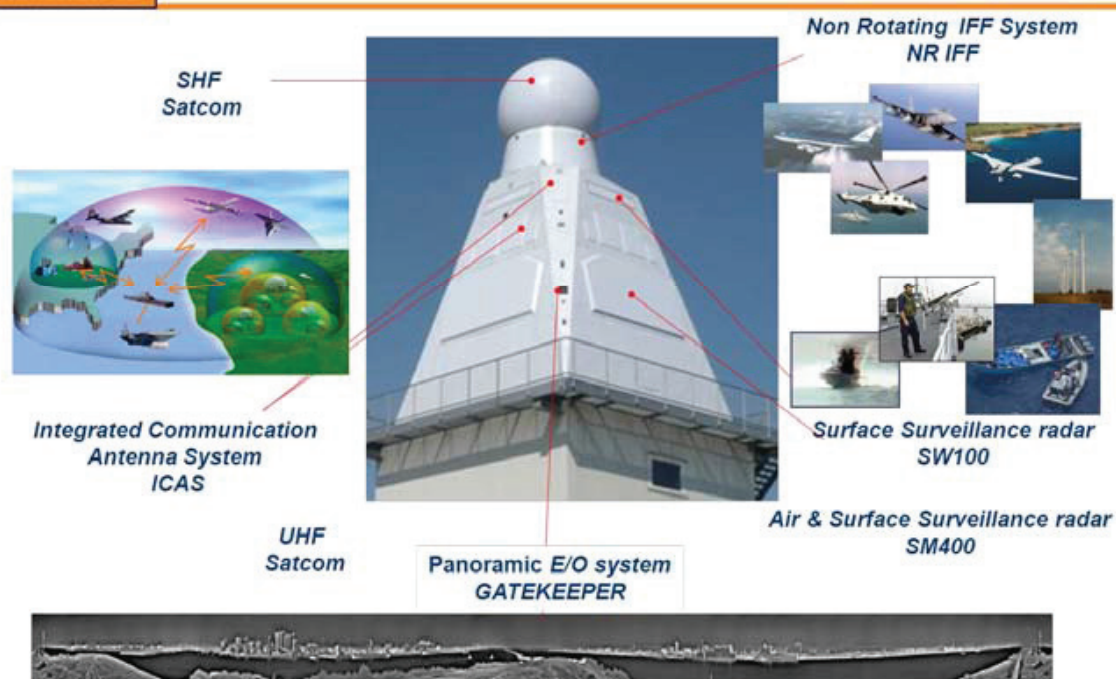


ANDREAS GUSTAFSSON, ANDERS NELANDER,
PER GRAHN, LARS PETTERSSON



The integrated modular mast



Andreas Gustafsson, Anders Neland,
Per Grahn, Lars Pettersson

Omvärldsbevakning av Multifunktionella Gruppantennsystem

Bild/Cover:

R. de Jongh [8].

Titel	Omvärldsbevakning av Multifunktionella Gruppantennsystem
Title	Multifunctional Phased Array Antenna Systems- Survey
Rapportnr/Report no	FOI-R--3681--SE
Månad/Month	juni/June
Utgivningsår/Year	2013
Antal sidor/Pages	34 p
ISSN	1650-1942
Kund/Customer	FM (Swedish Armed Forces)
FoT område	Sensorer och signaturteknik
Projektnr/Project no	E54505
Godkänd av/Approved by	Martin Rantzer
Ansvarig avdelning	Sensorer- och TK-system

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

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

Sammanfattning

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

I många fall realiseras flexibla systemlösningar med gruppantennor, där flera enskilda antennelement fungerar som en stor antenn. Genom att styra fasgången för varje enskilt antennelement kan antennens lobriktning styras till önskad riktning, vilket ger en stor flexibilitet, men innebär även att det inte längre behövs mekaniska delar för rotering av antennen vilka både är kostnads och underhållskrävande.

Multifunktionssystem vi identifierat i studien innefattar kombinerat flygtrafikledning och väderradarsystemet MPAR i USA, det marina systemet IM400 från Thales i Nederländerna som utvecklat en integrerad mast, "the integrated modular mast", där E/O- och radarsensorer för flera olika frekvensband och samt kommunikationsfunktioner ingår.

Inom rymdområdet finns gruppantennbaserade SAR-satellitssystem baserad på fasstyrd gruppantenneteknik med analog lobformning och kommande generations digital lobformning.

Sensorstyrnings och sensorhanterings implementeringstekniker har principiellt inte ändrats så mycket på senare tid. Det främsta som hänt är att den teoretiska förståelsen för problemområdet ökat, liksom vår förmåga att hantera komplexa programsystem.

På radararkitektursidan PESA visas större intresse då tillgången till lågförlustiga fasskiftare genom att MEMS-tekniken prestandamässigt börjar bli en mogen teknik.

Nyckelord: Multifunktion, Gruppantennor, AESA, PESA, SAR, MEMS, Resurshantering.

Summary

Along with the progress within the software and hardware area there is a growing interest in systems that can perform more than one task. The progress opens up new possibilities for realization of systems including flexibility and multifunctionality. One single system could, for example, operate in several frequency bands, at varying bandwidths and power levels. It could also operate different radar functions and act as a communication link.

Often flexible and multifunctional systems are realized by phased array antennas, where several individual antenna elements cooperate and acts as one large antenna. By individual phase steering of each antenna element the large antenna beam direction can be chosen to the wanted direction, which gives flexibility. There will also be no need for mechanical parts for rotating the antenna, which cost both money and high maintenance.

Multifunction system we have identified in the study include the combined aircraft and weather surveillance MPAR from the USA and the naval system IM400 from Thales in the Netherlands who developed an integrated mast, where E/O and radar sensors are integrated together with communication links.

Within the area of spaced based systems there are SAR-based satellite systems based on phased array antenna technology. Operating systems today use mostly analog beam steering, but coming systems will be based on digital beamforming.

The sensor management has in principle not changed much lately. The most significant improvements are on the theoretical side where the understanding of the problem has increased as well as our ability to deal with complex systems.

In the area of radar architectures, the PESA architecture has been paid a lot of attention to, since low-loss phase shifters are starting to be available by the development of RF-MEMS.

Keywords: Multifunction, Phased array antennas, AESA, PESA, SAR, MEMS, Sensor management.

Innehållsförteckning

1	Inledning	7
1.1	Trender i omvärlden	8
2	Tillämpningar	9
2.1	Exempel på operativa system	9
2.1.1	TerraSAR-X	9
2.1.2	APAR	10
2.1.3	APG-77 AESA	10
2.1.4	Super Green Pine	11
2.2	Pågående utvecklingsprojekt	12
2.2.1	MPAR	12
2.2.2	IM400	12
2.2.3	Intryck från IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology	13
2.3	Systemdesign	20
2.3.1	Fasta plana gruppantennor	20
2.3.2	Rörliga plana gruppantennor	20
2.3.3	Icke plana gruppantennor	21
2.3.4	Bredbandiga gruppantennor	22
3	Resurshantering	23
3.1	Hur sensorstyrning och sensorhantering fungerar	24
3.2	Implementering och trender	25
4	Signalbehandling	27
4.1	Metoder och tekniker	27
4.1.1	Digital Beamforming	27
4.1.2	Space Time Adaptive Processing	27
4.1.3	SAR/ISAR	27
4.1.4	Multiple Input Multiple Output	28
4.1.5	Compressed Sensing	28
5	Teknologier	29
5.1	AESA/PESA	29
5.2	Uttunnade arrayer	30
5.3	Material	30
5.3.1	Si	30
5.3.2	GaAs	30
5.3.3	InP	30
5.3.4	SiC	31
5.3.5	GaN	31

5.3.6	SiGe	31
5.4	A/D-omvandlare	31
6	Referenser	33

1 Inledning

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

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

I många fall realiserar flexibla systemlösningar med gruppantennor, där flera enskilda antennelement fungerar som en stor antenn. Genom att styra faskången för varje enskilt antennelement kan antennens lobriktning styras till önskad riktning, vilket ger en stor flexibilitet, men innebär även att det inte längre behövs mekaniska delar för rotering av antennen vilka både är kostnads och underhållskrävande.

Exempelvis använder sig USA i nuläget av nio olika typer av radarsystem för flygtrafikledning och väderadarapplikationer. Dessa planeras att istället ersättas med endast ett radarsystem och med färre enheter än nuvarande, se avsnitt 2.2.1.

Även för fartygsapplikationer, där tillgängligt utrymme för antenner och sensorer tidigare varit relativt generöst tilltaget ser man att det börjar bli trångt. Thales i Nederländerna har tagit till sig problemet och utvecklat en integrerad mast, "the integrated modular mast", där E/O-sensorer och radarsensorer för flera olika frekvensband och samt kommunikationsfunktioner ingår. Se vidare avsnitt 2.1.2 och 2.2.2.

Inom rymdområdet finns redan i dagsläget exempel på system bestyckade med gruppantennor. Trenden för framtida SAR-satellitssystem är förbättrad upplösning (< 1 m på X-bandet och drygt 1 m på C-bandet), fullpolarimetrisk förmåga och interferometri via enkelpassageflygningar. I nuläget är den mest avancerade tekniken som är i bruk inom ESA, European Space Agency, baserad på faskstörd gruppantenneteknik med analog lobformning. Nästa planerade steg är dock att använda sig av faskstörd gruppantenneteknik med digital lobformning, se avsnitt 2.1.1.

Sensorstyrning och sensorhanterings implementeringstekniker har principiellt inte ändrats så mycket på senare tid. Det främsta som hänt är att den teoretiska förståelsen för problemområdet ökat, liksom vår förmåga att hantera komplexa programsystem. Dessutom har våra datorers kapacitet också ökat vilket tillsammans gjort att implementeringstekniker baserat på informationsteori och optimeringslära ökat i intresse. I avsnitt 3 redogörs mer ingående om dessa trender.

I avsnitt 5.1 diskuteras arkitekturval där vi kan notera att den förenklade radararkitekturen PESA visas större intresse då tillgången till lågförlustiga fasskiftare genom att MEMS-tekniken prestandamässigt börjar bli en mogen teknik.

1.1 Trender i omvärlden

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

- Trenden mot mer och mer avancerade gruppantennsystem fortsätter. Drivande faktorer innefattar teknikutvecklingen, med dess nya möjligheter, samt platsbrist på plattformar genom allt fler system som integreras på plattformarna, exempel på detta är Thales IM400.
- Efterfrågan av kostnadseffektiva systemlösningar med låga driftskostnader gör multifunktionella system alltmer attraktiva då det går att reducera antal olika system. Exempel på detta är det amerikanska MPAR-systemet för kombinerad flygledning och väderradar.
- Inom stridsflygplansområdet har elektriskt styrda gruppantennsystem fått fotfäste. Exempelvis är amerikanska F-22A bestyckad med en multifunktionsradar.
- Forskningen inom resurshanteringsområdet går framåt, dock inte lika snabbt som hårdvaruutvecklingen. En utökad forskningsinsats krävs för att kunna använda resurserna mer optimalt.
- MEMS-baserade fasskiftare uppnår allt lägre förluster vilket gör att radararkitekturer av PESA-typ börjar bli konkurrenskraftig prestandamässigt med AESA-arkitekturen.
- Utvecklingen inom A/D-omvandlare fortgår i oförändrad takt mot högre dynamik och snabbare samplingstakter. Utvecklingstakten är nära en bit per fem år för en given samplingshastighet.

2 Tillämpningar

2.1 Exempel på operativa system

Det finns en mängd operativa radarsystem som bygger på multifunktionell gruppantenn-teknik. Ett urval av system i bruk presenteras nedan.

2.1.1 TerraSAR-X

Ett flertal rymdbaserade system för SAR-applikationer (Syntetisk AperturRadar) är i bruk, Cosmo-Skymed, Envisat, RADARSAT-2 och TerraSAR-X för att nämna några. TerraSAR-X är en radarsatellit för jordobservation utvecklad av DLR och EADS Astrium i Tyskland. Dess huvudsakliga sensor är en X-bandsradar av SAR-typ. Satelliten skickades upp i juni 2007 och förklarades i drift i januari 2008. Satelliten ger löpande SAR-bilder, där olika registreringsmoder kan väljas såsom SpotLight, StripMap och ScanSAR. Förväntad livslängd för satelliten är fem år vilket nu har presenterats.

Satelliten är inte uteslutande för forskningsändamål utan delvis även kommersiell och SAR-data går att beställa för ett önskat område för några tusen euro beroende av produkttyp och förädlingsgrad [1].

Egenskaper för antennen och tekniska data för TerraSAR-X systemet presenteras i Tabell 1 och Tabell 2 nedan [2].

Tabell 1: Egenskaper för antennen på TerraSAR-X.

Pulseffekt	2 kW
Antennstorlek	0.7 x 4.8 m ²
Antal T/R-moduler	384
Scanvinkel i elevation	20°/45°
Bandbredd	150/300 MHz
Frekvens	9.65 GHz
Polarisation	- Enkel VV, HH - Dubbel VV-HH, HH-HV, VV-VH

Tabell 2: Tekniska data för TerraSAR-X systemet.

Prestanda	SpotLight Mod	StripMap Mod	ScanSAR Mod
Upplösning - avstånd [m] - flygled [m]	1 1	3 3	16 16
Täckning avstånd x flygled [km]	10 x 5	30 x 1500	100 x 1500
Känslighet - Typisk [dB] (NESZ) - Sämsta fall [dB]	-20 -16	-22 -19	-21 -19

2.1.2 APAR

Active Phased Array Antenna (APAR) [3] är en multifunktionsradar från Thales i Nederländerna för sjömissilstyrning och skydd. Systemet använder sig av digital gruppantennsteknik och består av fyra paneler (fler än 3000 sändar- och mottagarmoduler per panel) för runtomtäckning. Flera simultana mål kan följas. Figur 1 visar radarn monterad på ett fartyg. Själva antensystemet är masten placerat i mittdelen på fartyget.



Figur 1: Multifunktionsradarn APAR monterad på fartyg [3].

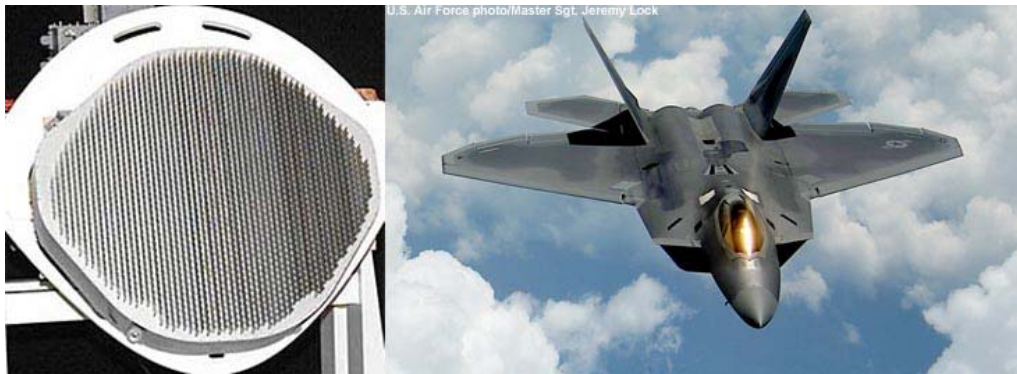
APAR-radarn opererar på X-bandet och har en räckvidd på upp mot 150 km för luftmål. Den har en hög undertryckning av klotter genom att den använder sig av högupplöst dopplerprocessning. Den är även robust mot störning och har även inbyggd signalspaningsfunktionalitet.

2.1.3 APG-77 AESA

Radarn APG-77 AESA tillverkas av Northrop Grumman och finns i stridsflygplanet F-22A Raptor [4]. Radarn har en fast nosmonterad AESA med ca 1500 sändar- och mottagarmoduler. Antennen är bredbandig och arbetar kring X-bandet. Radarn är en multifunktionsradar för spaning och inmätning av luftmål och ytmål men den har även andra funktioner som kommunikation, signalspaning och störning. Figur 2 visar den ellipsformade AESA-nosantennen och stridsflygplanet F-22A Raptor.

Radarn integreras med andra system i flygplanet för att få avancerad omvärldsuppfattning, vapenstyrning, egenskydd och samverkan med andra flygplan och system. Radarn har förutom radarmoder för upptäckt och följning också moder för måligenkänning via ISAR (invers SAR) och lågsignaturuppträdande via LPI-teknik (Low Probability of Detection). Dess räckvidd är över 150 km mot luftmål.

Radarn håller på att utvecklas med nya funktioner som högupplösande avbildning (SAR), datalänk med hög hastighet, riktad störsändning och geolokalisering. De tidigare planerade sidtittande AESA-panelerna för bättre täckningsområde verkar i dagsläget inte komma att utvecklas.



Figur 2: Multifunktionsradarn AN/APG-77 AESA och stridsflygplanet F-22A Raptor [4].

2.1.4 Super Green Pine

Radarn Super Green Pine tillverkas av Elta/IAI i Israel och ingår i ABM systemet Arrow för försvar mot ballistiska robotar [5]. Radarn har en AESA med över 2000 sändar- och mottagarmoduler. Antennen är bredbandig och arbetar kring L-bandet. Systemets huvuduppgift är spaning och följning av ballistiska robotar samt styrning av Arrow robotar. Radarn kan också användas för störning eller som HPM vapen. Figur 3 visar den 9 m x 3 m stora antennen som också är mekaniskt styrbar.



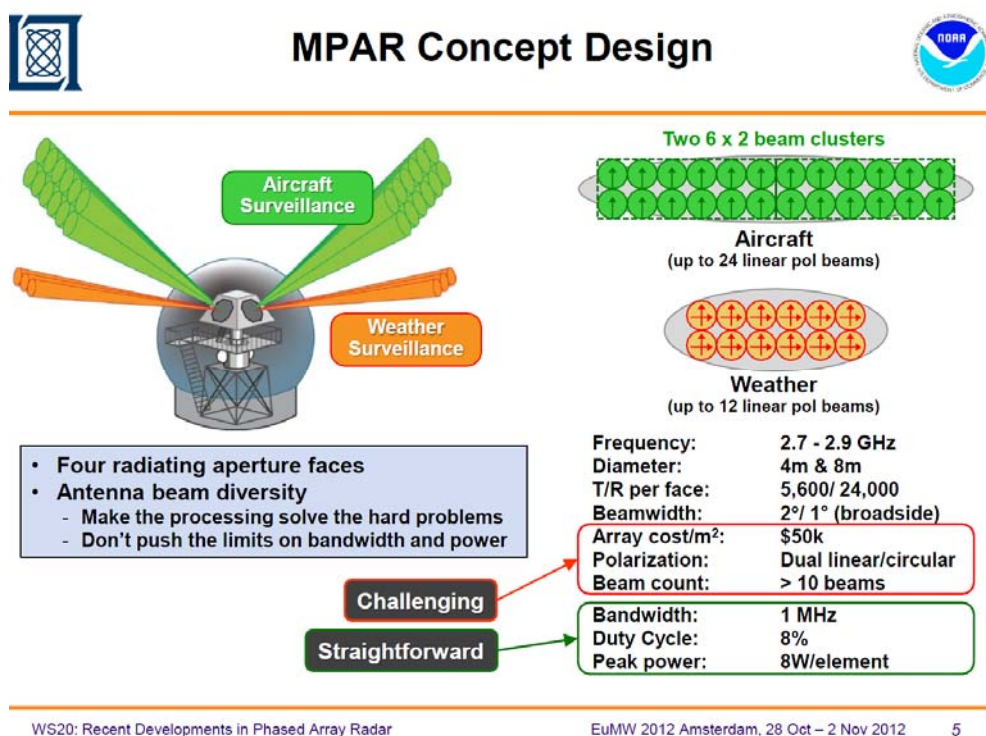
Figur 3: Super Green Pine multifunktionsradar för Arrow ABM system [5].

2.2 Pågående utvecklingsprojekt

2.2.1 MPAR

MPAR står för Multifunction Phased Array Radar och är ett projekt i USA med målsättning att kombinera flyglednings och väderradarfunktioner. Dagens 554 radarsystem av nio olika typer för funktionerna ska ersättas med 366 enheter av en och samma typ [6]. Många av systemen i operativ drift är gamla och behöver bytas ut. Man ser även en stor förbättringspotential i prestanda och underhåll med MPAR i jämförelse med existerande system, exempelvis bedöms noggrannheten förbättras, ny funktionalitet som fågel-detektion kunna införas, en tidigare varning för dåligt väder liksom en minskning av falsklarm med bibehållen eller förbättrad detektionssannolikhet.

Utvecklingen har inletts med en konceptdesign av MPAR bestående av fyra antennarrayer placerade med 90 graders vinkel mot varandra, där upp till 24 lobber kan bildas genom en kombination av analog och digital lobformning, se Figur 4.



Figur 4: MPAR konceptdesign, översikt [6].

Antennelementen används för både sändning och mottagning och varje element är bestyckade med både effektförstärkare och lågbrusförstärkare, dvs. en typisk AESA topologi. Systemet arbetar på S-bandet och realiserar en lobstorlek av $2^\circ \times 1^\circ$ via de flera tusen T/R-modulerna (Transmit/Receive), se Figur 4.

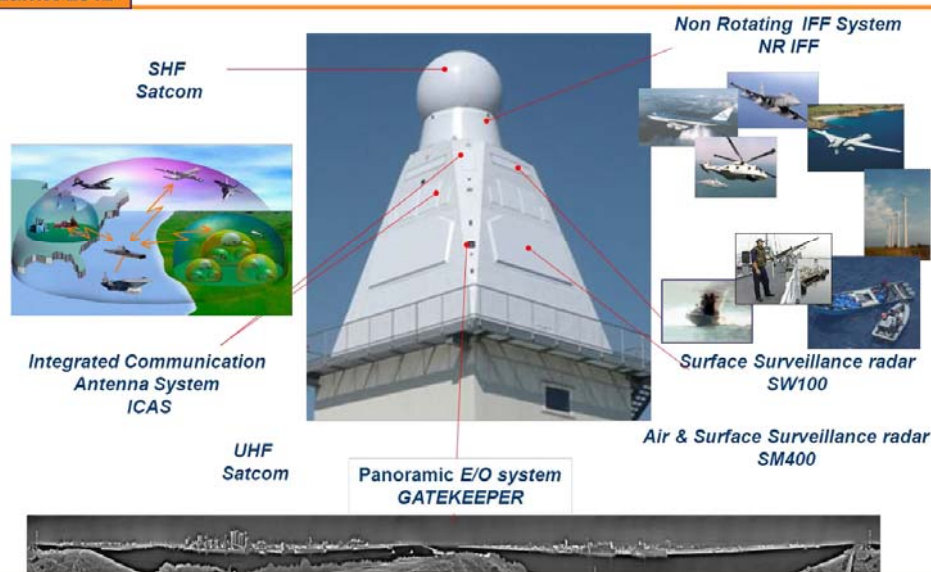
2.2.2 IM400

Thales Nederland har utvecklat IM400 [7], en integrerad mast, där flertalet radar och optiska sensorer ingår, se Figur 5. Digital lobformning nyttjas för att bilda flera samtidigt

lober. Systemet innefattar, förutom radar och optiska funktioner, även kommunikations-länkar. De första färdiga systemen har nyligen färdigställts och börjat levereras till kund. Enligt ett kortfattat datablad är radarn runtomtäckande med räckvidden 250 km mot luftmål. Systemet inkluderar även en ytsökradarfunktion som arbetar på X-bandet och Ku-bandet med funktionalitet på 40 km för upptäckt av små sjömål, periskop och minor samt som stöd vid helikopterassistans. ESM, Electronic Support Measures, finns mellan 0.5 GHz till 18 GHz. Hela systemet är $8 \times 8 \times 13.6 \text{ m}^3$ stort och väger 52 ton.



The integrated modular mast



WS20: Recent Developments in Phased Array Radar

EuMW 2012 Amsterdam, 28 Oct – 2 Nov 2012

6

Figur 5: Thales Nederlands Integrated Mast (IM400) [8].

2.2.3 Intryck från IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology

IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology är en konferens där multifunktionella gruppantennsystem passar väl in att presenteras. Den har hittills hållits var sjunde år, 1996, 2003 och 2010, men återkommer redan hösten 2013.

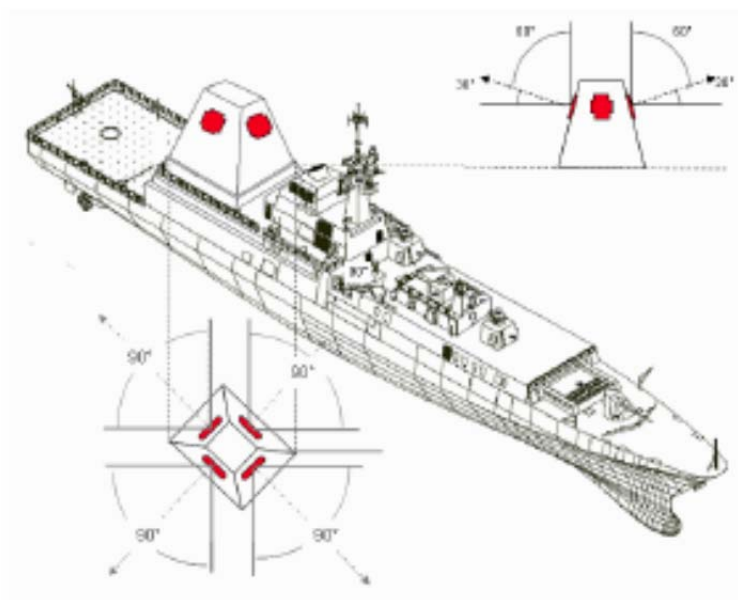
De flesta multifunktionssystem som presenterats vid dessa tillfällen är egentligen multifunktionsradar och är därför, i sammanhanget, relativt smalbandiga. Några intressanta bidrag, från det senaste tillfället (Waltham-Boston, USA, 12-15 Oct. 2010) refereras kortfattat i avsnitt 2.2.3.1 till 2.2.3.6. Alla figurer i avsnittet (2.2.3) är hämtade från ovanstående konferens.

2.2.3.1 Phased Array Systems and Technologies in SELEX-Sistemi Integrati: State of Art and New Challenges av Cetronio, D'Urso, Farina, Lanzieri, Timmoneri, Teglia

Denna är en uppföljare till presentationer både år 1996 och 2003.

SELEX-Sistemi Integrati var deltagare i det gemensamma svensk-italienska MAESA-projektet (Multifunction/multirole Active Electronically Steered Array) där spanings-

radar, eldledningsradar såväl som ESM och ECM (Electronic Counter Measure) samt kommunikation ska integreras i samma system. Figur 6 nedan visar MAESA-konceptet på ett fartyg.

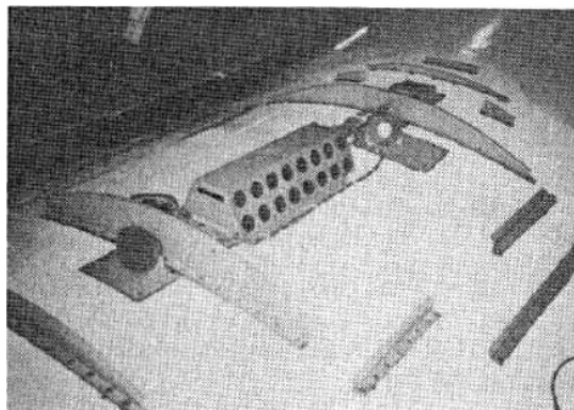


Figur 6: MAESA marin tillämpning.

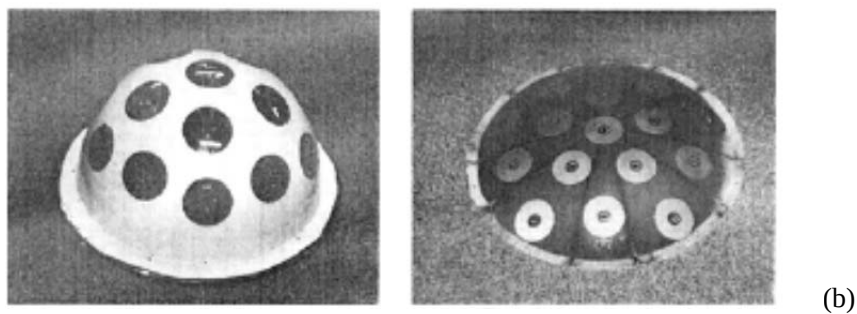
Även andra radarsystem, EMPAR, KRONOS, presenteras kortfattat. Genomgången är ganska översiktlig.

2.2.3.2 Progress of Phased Array Systems in Japan av Chiba, Konishi, Nishino

Detta är en översiktlig genomgång av japanska ansträngningar de senaste decennierna. Författarna är från Mitsubishi. Det mesta som redovisas är avsett för radar eller satellit-tillämpningar. I Japan har det under de senaste åren producerats flera intressanta konforma arrayer. Några exempel visas i Figur 7.



(a)



(b)

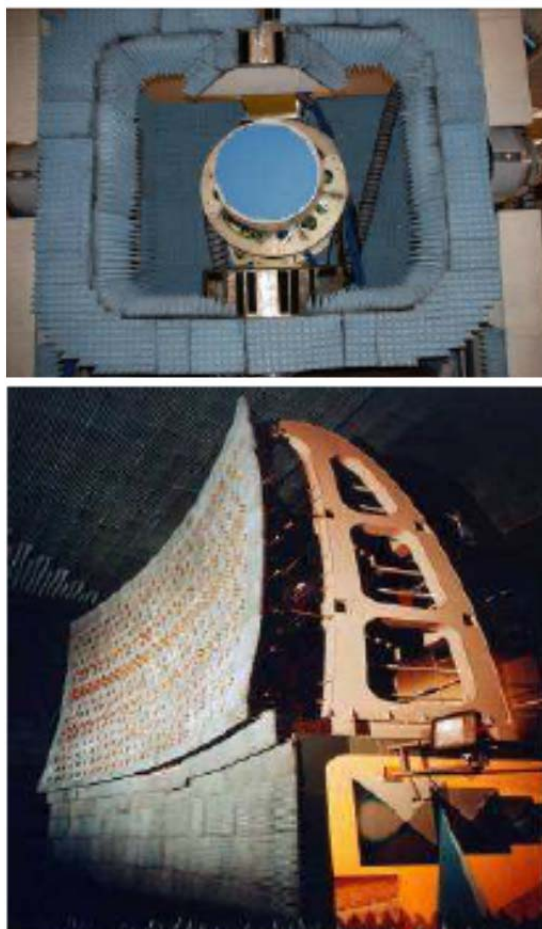


(c)

Figur 7: Gruppantenner för satellitkommunikation. L-bandsantenn på en flygplansrygg (a). Två sfäriska gruppantenner (b). En S-bandsantenn med helix-element (c).

2.2.3.3 AMSAR – A France-UK-Germany success story in active-array radar av Milin, Moore, Bürger, Triboulloy, Royden, Gerster

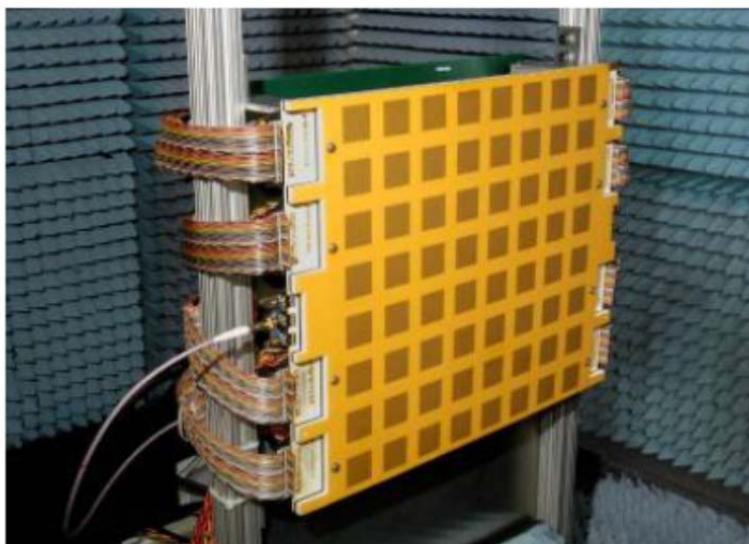
Beskriver tankar och uppbyggnad av AMSAR (Airborne Multi-role Solid-state Active-array Radar). De olika författarna är från DGA, Thales, DSTL, SELEX, FGAN/FHR, och EADS. En del utrymme ägnas åt mät och kalibreringsfrågor liksom systemtester i det franska "hardware-in-the-loop" testsystemet BEDYRA vilket visas i Figur 8.



Figur 8: AMSAR vid test i "hardware-in-the-loop" systemet BEDYRA och systemets "horn-vägg" som ska simulera mål och störare.

2.2.3.4 Low Cost Multifunction Phased Array Radar Concept av Herd, Duffy, Carlson, Weber, Brigham, Weigland, Cursio

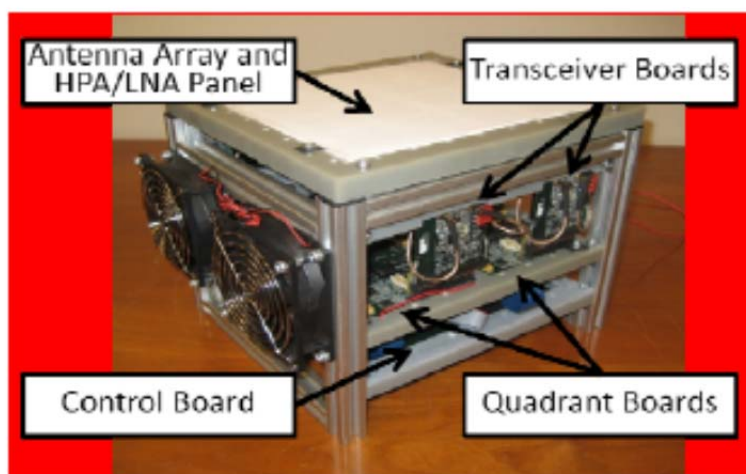
Detta bidrag fokuserar på arrayer med lägre kostnad. Författarna är från MIT Lincoln Lab., och M/A-Com. Detta är ett förslag till det amerikanska MPAR för flygledning. Systemet beskrevs tidigare i avsnitt 2.2.1 och Figur 9 visar en lågkostnadspanel med 64 element som mäts i en närfälts-mätsträcka.



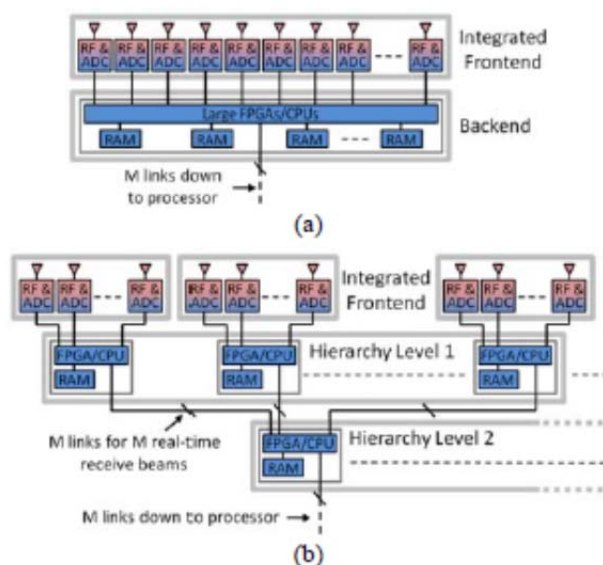
Figur 9: En lågkostnadspanel med 64 element under mätning i en närfälts-mätsträcka.

2.2.3.5 Digital Array Radar (DAR) Panel Development av Chappell, Fulton.

Författarna är från Purdue University. Bidraget behandlar ett viktigt delproblem inom gruppantennor, nämligen hur man bygger samman kommersiella datorer, hög-integrerade sändare-mottagare och nya halvledare med stort bandgap till en kompakt och relativt komplett subarray. Figur 10 visar en komplett subarray för S-bandet med digital lobformning och Figur 11 visar några av delarkitekturerna som behandlas i studien.



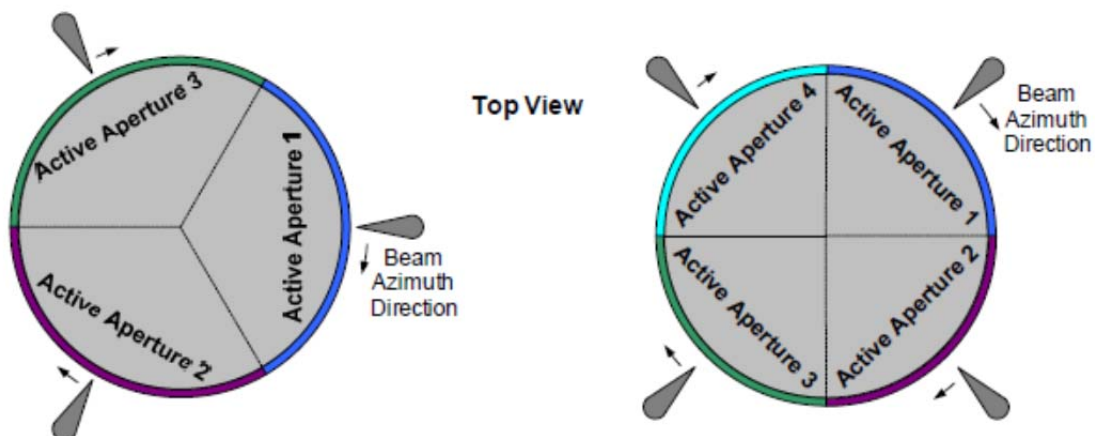
Figur 10: Komplet subarray för Digital Array Radar (DAR) som utvecklas för amerikanska armén.



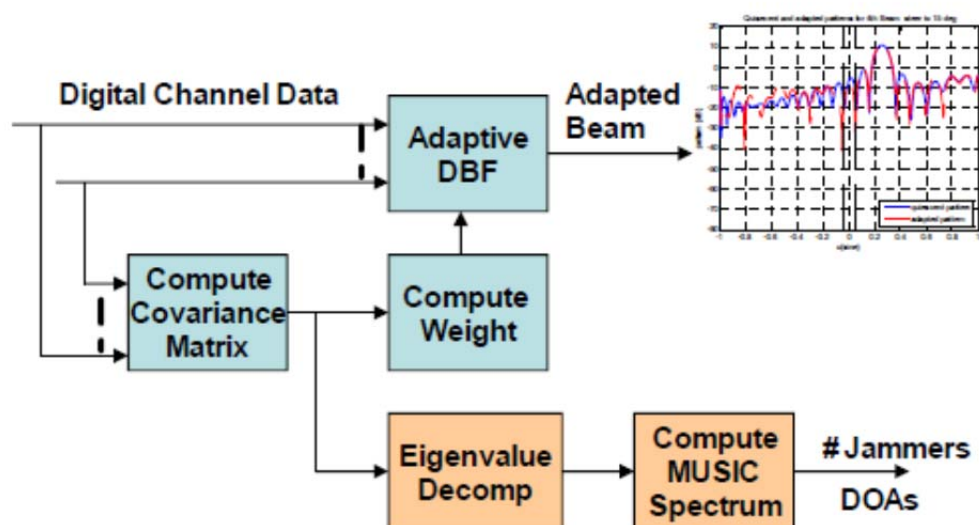
Figur 11: Två studerade arkitekturer på centraliserad respektive hierarkisk lobformare. Ska ses som exempel på frågor som diskuteras i detta papper.

2.2.3.6 Electronic Protection for Digital Shared Aperture Array Radar av Yu, Turner

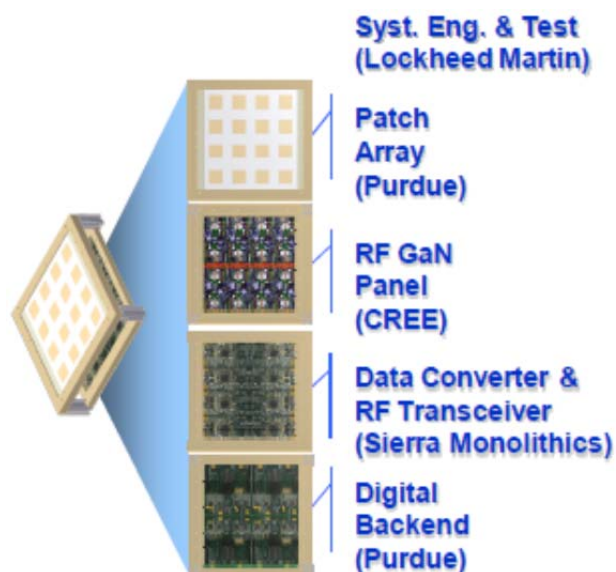
Författarna är från Lockheed Martin. Arrayen består av ett stort antal digitala sändar-subarrayer och mottagarsubarrayer som dynamiskt kan kombineras på olika sätt. Det elektroniska skyddet består av adaptiv störundertryckning vid mottagning. Figur 12, Figur 13 och Figur 14 visar arbetet grafiskt.



Figur 12: Dynamisk aperturindelning för 3 eller 4 sektorssökning.



Figur 13: Blockschemata för den adaptiva störundertryckningen och DOA (Direction Of Arrival)-processeringen.



Figur 14: Layout för prototyppanel DAR dvs. samma utvecklingsprogram som i avsnitt 2.2.3.5.

2.3 Systemdesign

Systemdesign för multifunktionella gruppantennsystem är huvudsakligen inriktad på gruppantennernas utformning och detta gäller speciellt för AESA baserade system. Man kan indela systemlösningarna efter antennytoras utformning i fasta plana gruppantenner, rörliga plana gruppantenner, icke plana gruppantenner eller bredbandiga gruppantenner.

2.3.1 Fasta plana gruppantenner

Fasta plana gruppantenner används när man kan bestämma antennernas täckningsområden i relation till multifunktionssystemets plattform. Oftast är täckningsområdet begränsat till en konisk volym med 60° vinkel från normalriktningen. Detta gör att plattformen måste manövrera för att ändra täckningsområdet eller att plattformen måste ha flera antenner riktade åt olika håll så att de gemensamt täcker den önskade täckningsvolymen.

Ett exempel på den första typen är vårt eget flygburna spaningssystem ASC 890 med radarn PS-890 som har en AESA med två antennytor riktade till höger och till vänster om flygriktningen. Man kan använda en antennyta åt gången för att täcka en 120° sektor. För att täcka en sektor framåt eller bakåt måste flygplanet svänga 90°. Exempel på den andra typen ges i Figur 15 som visar ett fartyg med fyra fasta plana gruppantenner för runtom täckning [9] och en markbaserad ABM radar med två fasta plana gruppantenner för 240° täckning [10]. I det senare fallet är det inte praktiskt möjligt att ha mekanisk styrning.



Figur 15: Aegis SPY-1D radar på Arleigh Burke och PAVE PAWS på Clear AFS, Alaska [9] [10].

2.3.2 Rörliga plana gruppantenner

Rörliga plana gruppantenner används när man har en eller två antennytor som måste täcka en större volym än den koniska volym som varje antennyta ger. De rörliga plana gruppantennerna styrs mekaniskt till önskad täckningsvolym. Detta gör att man inte momentant kan täcka hela den möjliga täckningsvolymen. Den mekaniska styrningen kan vara rotation kring en axel för att rikta antennen mot en viss täckningsvolym eller för att kontinuerligt rotera antennen för runtomtäckning.

Ett exempel på ett flygburet system visas i Figur 16 som har rotation kring en rollaxel för att få framåtriktade och sidriktade täckningsvolymen [11]. Ett exempel på ett markbaserat system som har rotation kring en vertikalaxel för att få runtomtäckning visas i Figur 17 [12]. I båda dessa system stannar antennen efter inriktning under en viss tid för att genomföra önskade radarfunktioner.



Figur 16: ES-05 Raven AESA vid X-band utvecklad för Gripen [11].



Figur 17: MEADS UHF-band spaningsradar och MEADS X-band eldledningsradar [12].

2.3.3 Icke plana gruppantenner

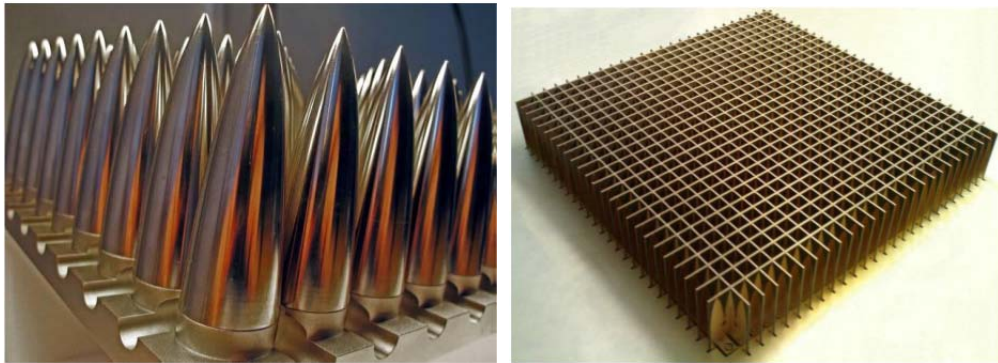
Icke plana gruppantenner används när man behöver styra huvudloben utanför det koniska täckningsområdet som en plan gruppantenn ger, men utan mekanisk styrning eller flera gruppantenner. Det vanligaste kravet är runtomtäckning som kan lösas med cylindriska gruppantenner. En alternativ lösning är kombinationer av plana gruppantenner och linjära gruppantenner som kan styras till olika täckningsvolymmer för att få runtomtäckning. Ett exempel på detta visas i Figur 18 som har plana gruppantenner för täckning åt sidorna och en linjär gruppantenn (end-fire array) för täckning framåt och bakåt [13].



Figur 18: Wedgetail AEW&C MESA Radar vid L-band [13].

2.3.4 Bredbandiga gruppantenner

Gruppantenner med mer än ca 10 % bandbredd används för bredbandiga radarfunktioner som SAR, ISAR och HRR (High Resolution Radar) och för att integrera andra funktioner som ESM, ECM, IFF (Identification Friend or Foe) och kommunikation i samma gruppantenn. Bredbandiga multifunktionella gruppantenner har utvecklats för ett fåtal system. Ett exempel är det amerikanska konceptet AMRFC (The Advanced Multifunction RF Concept) för fartygstillämpningar. Ett annat exempel är projektet M-AESA mellan Italien och Sverige som syftade till att utveckla tekniker för bredbandiga multifunktionella gruppantenner [14]. Två typer av bredbandiga gruppantenner visas i Figur 19.



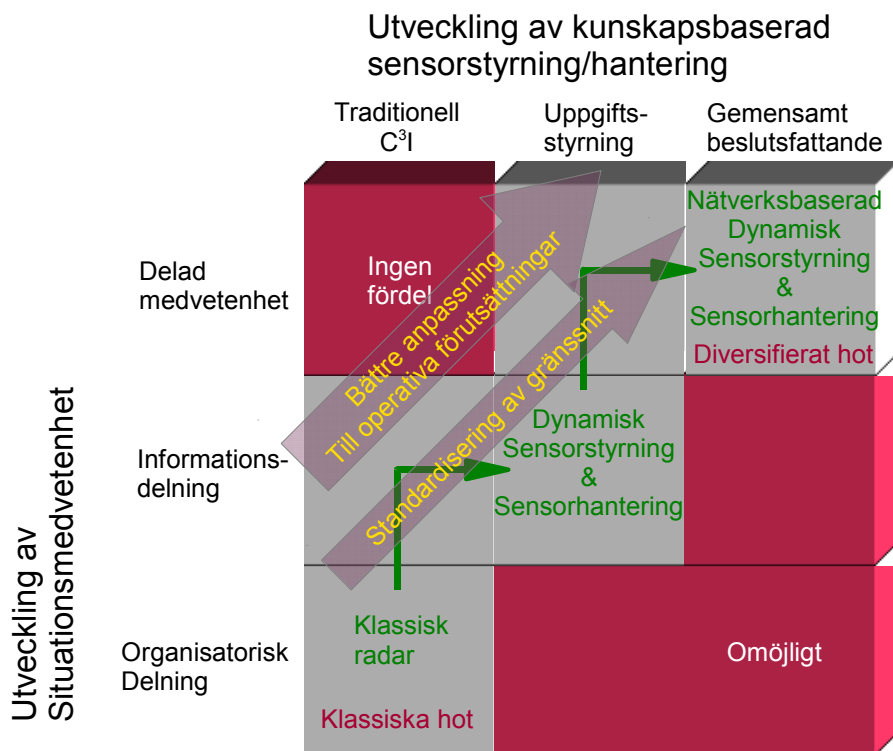
Figur 19: M-AESA gruppantenner med BOR-element och Vivaldi-element [14].

3 Resurshantering

Ett traditionellt ledningssystem är en centraliserad arkitektur så tillvida att det skall stödja en chef i slutändan. Detta system bygger på att chefen stöds av en hierarkisk organisation som i sin tur har de tekniska resurserna till sitt förfogande. Det tekniska systemet har specificerats utgående från behov som finns i denna organisation utan större hänsyn till kommande förändringar i denna struktur.

Trenden är nu istället att försöka skapa ett tekniskt system av resurser som genom att användas och kombineras på olika sätt ska kunna stödja helt andra organisationer och verksamheter än den ursprungliga tänkta användningen. Detta innebär en dynamisk nätbaserad struktur som kan skicka bearbetad eller skapad information och ta emot styrning från många olika håll. Detta ställer helt nya krav på system som optimerar detaljer i det som faktiskt utförs och som också i förväg kan uppskatta ”nyttan” med att använda resursen i fråga.

Figur 20 bygger på ett arbete [15] som presenterats vid European Microwave Week 2012, och försöker åskådliggöra den trend som har pågått under en längre tid, men som troligen kommer att accelerera. För radarsensorer befinner vi oss just nu i mitten, dvs vi har en dynamisk sensorstyrning och sensorhantering av första generationen av enskilda sensorer. Utvecklingen går stadigt mot ökad flexibilitet och mer distribuerad funktionalitet.

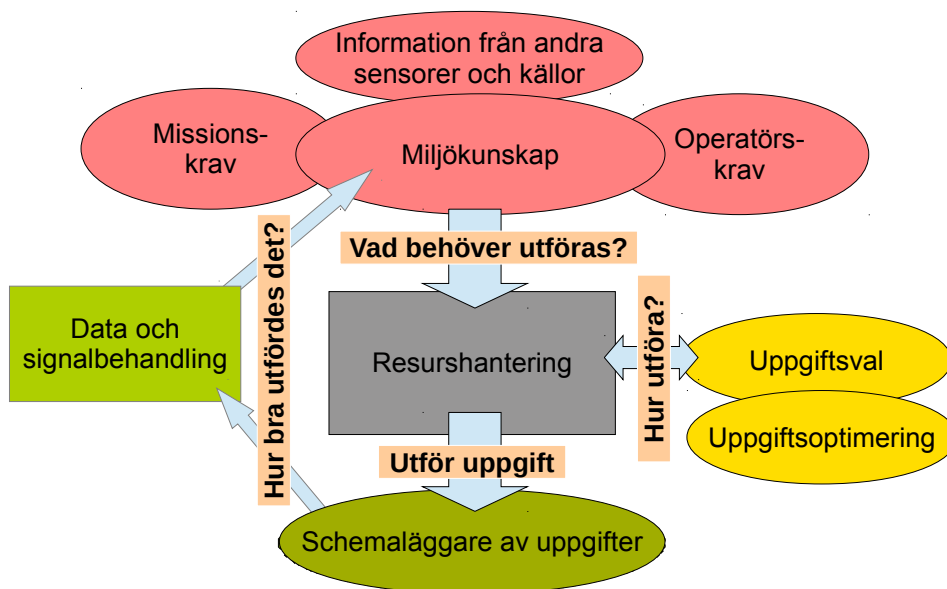


Figur 20: Utveckling mot mer distribuerad situationsuppfattning och beslutsfattande. (bild efter idé från [15]).

Drivkrafterna är i första hand en bättre operativ anpassningsförmåga som möjliggörs av den tekniska utveckling på dator- och kommunikationsområdena. En annan förutsättning är ansträngningar för att standardisera gränssnitt mm som möjliggör större marknader och specialisering på delsystemområden. Detta är dock ett eftersatt område idag.

3.1 Hur sensorstyrning och sensorhantering fungerar

Det är svårt att skilja på vad som är sensor(resurs)hantering och vad som är sensorstyrning. Uppfattningarna skiljer sig åt beroende på vem man frågar. Vi brukar tala om detta i ett enda sammanhang eftersom funktionerna hänger mycket tätt ihop och utvecklingen går mot allt tätare hopkoppling. Figur 21 beskriver hur en sammanslagen funktion, här kallad resurshantering, interagerar med sin omgivning.



Figur 21: Resurshantering är spindeln i nätet som bestämmer vilka uppgifter som behöver utföras och hur detta skall utföras (bild efter idé från [15]).

Hela funktionen kretsar kring fyra aktiviteter som kortfattat kan beskrivas: *Vilka mätningar behöver göras? Hur utföra nödvändiga mätningar? Hantera utförandet av beslutade mätningar och Hur väl blev det utfört?* Alla dessa aktiviteter hänger samman och påverkar varandra.

- Många faktorer bestämmer vad som behöver mätas. Det uppenbara är självklart det som operatören eller operatörerna önskar veta mer om. Sedan kommer uppgifter om själva uppdraget (missionen) in, liksom hur miljön i vid bemärkelse ser ut. Dessutom utgår man från vad som tidigare mätts in av andra sensorer eller på annat sätt.
- I valet av vilka mätaaktiviteter eller andra relaterade aktiviteter, t.ex. att förflytta plattformen, som skall göras så måste man först göra en uppskattning av konsekvenser av aktiviteten ifråga i termer av relativ nytta och kostnader. Vad som menas med nytta och kostnad är en funktion av förutsättningarna.
- När valet av aktiviteter är gjort skall utförandet av dem optimeras så att de kan utföras i tiden på ett så optimalt sätt som möjligt. Man lägger då en detaljerad plan.
- Själva utförandet av planen kan förefalla relativt enkelt, men i flera tillämpningar önskas en kortslutningsfunktion för sådant som har med plattformens direkta skydd att göra, t.ex. avledning av attackerande robot. Sådana aktiviteter skapar givetvis oreda i planen som måste hanteras.

- Frågan hur bra det gick är dels en funktion av resultat av gjorda mätningar, vilket understöds av signalbehandling på olika sätt, och dels de krav och önskemål som uppdraget, sammanhanget och operatörerna ställt.

3.2 Implementering och trender

Ett faktum som gällt tidigare och som inte förändrats under senare år är att komplexiteten kring resurshantering är det stora bekymret. Det finns flera följder av komplexiteten t.ex. att det är svårt att specificera funktionen i sin helhet. Funktioner kan krävas var och en för sig, men hur de ska påverkas av alla tänkbara fall hur övriga funktioner används mm är inte uppenbart. Det är också svårt att implementera efter en vag och föränderlig specifikation och det är i princip omöjligt att testa alla tänkbara funktionsfall med önskade och icke önskade utfall. Det traditionella sättet att kräva en funktion fungerar med andra ord dåligt på resurshantering/styrning.

Resurshanteringsfunktionerna har implementerats på en rad olika sätt i de system som fram till nu presenterats. De har alla för- och nackdelar.

- Direkt programmerad funktion men användning av någon teoretisk grund t.ex. informationsteori. Största fördelen är just den teoretiska bakgrunden som gör funktionen relativt lätt att analysera. Främsta nackdel ligger i en mycket komplex programmering och datahantering samt stort beräkningsbehov.
- Regelbaserad programmering med hjälp av specialspråk. Den främsta fördelen är ett enkelt koncept som fungerar robust och förutsebart då regelbasen är relativt liten. Den främsta nackdelen är att det blir svårare och svårare att införa nya eller modifiera gamla regler ju större den samlade regelbasen växer. Svårigheterna som växer exponentiellt med antalet regler ligger i att formulera regler som ger önskad funktion utan att skada andra funktioner och att verifiera detta.
- Artificiell intelligens i olika former, t.ex. neurala nätverk, oskarp logik eller expertsystem. Den främsta fördelen är att mycket komplexa funktioner kan hanteras direkt genom en träningsprocess eller genom att formulera villkor på olika sätt. Dessa tekniker är resonerande vilket innebär att det i förväg är mycket svårt att förutse rätt beteende, vilket försvårar modifiering och underhåll. Ett problem är att en ändring som avsetts ge effekt under speciella omständigheter ibland, oväntat, kan påverka beteendet mycket bredare.
- Hybrider av ovanstående. Genom att blanda ovanstående tekniker har man försökt att välja en för varje system optimal lösning som utnyttjar fördelar och undviker svagheter. Flera av de publicerade ansatserna måste anses som lyckosamma, men det kan vara ett resultat av lämplig modularisering. En nackdel är brist på flexibilitet när väl grundmodulariseringen är gjord och att flera "maskinerier" för att driva de olika modulerna behövs.

Dessa grundläggande implementeringstekniker har varit aktuella sedan vår egen PS-890 togs fram och har inte ändrats speciellt mycket. Det främsta som hänt är att våra datorers kapacitet ökat liksom den teoretiska förståelsen för problemområdet vilket gjort att tekniker baserat på informationsteori och optimeringslära ökat i intresse. Det har till och med skrivits en bok som på ett teoretiskt sätt beskriver sådana tekniker, se [16]. I boken beskrivs en informationsteoretisk ansats som går ut på att uppskatta hur stor den totala systemets osäkerhet (egentligen entropi) blir för olika alternativa val, för att sedan välja det alternativ som resulterar i lägst osäkerhet vid varje beslutstidpunkt. Att göra bra uppskattningar kräver ofta att man gör approximationer eftersom aktuella grunddata inte alltid finns tillgängligt, eller ens kan göras tillgängliga. Alternativen består av olika planerade mätaktioner, varför det är nödvändigt att tidshorisonten hanteras korrekt.

Den allmänna förmågan vad gäller komplexa mjukvarusystem har under de senaste åren ökat i samhället vilket också innebär att de praktiska gränserna för implementeringsteknikerna ovan utvecklas i positiv riktning. Förmågan vad gäller komplexa mjukvarusystem ökar dock med en långsammare takt jämfört med utvecklingen på datorhårdvara.

Viktigt för ett bra och robust systembeteende är att överbelastning hanteras på ett förutsägbart sätt. Överbelastning innebär att operatörerna begär mer än systemet har möjlighet att klara av. Begränsningarna är av fundamental fysikalisk karaktär t.ex att det inte går att sända mer än 100 % av tillgänglig tid, och det går inte att sända med högre än maximal effekt. Att åstadkomma ett robust systembeteende blir svårare och svårare ju större komplexitet vi har genom att mer och mer faktorer måste vägas in. Överbelastning har i de publicerade fallen hanterats med enkla strategier såsom att utesluta operationer med lägsta prioritet, eller att den operation som förväntas ge mest ”nytta i varje tidsögonblick prioriteras. Sådana strategier är inte alltid optimala utan baseras på heuristik, dvs. erfarenhet och tumregler.

Verifiering av resurshanteringsfunktionen sker vanligen genom att testa mot ett antal fall i en simulator och bygga upp statistik. Observera att det inte finns några garantier, efter ett lyckosamt sådant test, att systemet alltid beter sig bra. Det kan ändå finnas fall med oönskat beteende. En anledning är att totalsystemet är olinjärt, vilket leder till att man måste testa många fall i utfallsrummet. En annan anledning är att en simulator alltid gör förenklingar i modeller mm och aldrig testar oförutsebara problem, annat än genom att kombinera kända fenomen på ett reguljärt sätt. Det är därför önskvärt att någon utvecklar mer formella metoder som kan garantera att utfallet hamnar inom något bestämt intervall. En sådan utveckling kan dock ej skymtas ännu.

4 Signalbehandling

Signalbehandling för multifunktionella gruppantennsystem och multifunktionsradar spelar främst en viktig roll för system med flera digitala mottagarkanalerna. Utvecklingen av snabba A/D-omvandlare och ökad beräkningskapacitet möjliggör alltmer avancerade tekniker och metoder för antennbaserad signalbehandling. Man ersätter också analoga kretsfunktioner med digitala.

4.1 Metoder och tekniker

Här ges en översikt av befintliga och kommande metoder och tekniker för antennbaserad signalbehandling med inriktning mot multifunktionsradar.

4.1.1 Digital Beamforming

Radar med digital lobformning (DBF) är en teknik som använder gruppantennerna med många digitala mottagare för att forma antennloberna digitalt istället för analogt med fasskiftare, tidsskiftare och dämpare före digitalisering. Digitalisering kan göras för individuella antennelement eller för delantennerna för att reducera antalet mottagarkanalerna. I det senare fallet grupperas ett antal antennelement med analog lobformning till en digital mottagarkanal. Detta är den realistiska möjligheten om antalet antennelement i gruppantennen är större än ca 100 i dagsläget.

DBF medger mycket noggrann lobformning med låga sidoloberna och god undertryckning av störsignaler och klotter signaler. Multipla lober kan skapas parallellt utan signalförluster. Olinjära lobformningsmetoder som monopuls är lätta att realisera jämfört med analog lobformning.

DBF används idag i de flesta multifunktionsradarsystem. Välkända tekniker som adaptiv sidolobundertryckning (ASLU), monopuls, interferometri och multilobsystem har implementerats i många multifunktionsradarsystem.

4.1.2 Space Time Adaptive Processing

Radar med adaptiv rum-tidfiltrering (STAP) är en teknik som använder gruppantennerna med många mottagarkanalerna, många radarpulser och många avståndsluckor för att adaptivt undertrycka klotter och störning. Tekniken är mycket beräkningskrävande om ett stort antal kanaler, pulser och avståndsluckor används. Metoden bygger på att klotter och störning kan lokaliseras till begränsade områden i riktning, hastighet och avstånd medan intressanta mål kan detekteras utanför dessa områden.

Vissa multifunktionsradarsystem använder idag STAP för detektering av rörliga markmål medan andra använder enklare icke adaptiva metoder som DPCA (Displaced Phase Center Technique) och GMTI (Ground Moving Target Indication).

4.1.3 SAR/ISAR

SAR och invers SAR (ISAR) är tekniker som kan förbättras med gruppantennerna med många mottagarkanalerna. Digital lobformning och multilobsystem kan förbättra flexibiliteten och täckningen för SAR och ISAR. Gruppantennerna med interferometrikapacitet med flera delantennerna ger nya möjligheter för avbildning och förändringsdetektion.

Många multifunktionsradarsystem använder idag SAR och ISAR.

4.1.4 Multiple Input Multiple Output

Radar med multipla oberoende sändarelement och multipla oberoende mottagarelement (MIMO) är en teknik som använder diversitet för sändaren i form av flera ortogonala signaler som sänds ut i olika delantennor eller antennelement. Man får ökade frihetsgrader genom kombinationen av multipla sändarelement och multipla mottagarelement. Kombinationen bildar virtuella antenner som kan utnyttjas för ökad upplösning och förbättrad täckning.

Metoden används ännu inte i multifunktionsradarsystem men den har undersökts i experimentsystem och demonstratorer.

4.1.5 Compressed Sensing

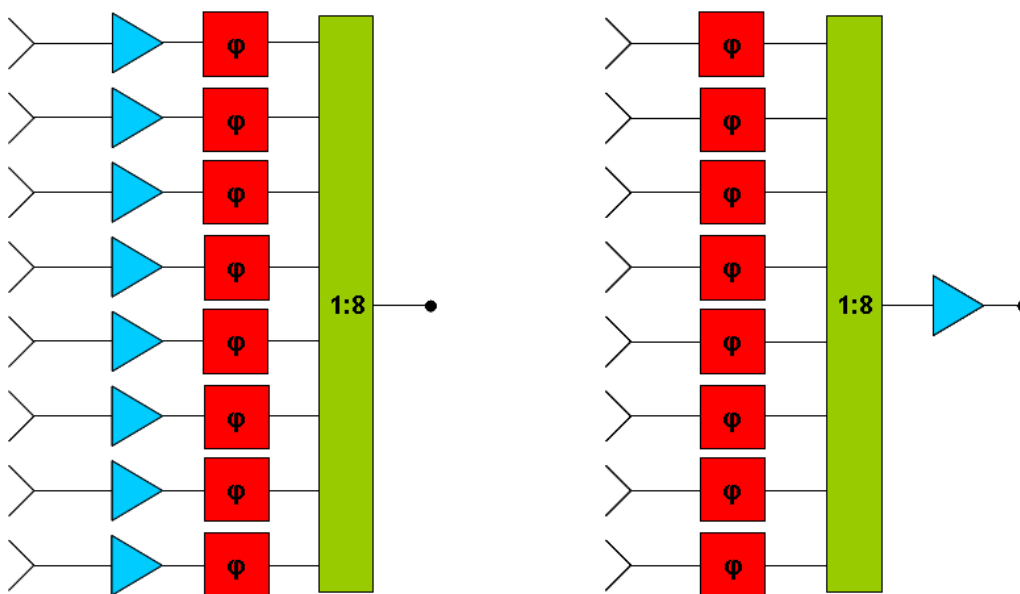
Radar med komprimerade signaler (CS) är en teknik som använder utglesade signaler för att minska samplingsfrekvenser, insamlingstider och hårdvaruresurser. Tekniken kan användas om de önskade signalerna är "glesa" i matematisk mening vilket gör att man kan återskapa signalerna som om de hade insamlats med hög samplingsfrekvens kontinuerligt och med fullbestyckade hårdvaruresurser.

Metoden används ännu inte i multifunktionsradarsystem men den har undersökts i experimentsystem och demonstratorer.

5 Teknologier

5.1 AESA/PESA

AESA och PESA är två arkitekturer för radar där akronymerna står för Active Electronically Scanned Array respektive Passive Electronically Scanned Array. Den grundläggande skillnaden mellan arkitekturerna är antalet lågbrusförstärkare, LNA:er, i mottagarfallet resp. effektförstärkare, PA, i sändarfallet och placeringen av dessa delkomponenter. I Figur 22 visas schematiskt arkitekturerna för mottagarfallet, där AESA visas till vänster och PESA till höger. Generellt ger AESA-arkitekturen en högre prestanda men till en högre kostnad i jämförelse med PESA-arkitekturen på grund av behovet av fler LNA:er respektive PA:s. För PESA blir prestanda i högre grad beroende av förlusterna i fasskiftarna jämfört med AESA eftersom det inte finns någon förstärkning i systemet före dem i PESA-arkitekturen och därmed blir brusfaktorökningen lika stor som fasskiftarförlusten och samma förlust fås vid sändning.



Figur 22: Schematisk bild av AESA- och PESA-arkitektur för mottagarfallet [17].

Som Figur 22 visar är en LNA placerad efter varje antennelement och före fasskiftaren vid AESA, medan fasskiftaren i PESA-fallet är placerad direkt efter antennen med en enda LNA per subarray (delantenn - en mindre gruppering av antenner). Komplexiteten och effektförbrukningen för PESA blir därmed lägre, dock på bekostnad av prestanda. Som tidigare påpekats är prestandaförsämringen för PESA kraftigt beroende av förlusterna i fasskiftarna. I äldre system användes ofta ferritfasskiftare. Dessa hade relativt låga förluster och hög effekttålighet men de var också dyra och klumpiga. Numera används i många fall transistorbaserade fasskiftare, vilka är både billiga och små, men relativt högförlustiga.

PESA visar allt större intresse då tillgången till lågförlustiga fasskiftare spås bli mogen för kommersiellt bruk genom MEMS-tekniken (Micro Electric Mechanical Systems) [18]. Exempelvis innehöll den Europeiska mikrovågsveckan 2010 i Paris en workshop på temat PESA-arkitekturer [19]. Referens [20] från International Microwave Conference 2012 i Montreal presenterade mycket lovande mätresultat för MEMS-baserade fasskiftare vid 15 GHz, 21 GHz, 30 GHz resp. 35 GHz med genomsnittliga förluster på 1.7 dB, 1.8 dB, 2.3 dB resp. 2.7 dB. Dessa resultat är bättre än tidigare presenterade resultat och är i nivå

med det som krävs för att PESA ska vara ett attraktivt alternativ till AESA-arkitekturen. PESA-system med MEMS-kretsar finns redan nu på forskningsstadiet, exempelvis referens [21] som presenterar en basstation som skannar loben för en 4-elementsantenn via MEMS-fasskiftare.

5.2 Uttunnade arrayer

Fasstyrd gruppanter blir ofta mycket komplexa och dyra då det krävs många kanaler för att uppnå en hög upplösning och hög antennvinst. Kravet på att mottagarelementen (mottagarantennar) inte bör placeras mycket glesare än halva våglängden gör att det för många applikationer behövs ett stort antal mottagarantennar och tillhörande kanaler.

En metod att reducera antalet kanaler som krävs, utan att reducera antennens upplösning är att använda sig av uttunnade arrayer [17]. Genom att använda multipla sändarelement, placerade på ett inbördes avstånd av c :a halva våglängden, kan mottagarelementen placeras betydligt glesare än halva våglängden. Avståndet kan nu ökas till sändararray-storleken. Med den här metoden kan antalet nödvändiga mottagarkanaler reduceras från N till $\sqrt{N}$ och det totala antalet antennelement till $2 * \sqrt{N}$. En mätsekvens tar nu $\sqrt{N}$ gånger längre tid, dvs. uppdateringstakten minskas med samma faktor, och en förutsättning för funktionen är att mätscenariot inte ändras för snabbt.

5.3 Material

Det finns många olika material som elektroniska komponenter är byggda av eller byggda på. Material har olika egenskaper som bandgap, värmeutvidgningskoefficient, värmekapacitet och värmeledningsförmåga, elektrisk ledningsförmåga och isolationsegenskap. Beroende på ett materials värden av ovanstående egenskaper blir materialet mer eller mindre lämpligt för olika ändamål som exempelvis hög effekt och lågt brus. Nedan följer en kort beskrivning av vanligt förekommande material och vilken funktion de är bäst lämpade till.

5.3.1 Si

Si, Kisel, är det vanligaste halvledarmaterialet inom elektronikvärlden, bland annat för att det enkelt kan framställas ur vanlig sand [22]. Materialet blir därmed mycket billigt.

Kisel som material passar bra till de flesta applikationer, förutom de allra mest krävande högeffekt- och lågbrusapplikationer där dess bandgap respektive isolerande förmåga inte räcker till.

5.3.2 GaAs

GaAs, GalliumArsenid, har högre elektronmobilitet i jämförelse med kisel, vilket gör materialet lämpligt för höga frekvenser (100-tals GHz) och medför även att mindre brus genereras. Dess relativt stora bandgap innebär att GaAs kan hantera högre effektnivåer än kisel. Dessa egenskaper gör GaAs särskilt lämpat för kretsar i mobiltelefoner, satellitkommunikation, mikrovåglänkar och radarsystem [23].

5.3.3 InP

InP, IndiumFosfid, används vid höga frekvenser på grund av sin stora elektronmobilitet i jämförelse med Si [24]. Materialet genererar även mycket lågt brusnivåer varför det

används för lågbrusapplikationer. Dess bandgap gör även att materialet passar för laser och optoelektronikapplikationer. Den stora nackdelen med InP är att det är ett dyrt material.

5.3.4 SiC

SiC, KiselKarbid, används för högtemperatur- och högeffektsapplikationer genom att dess stora bandgap ger materialet en hög genombrottsspänning samtidigt som en mycket god temperaturlåghet kan uppnås genom dess höga termiska konduktivitet [25]. SiC framställs dessutom från SiO_2 , vilket också gör det billigt att tillverka [26].

5.3.5 GaN

GaN, GalliumNitrid, är likt SiC ett mycket bra material för högeffektsapplikationer genom dess höga bandgap, och är ett mer lämpligt materialval för högfrekvensapplikationer än SiC genom dess högre elektronmobilitet. Dock är dess elektronmobilitet inte lika hög som för GaAs och InP. Den termiska konduktiviteten är dock något sämre än den för Si och betydligt sämre i jämförelse med SiC.

5.3.6 SiGe

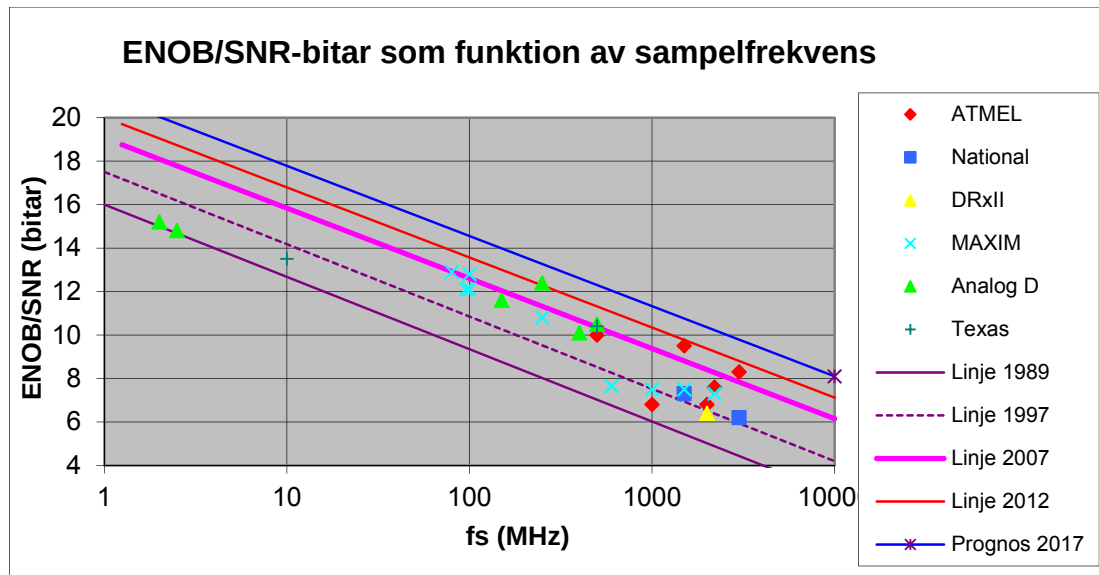
SiGe, KiselGermanium, är ett relativt nytt material med fördelar som att det är lika billigt att tillverka som Si och det har ett flexibelt bandgap, beroende på sammansättningen av antalet Si och Ge atomer i dess gitterstruktur. Bandgapet, vilket är högre än motsvarande för Si ger SiGe bättre effektegenskaper. Materialet har även en högre elektronmobilitet i jämförelse med Si och därmed bättre högfrekvensegenskaper, även om de inte är i klass med GaAs och InP [27].

5.4 A/D-omvandlare

I en tidigare studie på FOI [28] från 2007 sammanställdes state-of-the-art för snabba A/D-omvandlare. En uppdaterad kartläggning visas i Figur 23. Intressant att notera är att studiens prognos av utvecklingen inom området stämde väl och vi ser en lika snabb utvecklingstakt under den senaste femårsperioden som under de tidigare femårsperioderna.

Kartläggningen av omvandlare som är gjord via internet antas ge en indikation på state-of-the-art för A/D-omvandlare. I diagrammet i Figur 23 presenteras omvandlarnas ENOB/SNR-bitar (antal effektiva bitar/signal-till-brusförhållande) mot samplingsfrekvens, vid en infrekvens av $f_s/2$. Trendlinjer, både tillbaka i tiden och prognosen inför framtiden, redovisas. I dagsläget har Analog Devices AD9467 den vassaste redovisade prestandan.

Referens [29] anger en utvecklingstakt på c:a 1.5 bit per 8 år. Figur 23 indikerar intressant nog en liknande utvecklingstakt den senaste 7-8-årsperioden (c:a 1 ENOB bättre per 5 år), med något större tyngdpunkt på utveckling för omvandlare med samplingsfrekvenser runt 100 MHz. Troligen beror detta på att det är den kommersiella marknaden (vanligen med relativt litet bandbreddsbehov) som styr utvecklingen snarare än den militära sidan (ofta stora bandbredds krav).



Figur 23: Prestanda för nu tillgängliga A/D-omvandlare från några av de mer kända leverantörerna. ENOB/SNR-bitar mot samplingsfrekvens, vid en infrekvens av $f_s/2$ samt trendlinjer presenteras.

Det finns flera begränsade faktorer för dynamiken för en A/D-omvandlare. Bland de mer signifikanta kan nämnas termiskt brus, aperturjitter (jitterbrus), tvetydighet och kvantiseringsbrus.

6 Referenser

- [1] http://www2.astrium-geo.com/files/pmedia/public/r463_9_itd-0508-cd-0001-tsx_international_pricelist_en_issue_03.pdf (130408).
- [2] M. Ludwig, "Phased Arrays and Electronic Beam Scanning for Space-borne SAR Systems," Workshop notes WS20: Recent Developments in Phased Array Radar, European Microwave Week 2012, Amsterdam, The Netherlands, 28 Oct. - 2 Nov. 2012.
- [3] http://www.thalesgroup.com/Countries/Netherlands/Documents/Datasheet_APAR/ (130502).
- [4] <http://www.northropgrumman.com/Capabilities/ANAPG77AESARadar/> (130527).
- [5] http://en.wikipedia.org/wiki/EL/M-2080_Green_Pine (130527).
- [6] D. Conway, J. Herd, "Digital Beam Phased Array Radar for Aircraft and Weather Surveillance," Workshop notes WS20: Recent Developments in Phased Array Radar, European Microwave Week 2012, Amsterdam, The Netherlands, 28 Oct. - 2 Nov. 2012.
- [7] http://www.thalesgroup.com/Countries/Netherlands/Documents/Datasheet_I-Mast_400/ (130411).
- [8] R. de Jongh, "Recent advances in naval phased array radar," Workshop notes WS20: Recent Developments in Phased Array Radar, European Microwave Week 2012, Amsterdam, The Netherlands, 28 Oct. - 2 Nov. 2012.
- [9] <http://en.wikipedia.org/wiki/AMDR> (130523).
- [10] http://en.wikipedia.org/wiki/PAVE_PAWS (130523).
- [11] FMV, "Teknisk Und Informerar", Nr 6, 2009.
- [12] <http://en.wikipedia.org/wiki/MEADS> (130523).
- [13] <http://www.ausairpower.net/APA-Wedgetail-Antennas.html> (130527).
- [14] FMV, "Final Report M-AESA Phase 2", 11FMV3095-1:1, 2011-04-15.
- [15] F. Barbaresco, "Evolution of New Generation Multifunction Radars," Workshop notes WS05: Principles of Radar Resources Management, European Microwave Week 2012, Amsterdam, The Netherlands, 28 Oct. - 2 Nov. 2012.
- [16] A.O. Hero, D. Castañón, D.Cochran, K. Kastella (Eds.), "Foundations and Applications of Sensor Management", New York, NY, Springer, 2008, ISBN 978-0-387-27892-6.
- [17] A. Gustafsson et. al., "Mikrovågssystem för 3D-markspaning 2010", FOI-D--0383--SE.
- [18] <http://sem-proceedings.com/04s/sem.org-SEM-X-Int-Cong-s029p02-Invited-RF-MEMS-Switches-Antenna-Applications.pdf> (130612).
- [19] P. Eudeline, K. Van KaekenBerghe et. al., "System & Technology Aspects of Future Passive and Active Phased Array Radars," Workshop WFW01, European Microwave Week 2010, Paris, France, 26 Sept. - 1 Oct. 2010.
- [20] B. Pillans et al., "Advances in RF MEMS phase shifters from 15 GHz to 35 GHz," in 2012 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., Montreal, Quebec, June 2012.
- [21] Chih-Hsiang Ko et. al., "An Electronically-Scanned 1.8–2.1 GHz Base-Station Antenna Using Packaged High-Reliability RF MEMS Phase Shifters," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 61, no. 2, Feb. 2013.
- [22] <http://en.wikipedia.org/wiki/Silicon> (130502).
- [23] <http://en.wikipedia.org/wiki/GaAs> (130502).

- [24] <http://en.wikipedia.org/wiki/InP> (130502).
- [25] http://www.digikey.com/Web%20Export/Supplier%20Content/Microsemi_278/PDF/Microsemi_GalliumNitride_VS_SiliconCarbide.pdf?redirected=1 (130502).
- [26] <http://en.wikipedia.org/wiki/SiC> (130502).
- [27] <http://en.wikipedia.org/wiki/SiGe> (130502).
- [28] B. Andersson, D. Eklund, A. Gustafsson, D. Henriksson, B. Lindgren, ” *Studie Drx - Bredbandiga digitalmottagare för radarsignalspaning*”, FOI-R--2510--SE.
- [29] R. H. Walden, “*Performance Trends for Analog-to Digital Converters*”, pp. 96-101, IEEE Communications Magazine, February 1999.

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