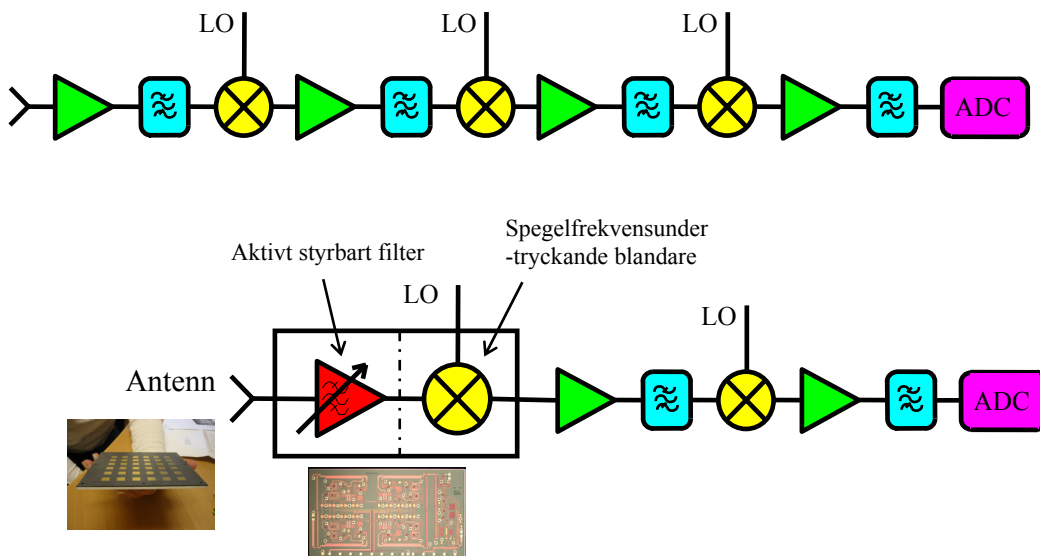
Spegelfrekvensen är den frekvens som i frekvensdomänen befinner sig på lika avstånd från lokaloscillatorns frekvens som signalfrekvensen, fast på motsatt sida om lokaloscillatorn, se Figur 14. Den blandas därför ned till samma frekvens som signalen. Mottagaren blir därmed störkänslig för oönskad effekt på spegelfrekvensen. Motmedlet mot detta är att filtrera bort spegelfrekvensen så mycket som möjligt. En rimlig nivå på filtreringen kan vara att spegelfrekvensen reduceras i samma storleksordning som systemets dynamik (50-60 dB).



Figur 14. Signal (grön)- respektive spegelfrekvens (röd). Skuggade området anger radarbandbredden.

För att uppnå en hög spegelfrekvensundertryckning kan ett styrbart filter med fördel kombineras med en *spegelfrekvensundertryckande blandare* [21]. Kombinationen ger en hög undertryckning av spegelfrekvensen och möjliggör därmed att frekvensen för lokaloscillatorn kan väljas nära signalens frekvens (och därmed ge en låg mellanfrekvens (IF) så att antalet nedblandningssteg kan reduceras) utan att spegelfrekvensundertryckningen blir för låg. Figur 15 jämför en konventionell mottagare baserad på flera nedblandningssteg med en mottagare baserad på endast två nedblandningssteg med aktivt styrbart filter. I figuren ser man att mottagarens storlek och komplexitet reduceras väsentligt då antalet nedblandningssteg reduceras. En sådan lösning har realiserats för demonstratorn. Utan det styrbara filtret i kombination med den spegelfrekvensundertryckande blandaren skulle det vara mycket svårt att realisera mottagaren med färre än tre blandarsteg. Medarbetare från detta projekt har inom ett närliggande projekt, Smart Sensors, också realiserat en del av en mottagare baserad på endast ett nedblandningssteg [22]. Anledningen till att vi inte valde en sådan radikal lösning

till demonstratorn beror på att det skulle ställa mycket höga krav på AD-omvandlarnas förmåga att hantera hög frekvens med hög dynamik. Utvecklingen inom AD-omvandlarområdet pekar ändå mot att omvandlare som uppfyller dessa krav kommer att finnas tillgängliga i en snar framtid. En utförligare utredning finns i ref. [19].



Figur 15 Mottagare baserad på tre konventionella nedblandningssteg (övre figuren) jämfört med en mottagare baserad på endast två nedblandningssteg med aktivt styrbar filter (nedre figuren)

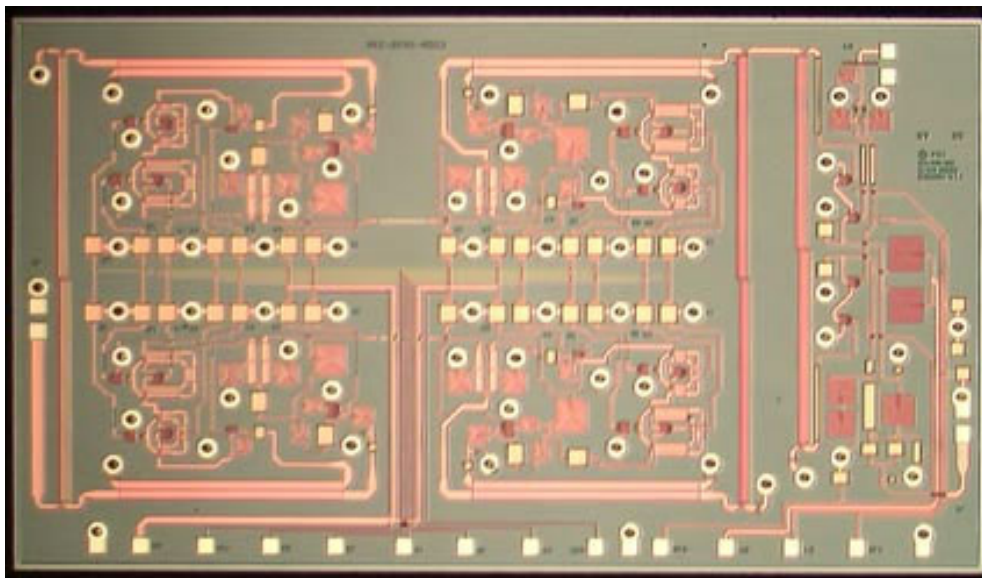
På FOI har arbetet med filter varit inriktat mot aktiva, rekursiva, styrbara filter som är implementerade som integrerade kretsar av typen MMICs, Monolithic Microwave Integrated Circuit. Även spegelfrekvensundertryckande blandare har implementerats som MMIC. En fördelen med att använda sig av ett aktivt filter är att det inte bara filtrerar signalen utan också kan ge förstärkning. Då behövs ingen förstärkare före filtret och mottagaren kan byggas mer kompakt.

En mottagare i MMIC har tagits fram med syfte att pröva om våra idéer passar för en grupp-antennentillämpning. Den består av ett styrbart filter i kombination med en spegelfrekvensundertryckande blandare, se Figur 16. Mottagaren förstärker, filtrerar och blandar ned den inkomna signalen. MMIC-chipet är anpassat för att kunna användas som mottagare i demonstratorn. Finansieringen av processeringen av kretsarna gjordes tillsammans med våra samarbetspartners på TNO-FEL i Nederländerna.

Mätningar på mottagaren visar på en styrbar bandbredd på 8 till 9,7 GHz. Förstärkning uppgår till mellan 5 och 9 dB över bandet. I Tabell 4 sammanfattas mätresultaten.

Frekvens (GHz)	Förstärkning (dB)	Undertryckning spegel (dB)	Brusfaktor (dB)	UtgångsIP3 (dBm)
8,0-9,7	5,1-9,0	35-46	7	1-3

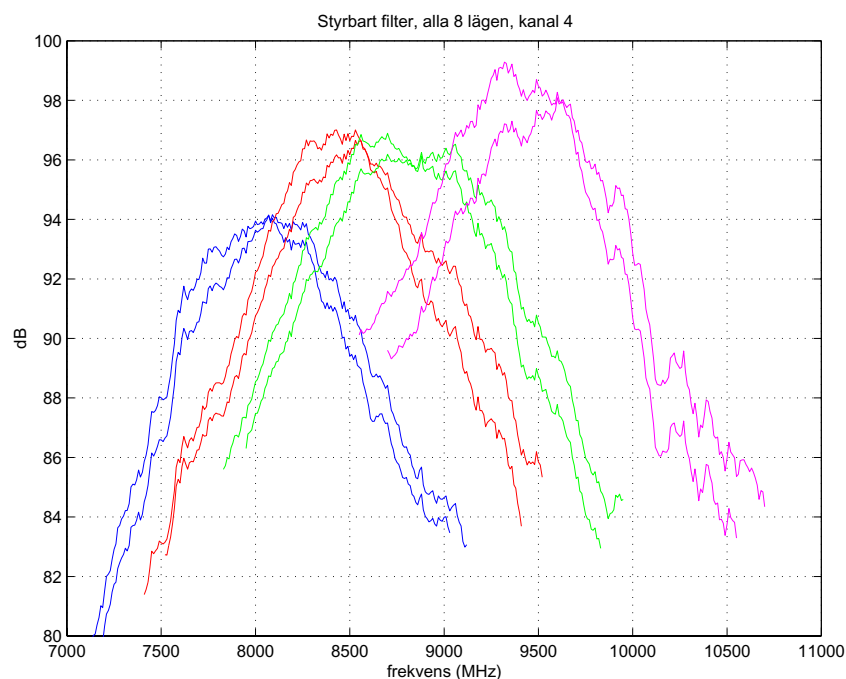
Tabell 4. Sammanfattning av uppmätta prestanda för mottagarchipet.



Figur 16. Fotografi av mottagarchipet.

Figur 17 visar filterkaraktistiken för filtret vid alla åtta centerfrekvenslägen. Det bör poängteras att just dessa mätningar gjordes då mottagarchipet var monterad på demonstratorn i ett antennmättrum. Det snabbt varierande ripplet i graferna härrör sannolikt från små missanpassningar i de relativt långa kablarna som använts vid demonstratormätningarna.

Till demonstratorn behövdes 16 st mottagare. Totalt levererades 36 st kompletta exemplar av chipet, 30 st mättes upp och de 16 mest likvärdiga valdes ut.

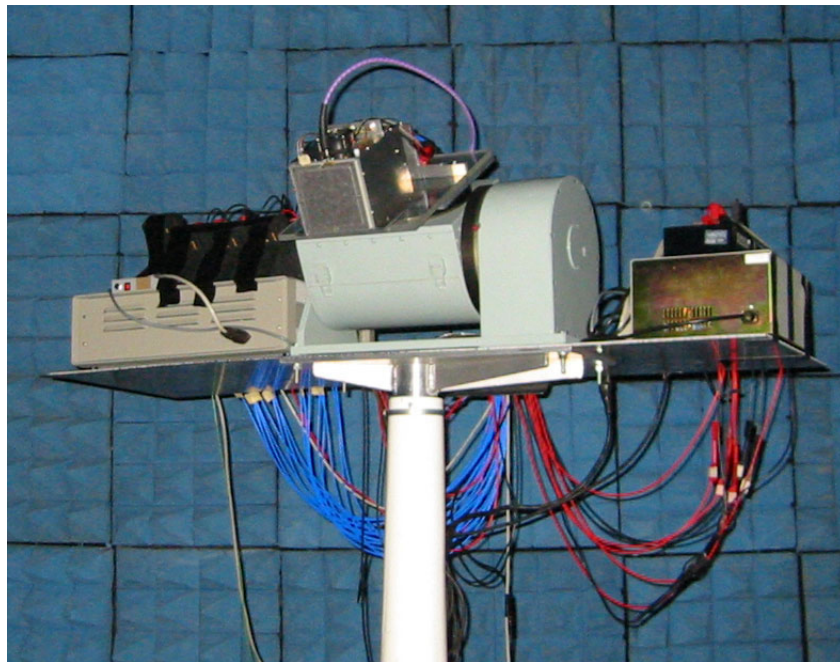


Figur 17 Filterkaraktistik (onormerat) för det styrbara filtret i mottagarmodulen vid de åtta centerfrekvenslägena. Det snabbt varierande ripplet i graferna härrör sannolikt från små missanpassningar i de relativt långa kablarna som använts vid demonstratormätningarna.

4.1.3 Utvärdering av demonstratorantennen

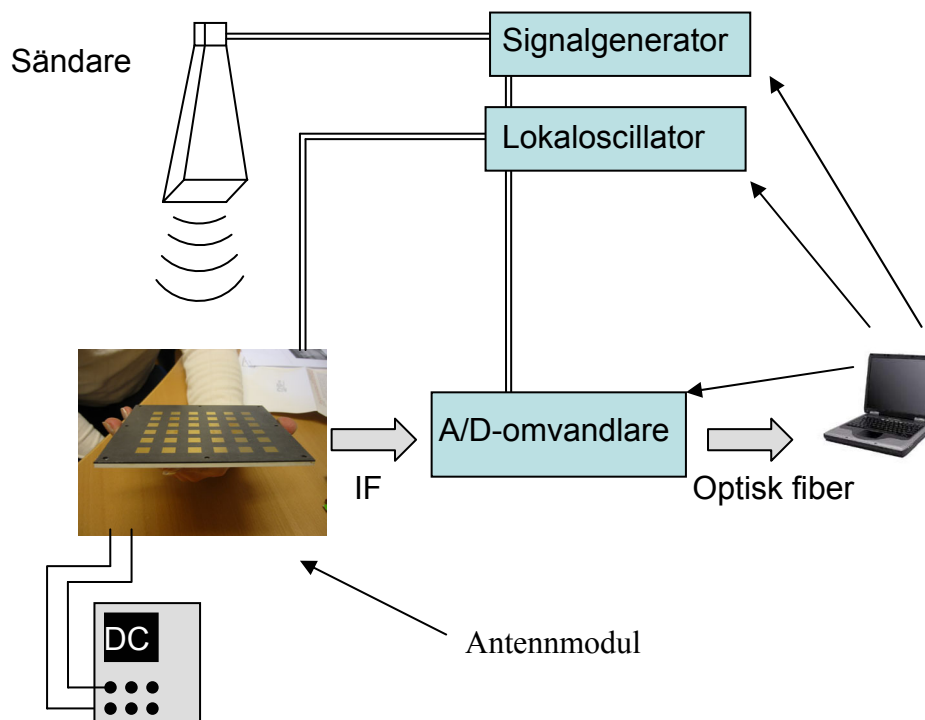
Utvärderingen av demonstratorn visar att den fungerar väl. Alla 16 kanaler är i funktion och vi ser en god överensstämmelse med förväntade resultat. I ref. [23] ges en mer detaljerad beskrivning av mätresultaten från demonstratorantennen.

Gruppantennen och byggsättet beskrevs tidigare i avsnitt 4.1.1 och 4.1.2. Mätningarna på demonstratorn gjordes i FOIs lilla mätthall, ett ekofritt rum med måtten $10 \times 6 \times 6 \text{ m}^3$. Demonstratorn monterades på en mast, se Figur 18, och är den gråsvarta kvadraten som kan ses i mitten av bilden. Till vänster är korten med bland annat AD-omvandlarna placerade. Övriga apparater och kablage är i huvudsak en del av mätsystemet.



Figur 18. Mätupställningen med demonstratorn monterad på en mast i ett ekofritt rum. Antennmodulen är den gråsvarta kvadraten i mitten av bilden. Till vänster är korten med bland annat AD-omvandlarna placerade. Övriga apparater och kablage är i huvudsak en del av mätsystemet

Mätupställningen beskrivs schematiskt i Figur 19 och kan sammanfattas enligt följande: Uteffekten genereras via en signalgenerator som styrs av ett mätprogram. Även den utsända frekvensen och lokaloscillatorns effekt och frekvens styrs via programmet. Antennen är placerad cirka 6 meter från sändaren och den tar emot den utsända signalen, filtrerar, förstärker och blandar ned (sänker frekvensen) signalen till IF_1 . Vidare finns 16 st kablar där IF -signalen från de 16 mottagarmodulerna kopplas till 8 st AD-kretskort (två kanaler per kort) där ytterligare förstärkning, filtrering och nedblandning till IF_2 sker före sampling av signalen i AD-omvandlarna. Alla inblandade generatorer är faslåsta till varandra. Via en optisk fiber överförs den digitaliserade signalen från AD-omvandlarna till datorn.



Figur 19. Schematisk beskrivning av mätupställningen.

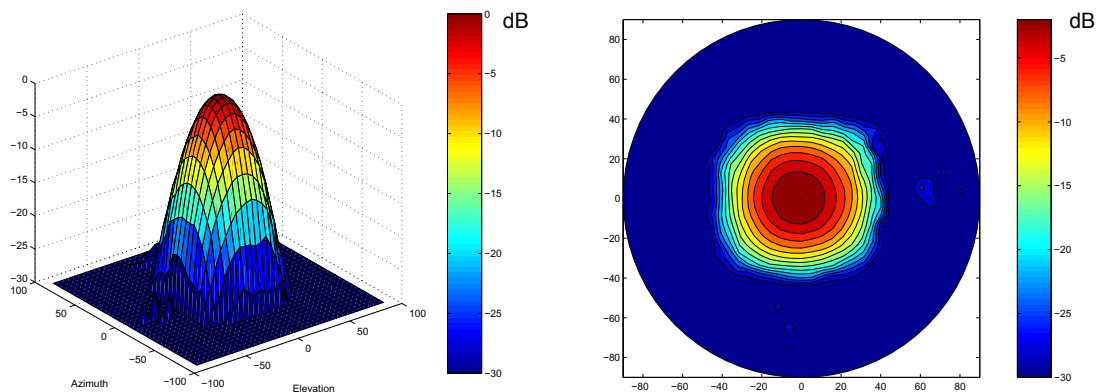
Mätdata sparas i en databas och slutresultat fås i ett signalbehandlingsprogram skrivet i Matlab. Figur 20 visar ett exempel på mätresultat, i detta fall ett antennndiagram vid 9 GHz.

Bandbredden är en fundamental egenskap hos en antenn och beror av antennelementen i kombination med de ingående komponenterna. Mätningarna visar att antennen fungerar väl mellan 7,5 och 12 GHz. De styrbara filtren i mottagarna har dock en styrbar bandbredd mellan 8 GHz och 9,7 GHz, vilket medför att demonstratorn får en lägre förstärkning utanför detta intervall. Signalbandbredden bestäms av AD-omvandlarens samplingsfrekvens på 64 MHz i kombination med antivikningsfiltret och är vald till 24 MHz vilket bekräftas av mätningar. Det är av stor vikt att filtrera bort vikningsband till signalbandet som uppstår vid samplingen, och mätningar visar att dessa undertrycks med minst 20 dB för merparten av kanalerna. Övriga egenskaper som antennndiagram, sidolobsnivå, undertryckning av spegelfrekvenser, störundertryckning, kanallikhet och stabilitet har också mätts upp. Nedan visas exempel på uppmätta resultat. Mer om mätningarna finns att läsa i ref. [23].

Eftersom demonstratorn är en gruppantenn är det sammansatta antennndiagrammet och hur loben kan styras elektriskt mycket centralt. En AD-omvandlare bakom varje mottagarkanal ger möjlighet att styra loben/loberna i signalprocessorn, dvs. den/de kan styras ut i olika riktningar utan fasskiftare eller fysisk vridning av antennen. Detta åstadkoms här i summeringen av bidraget från respektive kanal, inkluderande en speciell felkorrigering..

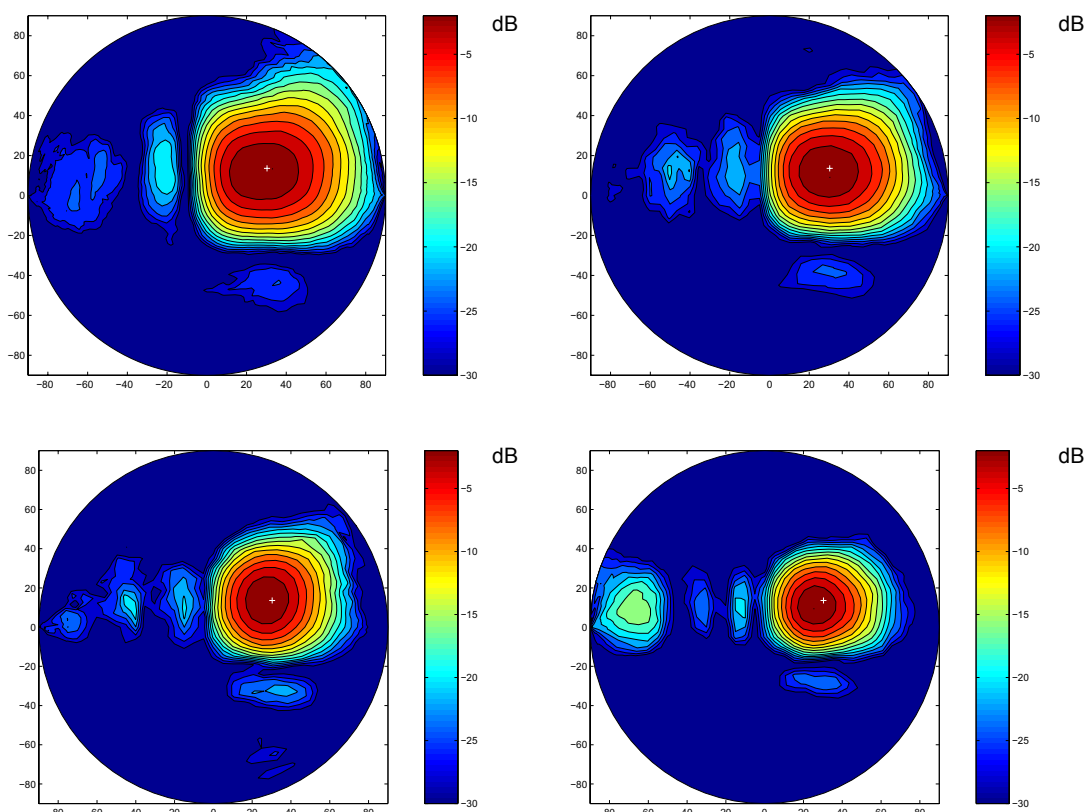
Antennndiagrammen i Figur 20 visar den outstyrd antennloben vid 9 GHz. De två graferna presenterar samma information, men på två olika sätt, dels med ett ytdiagram och dels med en konturgraf där varje färg motsvarar ett effektintervall. Från figurerna kan man utläsa att sidoloberna har undertryckts till mellan -25 och -30 dB, genom att applicera en 30 dB Chebyshev-tapering. Utan undertryckning blir sidoloberna idealt sett -13 dB. Hur stor undertryckning som kan uppnås beror av hur många antennelement gruppantennen består av, taperingsmetod, amplitud- och fasel samt på hur olika elementens strålningsdiagram är. (I

dessa diagram har det sistnämnda delvis korrigerats med en speciell metod.) Undertryckning med -25 till -30 dB är ett gott resultat med tanke på att vår gruppantenn är relativt liten.



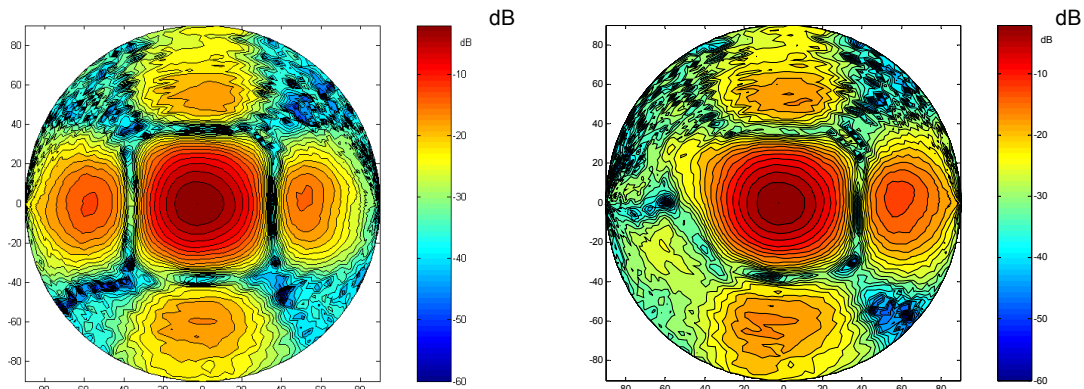
Figur 20. Antennndiagram vid 9 GHz presenterat som en ytgraf (vänster) och som en konturgraf, med vinkeln från antennnormalen som radie i figuren, (höger). Diagrammen är normerade till 0 dB.

Figur 21 visar antennndiagrammen vid 8, 9, 10 respektive 11 GHz då loben är utstyrd 30° i azimuth (sidled) respektive 15° i elevation (höjddled). Mätdata är signalbehandlade så att sidoloberna ska tryckas ned till nominellt -20 dB. Samtidigt med lägre sidolober ökar huvudlobens bredd. De vita kryssen anger positionen för den önskade utstyrningen och vinklarna anges i polära koordinater.



Figur 21 Antennndiagram vid 8, 9, 10 resp. 11 GHz. Loben är utstyrd 30° i azimuth och 15° i elevation vid varje frekvens. Diagrammen är signalbehandlade så att sidoloberna ska tryckas ned till -20 dB.

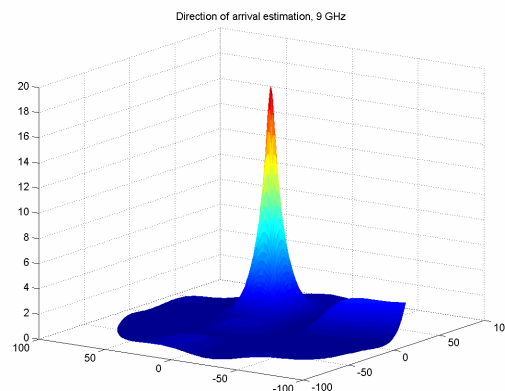
Styrningen av loben fungerar väl. Antenndiagrammen ser bra ut även vid utstyrning. Det är dock av stor vikt att elementavståndet mellan antennelementen inte är för stort i våglängder räknat. Det fysiska elementavståndet är lika för alla frekvenser, men våglängden varierar. Önskade lober, gallerlobber, kan uppkomma vid höga frekvenser, vilket försämrar antennen. Teoretiskt sett kan gallerlobber uppkomma vid frekvenser över 10 GHz vid 60° utstyrning. Med ökad frekvens minskar den gallerlobfria utstyrningen och vid 11 GHz går det att se en försämring av antenndiagrammet.



Figur 22. Demonstration av adaptiv störundertryckning. Ostörda fallet (vänster) och undertryckt störare i vänster sidolob (höger).

Figur 22 och Figur 23 presenterar prestanda för mottagaren på en systemnivå. Figur 22 demonstrerar adaptiv störundertryckning. Funktionen innebär att bidraget från en viss riktning kan summeras destruktivt så att radarbilden i övrigt inte påverkas av en störare i denna riktning. Till vänster visas antenndiagrammet i det ostörda fallet med relativt höga sidolobber. En störare är placerad i -60° azimuth (vänstra sidoloben). För störundertryckning önskas ett antenndiagram med bibehållen huvudlob och minimal påverkan av effekt från störarens riktning. I den högra figuren är den vänstra sidoloben ersatt av ett minima, med hjälp av adaptiv störundertryckning.

Figur 23 visar hur väl mottagaren riktningsbestämmer ett mål. Den relativt smala toppen indikerar att flera mål relativt nära varandra bör vara möjliga för mottagaren att lösa upp som enskilda mål.



Figur 23 Riktningsbestämning vid 9 GHz med algoritmen MUSIC.

Arbetet med att ta fram demonstratorn har varit relativt omfattande, och mycket lärorikt. Vi har fått den nödvändiga möjligheten att testa de delsystem vi tidigare utvecklat i ett sammanhang. Arbetet kan sammanfattas enligt följande:

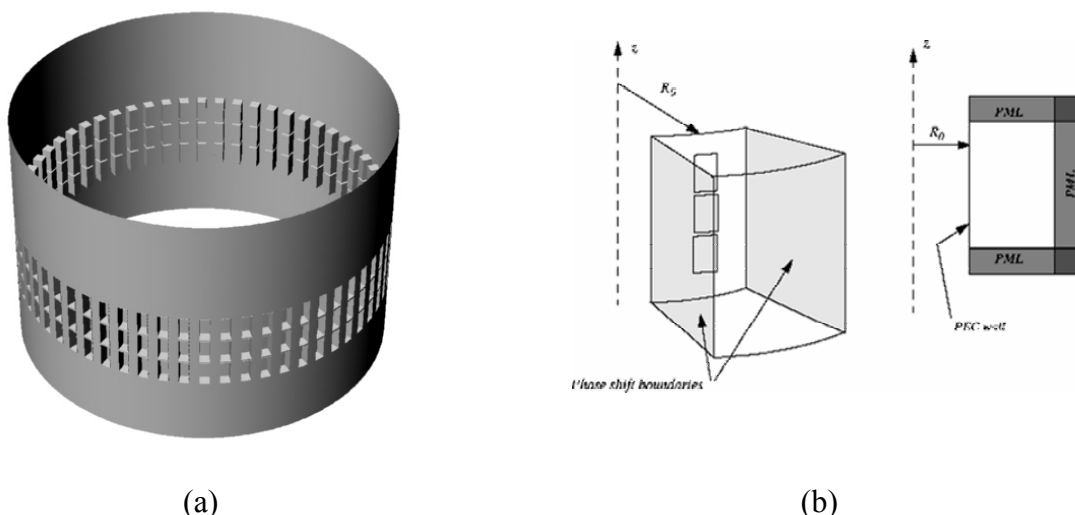
- Demonstratorn fungerar väl och alla 16 kanaler fungerar.
- Funktioner som sidolobs- och störundertryckning har demonstrerats.
- Undertryckningen av spegel- och vikningsfrekvenser är god.
- Det mycket tunna byggsättet pekar på möjligheten att integrera tekniken i skrovet på tex ett fordon eller i en laptop för att nämna några exempel.

4.2 Konforma antenner

4.2.1 Konforma antenner, allmänt

Med konforma gruppantenn menas egentligen gruppantenn vilkas aperturyta geometriskt ansluter till en given bärare form. Sådana kan t.ex. vara kroppssidan på ett flygplan, fartyg, UAV, noskonen på en robot eller framkanten på en flygplansvinge. I praktiken menar man dock med konforma gruppantenn oftast helt enkelt en icke plan gruppantenn, se exempel i Figur 24a, oavsett om den ansluter till en befintlig bärare eller inte.

De potentiella fördelarna med antenner integrerade i en bärare kroppssida är uppenbara, även om dessa inte alltid uppväger nackdelarna, medan fördelarna med en generellt icke plan gruppantenn är dess potentiellt större täckningsområde



Figur 24. Modell av periodisk cylindrisk antenn med 360° runt-om täckning (a), och tillhörande beräkningsvolym (b).

Typiska antennformer är cirkulära, cirkulär-cylindriska, icke-cirkulära cylindrar, generellt dubbelkrökta ytor respektive fasetterade ytor, vilka leder till några olika angreppssätt vid analysen. Vi kan vidare dela in antennerna i de som är endast svagt krökta, dvs. de vars form endast varierar obetydligt inom några våglängder, och de som är kraftigt krökta. De första kan, åtminstone approximativt, analyseras genom att dess lokala egenskaper ansätts till de som motsvarar den lokala geometrin medan de senare, kraftigt krökta, måste analyseras mer direkt. Antennelementen sitter inte i ett periodiskt gitter varför metoden för plana antenner att analysera en enhetscell i en oändlig antenn inte kan tillämpas strikt. Ett undantag från denna regel är de cirkulära antennerna.

Antennelementen sitter inte i en identisk omgivning och är inte riktade åt samma håll. Antennelementen har därför olika strålningsdiagram och ofta också olika polarisation i en given riktning. Gruppantennens strålningsdiagram kan därför inte separeras i en gruppfaktor och en elementfaktor. Ett bra strålningsdiagram blir därför ofta mer komplicerat att realisera i och med att möjlighet att styra såväl fas som amplitud och kanske även polarisation kan behövas.

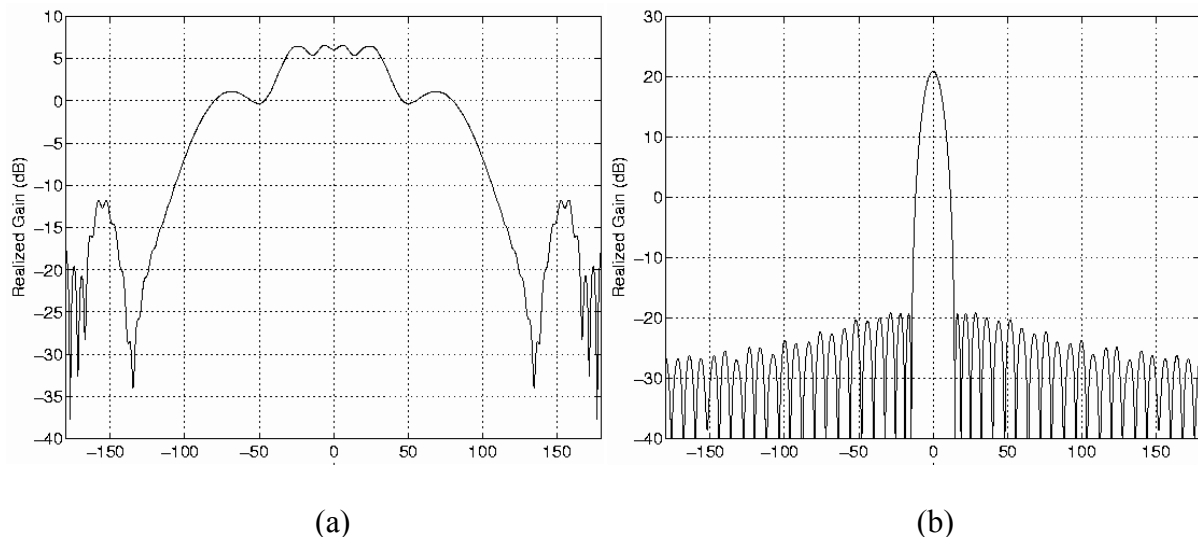
Analysen kan i ett generellt fall behöva göras på hela antennen även om analys på delantennnivå fortfarande kan ge bättre insikter för att kunna genomföra en optimal konstruktion.

4.2.2 Elektromagnetisk analys

I projektet har forskning inom konforma antenner bedrivits med olika inriktning. I en del har cirkulär-cylindriska antenner studerats genom att utveckla ett speciellt beräkningsprogram baserat på FDTD-metoden (Finite Difference Time Domain). I detta beskrivs geometrin och fälten direkt i cylinderkoordinater och om geometrin har en vinkelperiodicitet som är rimligt om man önskar täckning varvet runt, vilket ju ofta är motiveringen till cylindriska antenner, kan man begränsa beräkningsvolymen till en period, dvs. en sektor typiskt innehållande endast en kolumn av antennelement. Detta beskrivs schematiskt i Figur 24. Arbetet finns närmare rapporterat i konferensbidragen [24] och [25].

Resultat av erhållna antennelementdiagram för en 60-elements antenn visas i Figur 25a och ett syntetiserat strålningsdiagram utgående från detta elementdiagram visas i Figur 25b. Studier av specifika mindre cirkulära antenner för att få täckning varvet runt har tidigare också gjorts för VHF-UHF i projekt för kommunikationstillämpningar och aerostatradar.

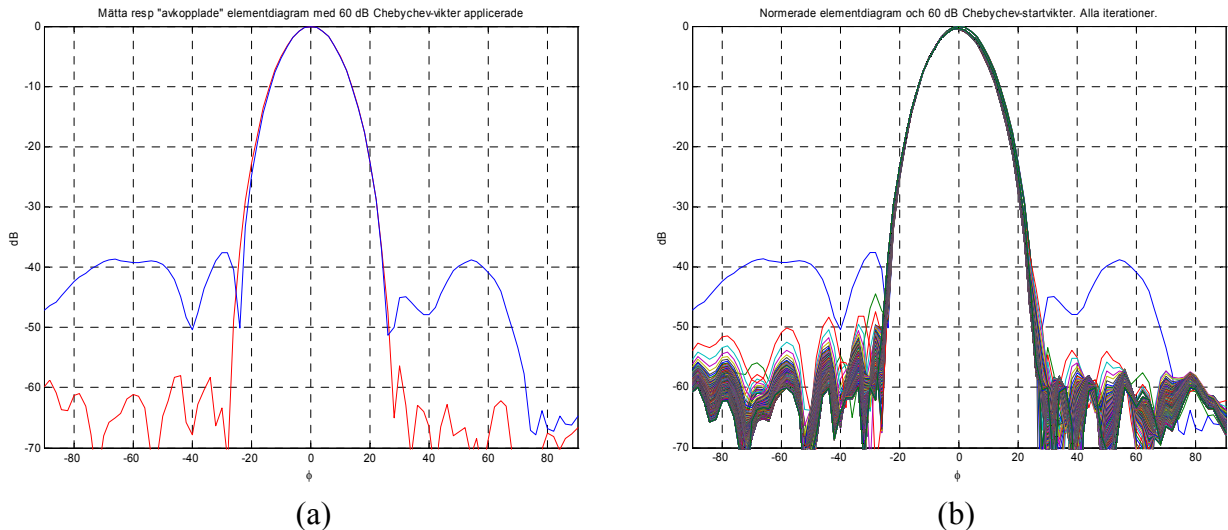
Projektet har också samarbetat med LiTH i ett delvis gemensamt arbete där specifikt s.k. fasetterade konforma antenner studeras. Detta innebär att antennen inte görs mjukt krökt utan i stället byggs upp av plana subarrayer till en kantig struktur. Fördelen med detta är att dessa små subarrayer kan göras till lägre kostnad än mer hantverksmässigt byggande av en dubbelkrökt yta där varje antennelement, och därmed S/M-modul, blir mer individuella. Analysen görs med högfrekvensmetoden UTD (Uniform Theory of Diffraction) som dels inte kräver långa datorberäkningar och dels ger en god fysikalisk insikt i fenomenen. Detta arbete finns delvis rapporterat i bidragen [26,27,28].



Figur 25. Beräknat elementdiagram respektive från detta syntetiserat antenndiagram.

4.2.3 Antenndiagramsyntes

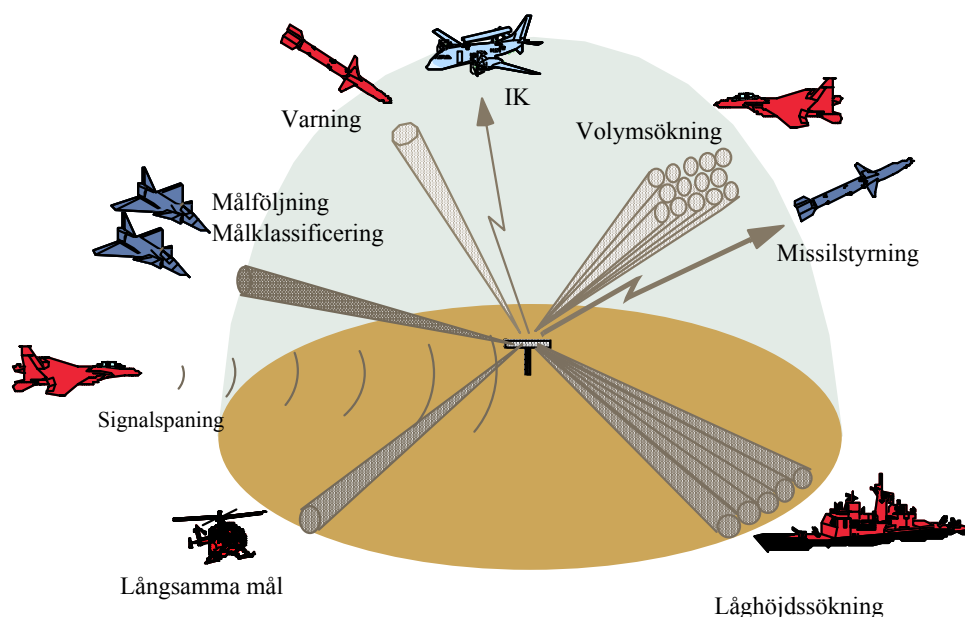
En tredje delaktivitet är studier av antenndiagramsyntes. Då antennelementen blir individuella kan man inte längre separera strålningsdiagrammet i en gruppfaktor, bestämd endast av elementens placering, och en elementfaktor, lika med elementens gemensamma strålningsdiagram. Elementen har nu inte bara, generellt sett, godtycklig placering och därmed olika omgivning utan också olika pekriktningar och olika polarisationer. Mer direkta metoder behöver därför användas där varje enskild antennelementport (ev. en per polarisation) ges en individuellt beräknad excitering. (Notera att för cylinderfallet ovan speciella metoder baserade på dess vinkelperiodicitet dock kan användas.) Som ett enkelt exempel visas i Figur 26a resultat före respektive efter vi optimerat ett strålningsdiagram med mycket låga sidolober för en antenn som i detta fall visserligen är linjär men har olika individuella elementdiagram. Exemplet är hämtat från ett tidigare projekt "Digitala gruppantennar" där diagrammen syntetiserades genom en avkopplingsprocedur vilken bygger på vissa antaganden om elementens funktion, och också användes tidigare för Figur 20 – 23. I de nu studerade metoderna görs emellertid inga sådana antaganden utan elementdiagrammen anges endast som individuella funktioner. Genom en implementerad algoritm ("Alternating projection") kan i stort sett samma resultat uppnås enligt Figur 26b, dock efter ett relativt stort antal iterationer. Den använda metoden är generell och betydligt mer generella fall än detta kan optimeras. Som nämnts är polarisationen en fråga av speciell betydelse för konforma antenner där dubbelpolariserade element behövs för att kunna få ren polarisation i godtycklig strålningsriktning. Detta illustreras vidare i avsnitt 4.4.



Figur 26. Strålningsdiagram med försök till extremt låga sidolober. a) Syntetiserade direkt från elementdiagram (—) respektive med avkopplingsmetod (—) som förutsätter speciella elementegenskaper. b) Med syntesmetod för konforma antenner (alla iterationssteg) där inga speciella antaganden görs.

4.3 Systemteknik

Systemteknik har studerats för radar med flera funktioner för spaning, följning och igenkänning. Forskningen har omfattat systemutformning med plana och konforma antenner, databehandling för detektering, inmätning och följning samt systemutformning för styrning, mätgeometri, arkitektur och samverkan med andra system. Systemteknikstudierna syftar till flerfunktionssystem enligt Figur 27.



Figur 27. Flerfunktionssystem för spaning och ledning i ett komplext scenario.

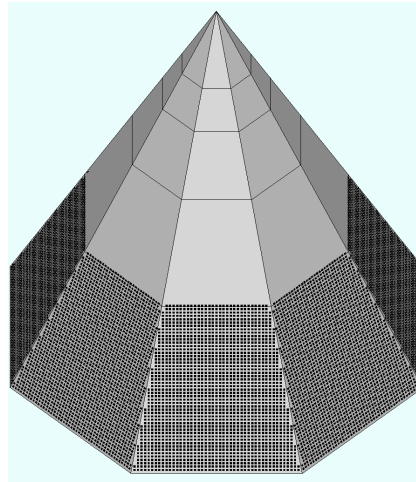
Systemutformning av flerfunktionsradar för marina tillämpningar har beskrivits i en översiktsartikel, [29], medan förslag till luftburen flerfunktionsradar med plana och konforma gruppantennar har behandlats i [30]. Främst behandlas signalbehandling, styrning, mätgeometri och plattformintegration. Utformningen anknyter till tidigare förslag till luftburen flerfunktionsradar för luftbevakning och stridsledning. Systemförslaget baseras på digitala gruppantennar och bredbandiga vågformer vilket ger förbättrade prestanda mot komplexa hotscenarier med varierande bakgrundsmiljö och telekrigsmiljö.

Radarsystemet har flera olika moder som styrs adaptivt beroende på det aktuella scenariot. Grundmoden är sökning efter nya mål med en regelbunden uppdatering av täckningsvolymen. Detekterade mål följs med en uppdateringstakt som beror på målens uppträdande och scenariot. Följda mål inmäts med en eller flera parallella lobar beroende på målens avstånd och storlek. Prioriterade följda mål inmäts med en högupplösande igenkänningsmod baserad på avståndsprofiler, dopplerranalys, polarimetri och eventuellt ISAR. Signalspaning och passiv inmätning kan utföras mot radarsystem, kommunikationssystem och störsändare.

Flerfunktionsradar i nätverk beskrivs i en översiktsartikel [31]. Radarsensorerna i nätverket kan samverka på flera olika sätt. Radarsensorerna kan användas som monostatisk radar med sändarantenn och mottagarantenn i samma antenn eller på samma plats. Detta innebär att varje flerfunktionsradar mäter mot målen var för sig medan samverkan kan ske genom att fusionera mätdata samt att styra och fördela mätresurserna för de ingående radarsensorerna. Radarsensorerna kan även användas som bistatisk radar med sändarantenn och mottagarantenn på olika platser. Detta innebär att varje par av flerfunktionsradar mäter mot målen och samverkar med gemensamma vågformer, lobformning och signalbehandling. Möjligheter till fusion och styrning av sensorer i nätverk beskrivs i [32] och [33].

Ett systemkoncept för flerfunktionssystem på fartyg har tagits fram [34]. Detta innehåller komponenter för spaning, telekrig, ledning och bekämpning. Systemet består av ett antal fartyg i samverkan med varandra och eventuellt även i samverkan med spaningsflygplan för olika typer av uppdrag. Fartygen kan operera med ett framskjutet beteende medan spaningsflygplanet opererar mera tillbakadraget i skyddad position. Varje fartyg har ett antal antennaperturer med bredbandiga gruppantennar för att få täckning runt om för olika funktioner som radarspaning, signalspaning, störsändning, aktiv/passiv varning, kommunikation och nätverk. Flera fartyg kan samverka för att utföra de olika funktionerna i monostatiska, bistatiska eller multistatiska konfigurationer.

Det föreslagna systemkonceptet byggs upp med fasetterade konforma gruppantennar som placeras i en åttasidig pyramidform sammansatt av plana triangelformade och inbördes lika fasettytor enligt Figur 28. Antenntypen ger möjlighet till täckning runt om fartyget i en halvsfär. Flera fasettsidor i pyramiden samverkar för att forma lobar i olika riktningar. Antennens triangulära fasettsidor delas in i olika frekvensband för att få en stor systembandbredd för flerfunktionssystemet. Låga frekvenser använder antenntyten nära pyramidens bas medan höga frekvenser använder antenntyten nära pyramidens topp. En viss frekvens använder en parallelltrapetsformad del av den triangulära fasettsidan. Detta innebär att antennelementen inte behöver vara extremt bredbandiga utan kan anpassas till olika frekvensband beroende på placeringen i höjddel på fasettsidan.



Figur 28. Pyramidantenn med antennelement inritade för det lägsta frekvensbandet.

Flerfunktionssystemet är uppbyggt med bredbandiga aktiva digitala gruppantennar med gemensamma aperturer för sändning och mottagning. Separerade aperturer kan användas för att få isolation för samtidig sändning och mottagning. Antennerna utformas som plana trapetsformade gruppantennar och har dubbelpolariserade antennelement. Ett exempel på antennplacering visas i Figur 29.



Figur 29. Exempel på antennplacering av pyramidantenn på smygfartyg. Ursprungsbild Copyright © Kockums AB.

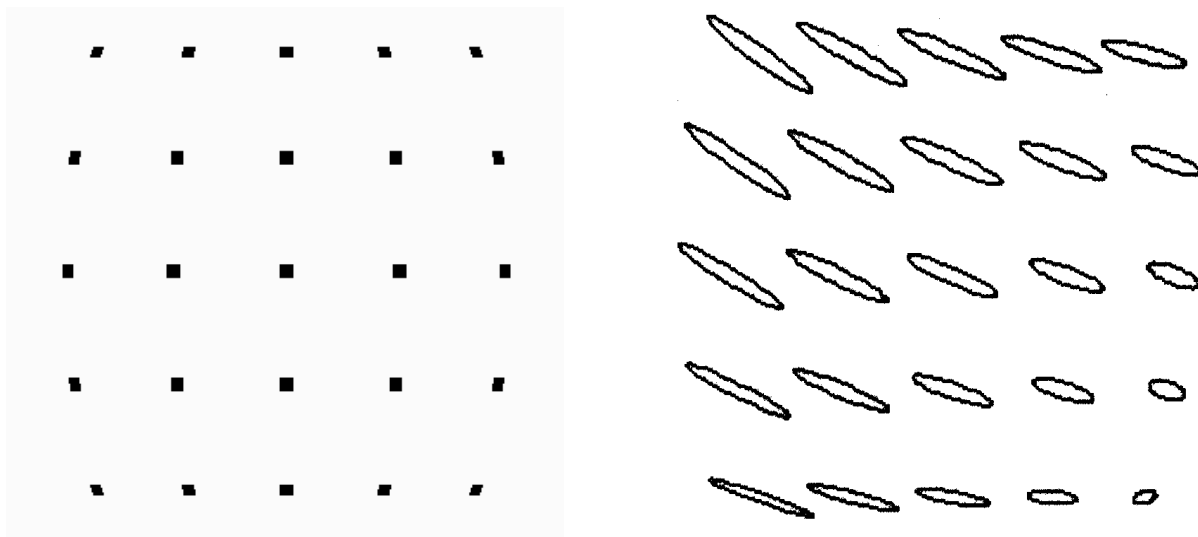
4.4 Signalbehandling och polarimetri

Signalbehandling har studerats för radarsystem med aktiva digitala gruppantennor kombinerade med avancerade vågformer och mätgeometrier som ger nya möjligheter till undertryckning av störning och klotter samt ökad räckvidd och noggrannhet. Forskningen har innehållit studier av signalbehandling för plana och konforma antenner omfattande lobformning, riktningskattning, störundertryckning, STAP, polarisation, bredbandighet och delantennor.

En studie av metoder och principer för signalbehandling för konforma gruppantennor för flerfunktionsradar har genomförts [35]. Främst behandlas lobformning och riktningskattning med beroende av mätgeometri och plattformintegration. Signalbehandlingen ingår i systemförslaget till luftburen flerfunktionsradar för luftbevakning och stridsledning med konforma gruppantennor [30]. Där behandlas olika signalbehandlingsmetoder för konforma gruppantennor och speciellt inverkan av polarisation på lobformning och riktningskattning. Polarimetrisk mätning krävs för att korrekt beskriva och utnyttja mottagna signaler i den konforma gruppantennen. Olika polarisation ger olika lobformer för givna lobformningsvikter. Störundertryckning för konforma gruppantennor kräver polarimetrisk signalbehandling.

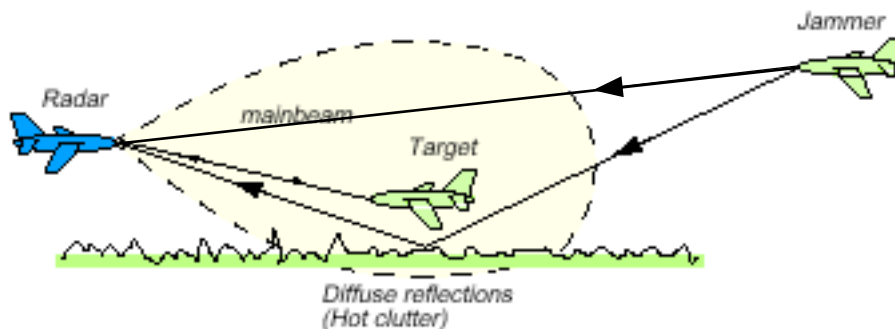
Polarimetri för gruppantennor innebär att antennelementen kan både sända ut och ta emot godtyckliga polarisationer i en viss riktning. Detta görs genom att minst två icke parallella fältkomponenter används i antennelementen och idealt är fältkomponenterna ortogonala så att alla möjliga polariserade fält kan skapas. Däremot kan inte godtyckliga polarisationer skapas samtidigt i olika riktningar för ett antennelement. Med en kombination av flera antennelement i en gruppantenn kan detta bli möjligt. Plana gruppantennor har alla antennelement riktade och orienterade åt samma håll medan konforma gruppantennor inte har detta. Plana gruppantennor har dessutom nästan lika antennelementdiagram medan konforma gruppantennor i allmänhet har olika antennelementdiagram.

Figur 30 visar ett exempel bestående av 5×5 element fördelade på en sfärisk yta. Antennelementen i vänstra delen av figuren består av korsade dipoler som matas så att den utsända polarisationen i elementens normalriktning (broadside) blir elliptisk. Högra delen av figuren visar antennelementens polarisationsellipser sedda från en riktning svarande mot det övre vänstra antennelementets normalriktning. Detta visar att antennelementen måste matas med olika polarisationer för att forma önskad polarisation och lobform i en viss riktning.



Figur 30. Polarisationsellipser (höger) för en konform gruppantenn med 5x5 element av korsade dipoler fördelade över en del av en sfär (vänster). Ellipserna har ritats åtskilda men representerar polarisationsellipser för respektive element, sedda från det övre vänstra elementets normalriktning.

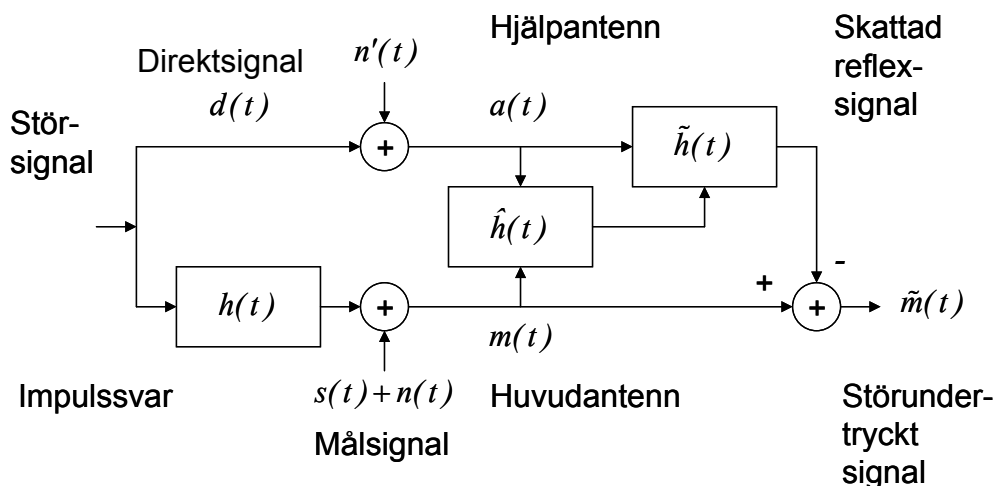
Signalbehandling för störundertryckning av reflexstörning har studerats för plana gruppantennor [36, 37, 38, 39]. Reflexstörning för flygburen radar är mest framträdande för radar med mottagarantennor med låga sidolober för undertryckning av störsignaler från flygburna störsändare enligt Figur 31. Störsignalerna från störsändaren reflekteras av mark- eller havsytor in i mottagarantennens huvudlob och sidolober. Störsignaler i sidoloberna kan undertryckas med låga sidolober och adaptiv sidolobundertryckning. Störsignaler i huvudloben kan dock inte undertryckas med enbart spatiella lobformningsmetoder. Störundertryckningen inom huvudloben måste bygga på filtrering även i avstånd-doppler domänen. Den föreslagna metoden bygger på en skattning med inversfiltrering för att bestämma filtrets viktvektorer under ett kort tidsintervall vilket medför approximativt stationära signaler och tidsinvariant filtrering.



Figur 31. Störscenario med direkt störning i sidolob och reflekterad störning i huvudlob. Direktstrålen kommer in i horisontalplanet sidolober.

Metoden kan tillämpas på mottagarantennor utformade för adaptiv sidolobundertryckning (ASLU) med huvudantenn och hjälpanterr och på mottagarantennor utformade med mera

generella digitala gruppantenn. Metoden beskrivs här i terminologin för ASLU med signaler från huvudantenn och hjälpanntenn enligt Figur 32. Metoden bygger på inversfiltrering av reflexstörningen för att bestämma viktvektorer för vidare störundertryckning av signalen i huvudantennen. Inversfiltreringen utförs inom mottagarens signalbandbredd med samplingsfrekvensen vald så att signalens spektrum fyller ut den tillgängliga bandbredden vilket ger inverterbarhet för ingående matriser. Koherens mellan direktsignal och reflex förutsätts så att reflexsignalen kan beskrivas som en filtrering av direktsignalen från störsändaren och ett komplext impulssvar för reflektionen kan definieras. Finns flera oberoende storkällor inom störsändaren eller flera starka störsändare fås ett svårare problem som inte behandlas här.



Figur 32. Blockschemat för undertryckning av reflexstörning.

Skattningen av reflexens impulssvar startar med inversfiltrering av signalerna i huvudantenn och hjälpanntenn. Inversfiltreringen utförs med lösningen av en Toeplitz matrisekvation som ger ett komplext impulssvar. Ett modifierat impulssvar skattas med en tröskeloperation som tar fram element i impulssvaret som ger starka bidrag till reflexstörningen medan övriga element i impulssvaret sätts till noll. Tröskelnivån måste beräknas från brusnivån i skattningen av impulssvaret vilket bestämmer minsta storleken på elementen i det modifierade impulssvaret.

En skattning av reflexstörningen i huvudantennen bildas genom filtrering av signalen från hjälpanntennen med det modifierade impulssvaret. Även denna operation utförs med en Toeplitz matris multiplikation med en viktvektor av det modifierade impulssvaret. Störundertryckningen utförs med en subtraktion av den skattade reflexstörningen från signalen i huvudantennen. Resultatet är en störundertryckt signal från huvudantennen under ett kort tidsintervall. Hela processen upprepas för nästa tidsintervall vilket kan ge något förändrade impulssvar som avspeglar de tidsvarianta och ickestationära reflexerna. Möjlig undertryckning bestäms av noggrannheten i skattningen av impulssvaret och av andelen element som används i det modifierade impulssvaret.

5 Sammanfattning

Radar och flerfunktionssystem baserade på aktiva gruppantennor pekas i ett flertal studier ut som en hörnsten i viktiga försvarstillämpningar både i nätverksförsvar och i internationella operationer. Radar är en nyckelkomponent med allvädersförmåga som i samverkan med andra sensorer bidrar till en tillförlitlig lägesbild. I framtidens konflikter kommer det sannolikt att bli allt viktigare att kunna anpassa sig till situationen och variera sin taktik. Då blir det viktigt med ökad funktionalitet och större adaptivitet hos radarsensorer som dessutom kompletteras med exempelvis kommunikations- eller telekrigsfunktionalitet. Inslaget av aktiva gruppantennor förutspås öka avsevärt i försvarssystem i framtiden, men i vilken takt avgörs framför allt av kostnaderna för tekniken. Förenklade, högintegrerade arkitekturer är av central betydelse för att uppnå en god balans mellan kostnad, prestanda och nytta av tekniken.

Inom AMALIA-projektet, som bedrivits 2001-2003, har verksamheten därför fokuserats mot att studera realiserbarhet och tillämpbarhet av mycket kompakta aktiva gruppantennor, enligt "Smart-skin"-konceptet. Konceptet bygger på stark integration av antenn och bakomliggande elektronik i en tunn flerlagerstruktur. Huvudmål har varit:

- Utveckla och utvärdera en konceptdemonstrator enligt "Smart Skin" konceptet med:
 - Högintegrerade mottagare med reducerad komplexitet
 - Kompakt högintegrerat utförande
 - Digital mottagning
 - Stor styrbar bandbredd
 - God störundertryckning av spegel- och vikningsfrekvens
 - Möjlighet att demonstrera funktioner som adaptiv störundertryckning och högupplösande riktningsinmätning
- Bygga upp analys- och syntesmetoder för ytkonforma antenner
- Studera metoder och algoritmer för radarsignalbehandling med digitala gruppantennor
- Utveckla systemkoncept och spelkort
- Vidareutveckla nationella och internationella nätverk inom forskningsområdet
- Bistå FMV, försvarsindustri och FM med kompetens genom deltagande i samverkansprogram och studier.

Utvärderingen av demonstratorn visar god överensstämmelse med förväntade resultat. Alla kanaler är i funktion och målet att kunna uppnå en stor styrbar bandbredd med god störundertryckning är verifierat. Funktioner som högupplösande inmätning och adaptiv störundertryckning har demonstrerats. Resultaten visar på möjligheter att reducera komplexitet och volym i antennens MMIC-elektronik (sändar- och mottagarelektronik) och byggsättet (packaging) med bibehållna prestanda. Dessa två områden bedöms stå för majoriteten av kostnaden för aktiva gruppantennor i industriell produktion. Det pekar på att väsentliga kostnadsreduktioner för tekniken bör vara möjliga i framtiden, i linje med den fallande kostnadstrend som pågått under ett antal år. Med kompakta antenner enligt "Smart skin" kan tekniken dessutom bli tillgänglig för fler typer av sensorbärare/plattformar som UAV:er och mindre markfordon. Demonstratorns tjocklek är endast 7 mm.

För att studera möjligheterna att utöka radarantenners täckningsområde och förbättra omvärldsuppfattningen har metoder att utforma antenner konformt, dvs utmed en krökt eller fasetterad yta, studerats. Verksamheten har koncentrerats på att bygga upp analys- och syntesmetoder för att ge en grund för framtida studier av konforma antenner och utformning av antennsystem. Utvärderingen av en simuleringsmodell för cirkulära konforma gruppantennar som utvecklats visar att modellen är mycket effektiv och ger mycket god noggrannhet. Metodutvecklingen har nu nått en sådan fas att vi är mogna att applicera dessa på tillämpningar.

Systemutformning och signalbehandling har studerats för att undersöka tillämpbarheten av tekniken. Verksamheten har fokuserat på att utveckla metoder och algoritmer för signalbehandling och databehandling för radar- och multifunktionssystem med digitala gruppantennar och att utveckla olika systemkoncept och spelkort. Arbetet har resulterat i förslag på systemutformning av flerfunktionsradar för marina tillämpningar och luftburen flerfunktionsradar med plana och konforma gruppantennar. Signalbehandling för störundertryckning av reflexstörning har studerats för plana gruppantennar vilket resulterat i en metod som kan ge god undertryckning under vissa förutsättningar.

En omfattande samverkan med FMV, försvarsindustri, forskningsinstitut och universitet har bedrivits genom separata beställningar och uppdrag utöver FM-uppdraget. Arbetet har bidragit till utformning av försvarets framtida sensor- och ledningssystem. Projektet har också varit svensk part i ett avtalsbundet samarbete med TNO och NLR i Nederländerna.

En betydande del av forskningen har varit av generisk karaktär. Tillämpningarna har varit fokuserade på radar men resultaten och metoderna kan appliceras också på andra områden som kommunikationsantennar, satellitnavigationsmottagare, signalspaningsutrustning, och flerfunktionssystem.

6 Slutord

Detta projekt är resultatet av ett stort antal medarbetares arbetsinsats. Följande personer har varit inblandade under hela eller delar av projektiden 2001 - 2003:

Mattias Alfredsson	Hans Frennberg	Stig Leijon	Aziz Ouacha
Anders Alm	Per Grahn	Staffan Lindström	Lars Pettersson
Patrick Andersson	Ronny Gunnarsson	Robert Malmqvist	Leif Pettersson
Wiwianne Asp	Andreas Gustafsson	Torleif Martin	Anna Pohl
Svante Björklund	Sven Hagelin	Leif Mylén	Carl Samuelsson
Börje Carlegrim	Terje Holmgren	Anders Nelander	Dan Strömberg
Roland Erickson	Gunnar Huss	Tony Nilsson	Ain Sume
Isabel Ferrer			

Projektarbetet har resulterat i modeller och kunskap som kommit verksamheter tillgodo i försvarsindustri, FMV, FM och internt inom FOI. Det är vår förhoppning att den uppbyggda kunskapen ska kunna tillgodogöras och vidareutvecklas i nya verksamheter för framtida försvarsbehov.

7 Leveranser och publikationer

Konferensartiklar

7.6-8.6GHz Tunable Active GaAs PHEMT MMIC Filter for Agile Compact On-Chip X-Band Radar Receiver Front-Ends, R. Malmqvist, C. Samuelsson, T. Nilsson, I. Ferrer and M. Alfredson, *2003 Asia-Pacific Microwave Conference Digest*, Vol 3, pp. 1680-1683, November 4-7, 2003, Seoul, South Korea.

An Agile Image Reject Single-Chip Receiver Front-End for Adaptive X-Band Radar Smart Skin Array Antennas, R. Malmqvist, M. Alfredson, C. Samuelsson, T. Nilsson, I. Ferrer, *2003 Asia-Pacific Microwave Conference Digest*, Vol 1, pp. 162-165, November 4-7, 2003, Seoul, South Korea.

Fully-integrated Wideband TTD Core Chip with Serial Control, F.E. van Vliet, M. van Wanum, A.W. Roodnat, M. Alfredson, *GaAs 2003 Conference Digest*, pp. 89-92, October 6-7, 2003, Munich, Germany.

7.6-8.6GHz Tunable Active MMIC Filter for Agile On-Chip X-Band Radar Receiver Front-Ends, R. Malmqvist, T. Nilsson, I. Ferrer and M. Alfredson, *GHz 2003*, November 4-5, 2003, Linköping, Sweden.

7.6-8.6GHz Agile Image Reject On-Chip Receiver Front-End for Adaptive X-Band Smart Skin Array Antennas, R. Malmqvist, T. Nilsson and I. Ferrer, *GHz 2003*, November 4-5, 2003, Linköping, Sweden.

SiGe BiCMOS LNA's and Tunable Active Filter for Future Wide-Band Multi-Purpose Array Antennas, R. Malmqvist and M. Hansson, *GHz 2003*, November 4-5, 2003, Linköping, Sweden.

A Tunable Active MMIC Filter For On-Chip X-Band Radar Receiver Front-Ends, R. Malmqvist, A. Gustafsson, M. Alfredson and A. Ouacha, *2002 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, Vol. 3, pp. 1907-1910, June 2-7, 2002, Seattle, USA.

A 7.9-9.7GHz On-Chip Radar Receiver Front-End For Future Adaptive X-Band Smart Skin Array Antennas, R. Malmqvist, M. Alfredson, A. Gustafsson and A. Ouacha, *2002 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, Vol. 3, pp 1431-1434, June 2-7, 2002, Seattle, USA.

Array Antenna Module for an X-Band Smart Skin Radar Receiver, L. Huss, A. Pohl, R. Gunnarsson, A. Ouacha and A. Gustafsson, *Antenn 03 - Nordic Antenna Symposium 2003*, pp 273-278, May 13-15, 2003, Kalmar.

Cylindrical FDTD using phase shift boundaries for simulation of large cylindrical antenna arrays, T. Martin, L. Pettersson, *Antenn 03 - Nordic Antenna Symposium 2003*, Kalmar, 13-15 May 2003, pp. 341-346

Cylindrical FDTD with Phase Shift Boundaries for Simulation of Cylindrical Antenna Arrays, T. Martin, L. Pettersson, *3rd European Workshop on Conformal Antennas*, Bonn, 22-23 October 2003, pp.49-52

Experiences using DOA methods with a small digital beamforming antenna, L. Pettersson, P. Grahm, *IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology 2003*, Boston, MA, USA, 14-17 October 2003, pp. 164-169. (FOI-S--1020--SE).

Analysis of terrain scattered interference mitigation, A. Nelander, *PvTT Conference on Signal Processing Advances and Smart Antenna Systems*, Helsinki, Finland, 7-8 October 2003, CD. (FOI-S--1039--SE).

Deconvolution approach to terrain scattered interference mitigation, A. Nelander, *2002 IEEE Radar Conference*, Long Beach, CA, USA, 22-25 April 2002, pp. 344-349. (FOI-S--0500--SE).

Deconvolution methods in radar array processing, A. Nelander, *RadioVetenskap och Kommunikation 02*, Stockholm, 10-13 June 2002, pp. 259-263. (FOI-S--0502--SE).

Vetenskapliga avhandlingar

Tuneable Recursive Active Monolithic Microwave Integrated Circuit Filters, R. Malmqvist, Linköping, Linköpings Universitet, 2001, 74 p. Doktorsavhandling, LiU TEK-DOK no. 698.

FOI rapporter och memo

Plan gruppantennndemonstrator för 8-12 GHz i multilagerteknik, G. Huss m fl , FOI-R--0998--SE, dec 2003.

Utvärdering av mikrovågskretsar för förenklade radarmottagare, A. Gustafsson m fl , FOI-R--0997--SE, dec 2003.

Systemkoncept med konforma gruppantennner, A. Alm m fl, FOI-R--0934--SE, sep 2003.

En strukturintegrerad gruppantennndemonstrator för X-bandet - mätresultat, A. Gustafsson m fl FOI Memo 03-2602, 2003.

Experimentell karakterisering av slutgiltig version av högintegrerad mottagarmodul för konceptdemonstrator, I. Ferrer, T. Nilsson, C. Samuelsson, A. Gustafsson, R. Malmqvist, M. Alfredson, , FOI-Memo 03-1429, 2003.

Mikrovågsteknik för framtida radar och multifunktionssystem, S. Hagelin, A. Nelander, L. Pettersson, A. Gustafsson, A. Ouacha, R. Erickson, FOI-Memo 03-843, 2003.

Förenklade mottagarmoduler, R. Malmqvist, M. Alfredson, A. Gustafsson, FOI-Memo 02-3017, 2002.

Signalbehandling för konforma gruppantennner, A. Nelander, A. Sume, , FOI Memo 02-2939, 2002.

Aktiva gruppantennner för radar och kommunikation i robusta nätverk, S. Hagelin, A. Nelander, A. Ouacha, L. Pettersson, A. Gustafsson, FOI-Memo 02-1760, 2002.

Amalia Framtida radarsystemteknik Statusrapport, S. Hagelin m fl, FOI-Memo 02-902, 2002.

Integration och styrning av sensorer i nätverk, D. Strömberg, FOI Memo 01-3133, 2001.

Systemutformning med plana och konforma gruppantennner, A. Nelander, , FOI Memo 01-3125, 2001.

Deconvolution approach to terrain scattered interference mitigation, A. Nelander, FOI Memo 01-3123, 2001.

Statusrapport konforma antenner, L. Pettersson, FOI dnr 2001/3955, 2001.

Redovisning betr utvärdering av integrerad MMIC-mottagare i en första version, S. Hagelin, A. Ouacha, M. Alfredson, R. Malmqvist , Dnr 01-2420.

Tidskriftsartiklar

Flexibel diversearbetare, S. Hagelin, Framsyn 2:2002, s. 15

Ekovision har blivit verklighet, M. Herberthson, L. Mylén, A. Nelander, Framsyn 2:2002, s. 12-14.

Radarteknik för stridsfartyg, A. Alm m fl, Marinytt 2-2001, s. 24-27. (FOI-S--0228--SE).

8 Referenser

- [1] **FoRMA/LUST-BA Behovsanpassad situationsuppfattning för internationell insats. Årsrapport 2001**, J.-E. Svensson, O. Söderqvist (Red.), FOI-R--0388--SE, 2002.
- [2] **IPT UAV WP "Se och Undvika", delpaket A**, M. Lindegren (red), AerotechTelub dok LI-02034-1 ;
IPT UAV del B - UAV i nätverk, T. Freygård, (red), EMW reg-nr EMW/FT-2002:134
- [3] **Försvarsmaktsgemensam sensorstudie - luftmål**, HKV H21 120:6069 2001
- [4] **PerP studier FMV SAG Sensorsystem**
- [5] **Taktiska scenarier AESA**, J. Koppel, B. Larsson, SAAB GDM-03-153FH, 2003-06-05
- [6] **Elektriskt styrda gruppantennor för radar i stridsflygplan**, A. Alm m fl, FOI Memo 02-1590, 2002
- [7] **Modellering och simulering av AESA i JAS 39**, C. Andersson, A. Borgvall, FOI Memo 01-H366, 2002
- [8] **Simulation Platform for Multifunction RF-Systems**, H. Frennberg mfl, FOI-R--0646--SE, 2002
- [9] **Impact of Knowledge-based Techniques on Emerging Technologies**, .H. D. Griffiths, *NATO-RTO lecture series 233 "Knowledge-Based Signal and Data Processing"* Linköping, 3-4 November 2003
- [10] **Future DoD Airborne High-Frequency Radar Needs/Resources**, Report of the Defense Science Board Task Force, USA, april 2001.
- [11] **Elektriskt styrda gruppantennor för radar i stridsflygplan**, A. Alm mfl, FOI Memo 02-1590:2, 2002.
- [12] **Mikrovågsteknik för framtida radar- och multifunktionssystem**, S. Hagelin, mfl, FOI Memo 03-843, 2003.
- [13] **UAVs and ISR Sensor Technology**, J. T. Butler, USAF ACSC/033/2001-04, 2001
- [14] **New Radar Design Uses Unique Building Blocks**, D. A. Fulghum, Aviation Week and Space Technology, 11 September 2000
- [15] **Introduction to Radar Signal & Data Processing**, A. Farina, *NATO-RTO lecture series 233 "Knowledge-Based Signal and Data Processing"* Linköping, 3-4 November 2003.
- [16] **ESR – an Experimental Active Phased Array Radar for Civilian Maritime Application**, H. Wilden, *Proc. German Radar Symposium 2002*, Bonn, 3 - 5 September, 2002.
- [17] **Fully-integrated Wideband TTD Core Chip with Serial Control**, F.E. van Vliet, M. van Wanum, A.W. Roodnat, M. Alfredson, , *GaAs 2003 Conference Digest*, pp. 89-92, October 6-7, 2003, Munich, Germany.
- [18] **Plan gruppantennedemonstrator för 8-12 GHz i Multilagerteknik**, G. Huss mfl, FOI-R--0998--SE
- [19] **Utvärdering av Mikrovågskretsar för Förenklade Radarmottagare**, A. Gustafsson mfl, FOI-R--0997--SE
- [20] **Tuneable S-band filter for on-chip receiver**, A. Gustafsson, M. Danestig, R. Malmqvist, and A. Ouacha, *Proc. of 1998 Asia-Pacific Microw. Conf.*, vol 2, pp. 781-784, Yokohama, Japan Dec. 1998.
- [21] **A fully integrated radar receiver front-end including an active tunable band pass filter and image rejection mixer**, A. Gustafsson, M. Alfredsson, M. Danestig, R. Malmqvist, and A. Ouacha, *Proc. of 2000 Asia-Pacific Microw. Conf.*, pp. 99-102, Sydney, Australia, Dec. 2000.
- [22] **A three-chip single-stage RF down-converter including filter, mixer and VCO for adaptive X-band radar systems**, R. Malmqvist, A. Gustafsson, R. Kozhuharov and H. Zirath *2002 Asia-Pacific Microwave Conference Digest*, pp. 442-445, November 19-22, 2002, Kyoto, Japan.
- [23] **En strukturintegrerad gruppantennedemonstrator för X-bandet - mätresultat**, A. Gustafsson mfl, FOI Memo 03-2602
- [24] **Cylindrical FDTD using phase shift boundaries for simulation of large cylindrical antenna arrays**, T. Martin, L. Pettersson, *Antenn03-Nordic antenna symposium*, Kalmar, 13-15 Maj 2003, pp. 341-346
- [25] **Cylindrical FDTD with Phase Shift Boundaries for Simulation of Cylindrical Antenna Arrays**, T. Martin, L. Pettersson, *3rd European Workshop on Conformal Antennas*, Bonn, 22-23 Oktober 2003, pp.49-52
- [26] **Mutual coupling between dipoles on faceted conformal antenna arrays**, C. Marcus, L. Pettersson, *RVK02, Stockholm*, 10-13 Juni 2002, pp. 568-571
- [27] **Investigation of the mutual coupling and radiation pattern due to sources on faceted cylinders**, C. Marcus, P. Persson, L. Pettersson, , *Antenn03-Nordic antenna symposium*, Kalmar, 13-15 Maj 2003, pp. 213-218
- [28] **Analysis of Faceted Conformal Antenna using UTD**, C. Marcus, L. Pettersson, , *3rd European Workshop on Conformal Antennas*, Bonn, 22-23 Oktober 2003, pp. 9-12
- [29] **Radarteknik för stridsfartyg**, A. Alm m fl, *Marinnytt* 2-2001, s. 24-27. (FOI-S--0228--SE).
- [30] **Systemutformning med plana och konforma gruppantennor**, A. Nelander, FOI Memo 01-3125, 2001.
- [31] **Ekovision har blivit verklighet**, M. Herberthson, L. Mylén, A. Nelander, *Framsyn* 2002:2, s. 12-14.
- [32] **Integration och styrning av sensorer i nätverk** D. Strömberg, FOI Memo 01-3133, 2001.
- [33] **Digitala gruppantennor - DGA slutrapport**, A. Nelander m fl, FOI-R--0693--SE, december 2002
- [34] **Systemkoncept med konforma gruppantennor**, A. Alm m fl, FOI-R--0934--SE, september 2003.

-
- [35] **Signalbehandling för konforma gruppantenner** A. Nelander, A. Sume, FOI Memo 02-2939, 2002
- [36] **Deconvolution approach to terrain scattered interference mitigation** A. Nelander, FOI Memo 01-3123, 2001.
- [37] **Deconvolution approach to terrain scattered interference mitigation** A. Nelander, *2002 IEEE Radar Conference*, Long Beach, CA, USA, 22-25 april 2002, s. 344-349. (FOI-S--0500--SE)
- [38] **Deconvolution methods in radar array processing** A. Nelander, *RadioVetenskap och Kommunikation 02*, Stockholm, 10-13 juni 2002, s. 259-263. (FOI-S--0502--SE).
- [39] **Analysis of terrain scattered interference mitigation**, A. Nelander, *PvTT Conference on Signal Processing Advances and Smart Antenna Systems*, Helsinki, Finland, 7-8 oktober 2003. (FOI-S--1039--SE).

