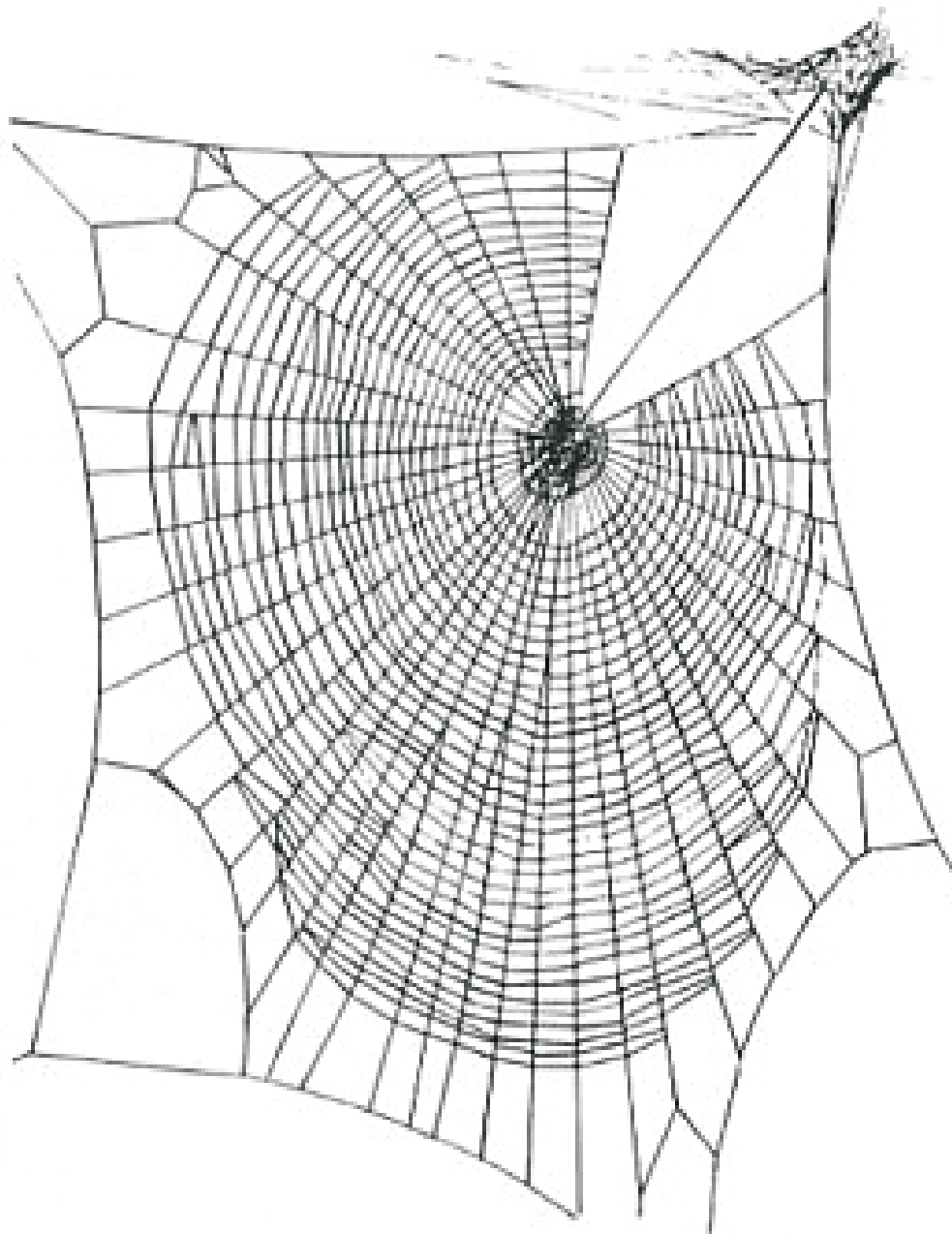


ROLF RAGNARSSON, PER GRAHN, ANDERS NELANDER



Rolf Ragnarsson, Per Grahn, Anders Nelander

Teknik för luftmålsdetektion

Översikt av framväxande radarmetoder i luftbevakningskedja

Bild/Cover: Laura Bassett

Titel	Teknik för luftmålsdetektion
Title	Technologies for detection of airborne targets
Rapportnr/Report no	FOI-R--4179--SE
Månad/Month	December
Utgivningsår/Year	2015
Antal sidor/Pages	25 p
ISSN	1650-1942
Kund/Customer	Försvarsmakten
Forskningsområde	7. Sensorer och signaturanpassning
FoT-område	Sensorer och signaturanpassning
Projektnr/Project no	E54570
Godkänd av/Approved by	Per Johannesson
Ansvarig avdelning	Sensor- 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

Rapporten ger en översikt av framväxande radarteknik inom området fjärrspaning mot luftmål. Detta område är viktigt för Sveriges framtida förmåga att verka i närområdet och framgångsrikt värna sitt territorium. Genom att identifiera viktiga delområden där vidare forskning är krävs för att optimalt utnyttja de tekniska framstegen, söker rapporten ge en grund för inriktningen av framtida forskningssatsningar.

Sensorstudien drar slutsatsen att multifunktionella AESA-system kommer att dominera den framtida luftbevakningskedjan, men att passiva system på lägre arbetsfrekvenser kan komma att utgöra viktiga komplement. Genom att luftbevakningskedjan är uppbyggd av flera olika delsystem med varierande arbetsfrekvenser och funktionalitet, ökar det totala systemets flexibilitet och sårbarheten minskar. Dessa fördelar är dock kostnadsdrivande och resulterar i en högre totalkostnad för det kompletta luftbevakningssystemet.

För att optimalt realisera dessa mål krävs dock insatser inom signalbehandling (målklassificering, optimerade vågformer, m.m.) för enskilda radarstationer liksom för multifunktionella passiva radarsystem som verkar på flera frekvenser. Radarsystemens funktion i nätverk är också av stor vikt, oavsett tillverkare, speciellt vad gäller frågeställningar som radarresursallokering i olika scenarier. Slutligen är bred kunskap om möjliga tekniska lösningar viktig för rätt upphandlingsbeslut, lägsta livscykelkostnad och för att undvika leverantörsinlåsning.

Nyckelord:

Radarsystem, luftmål, målklassificering, AESA-radar, passiv radar, PCL, spaningsresursallokering

Summary

The report gives an overview of emerging radar technologies within the area of detection of airborne targets. The subject is of considerable importance for the future Swedish capability to operate in Northern Europe and to successfully protect its territory. By identifying key areas where further research is needed for optimal use of the technological advances, the report aims to provide a direction for future research programs.

Our study concludes that multifunctional radar sensors based on AESA technology will dominate the future air surveillance system, but that complementary sensor solutions like passive radar systems operating at lower frequencies can provide an important contribution to the overall performance. By designing an overall system consisting of several different kinds of subsystems, operating at varying frequencies and in different modes, the overall system flexibility is improved and the overall vulnerability is reduced. The advantages, however, lead to a higher overall cost for the complete air surveillance system.

However, optimal realization of these goals requires further work in the areas of signal processing (target classification, waveforms, etc.) for radar stations and multifunctional for passive systems operating at several frequencies. The networked operation of the radar stations is also of great importance, regardless of manufacturer, especially with respect to questions like allocation of radar resources under varying operational conditions. Finally, broad knowledge of the possible solutions is important for good procurement, lowest total cost-of-ownership, and to avoid vendor lock-in.

Keywords:

Radar systems, airborne targets, target classification, AESA radar, passive radar, PCL, radar resource management

Innehållsförteckning

1	Sammanfattning och slutsatser	7
2	Inledning	9
2.1	Motivering.....	9
2.2	Avgränsningar.....	9
3	Bakgrund	11
3.1	Sensorsystemets uppgift.....	11
3.2	Relevanta scenarier.....	11
3.3	Begränsningar i dagens system.....	12
3.4	Sensorstudiens slutsatser.....	13
4	Vågutbredning och måltyper: frekvensval	14
4.1	Principer.....	14
4.1.1	Frekvenssamvaro.....	15
4.1.2	Terrängens inverkan.....	15
4.2	Specifika frekvenser.....	15
4.2.1	HF (under 30 MHz).....	15
4.2.2	VHF/UHF (30-300 MHz respektive 300-1000 MHz).....	15
4.2.3	L-, S-, C-, X-band (1-12 GHz).....	16
4.2.4	Ku-, K- och Ka-band (12-40 GHz).....	16
4.2.5	Millimetervågor över 40 GHz.....	16
4.3	Diskussion.....	16
5	Systemutformning	17
5.1	Teknologiutvecklingen.....	17
5.2	Principer för systemutformning.....	17
5.3	Vågformer och signalbehandlingstekniker.....	18
5.4	Passiva radarsystem.....	18
5.5	Nätverkskopplade multifunktions AESA-system.....	19
5.6	Koherenta radarnätverk.....	19
5.7	MIMO och multistatiska radarsystem.....	19
5.8	Diskussion.....	20
6	Realiseringsexempel	21
6.1	AESA-radar.....	21
6.2	Passivt multifunktionssystem.....	21
6.3	Upplyft plattform.....	22
6.4	OTH-system.....	23
6.5	Diskussion.....	23

7 Referenser

24

1 Sammanfattning och slutsatser

Motiv och avgränsning

Grunden för marin- och luftstridskrafternas verksamhet är kontinuerlig övervakning av sjö- respektive luftrum. Området fjärrspaning mot luftmål är därför av stor vikt i och med den aktuella utvecklingen av hotbilden, och samtidigt sker även materielförnyelse inom detta område.

Föreliggande diskussion behandlar den kravbild som råder för luftmålsspaning och skissar på tänkbara radarsystemlösningar samt ett antal teknikområden som är viktiga för framtida system på tio till tjugo års sikt. Identifierade kunskapsluckor inom dessa områden utgör därmed mål för framtida svensk försvarsforskning.

Optroniska sensorer eller metoder baserade på signalspaning mot emitterande mål behandlas inte i rapporten, men är av vikt som komplement till sensorteknik baserad på radar för att ge en komplett lägesbild. Detsamma gäller, sekundärradarteknik baserad på transpondersvar.

Hotbild och scenarier; begränsningar idag

Använd hotbild baseras på sensorstudiens politiskt förankrade scenarier och gränssättande hot: ballistiska missiler, kryssningsmissiler, smyganpassade flygplan och obemannade farkoster. Till detta kommer vikten av att hantera störning och att skilja reella hot från skenmål, ointressanta mål och provokationer.

Begränsningar i dagens system utgörs främst av svårigheterna att bemöta ovan nämnda gränssättande hot. Även systemets överlevnadsförmåga efter ett första angrepp bedöms som begränsad.

Framväxande områden med utvecklingspotential

Framtidens långgräckviddiga luftövervakning kommer att domineras av långgräckviddig spaning med AESA-bestyckade¹ radarstationer som opererar på frekvenser från UHF-band och uppåt. Givet denna bakgrund har ett antal områden identifierats inom vilka fortsatt arbete på sikt bedöms kunna ge förbättrad luftövervakningsförmåga:

1. Utveckling av metoder för optimering av radarnätverket till olika scenarier och tillgänglighet till radarstationer. Det är viktigt att förstå konsekvenser av sensorresursallokering och erhålla återkoppling avseende konsekvenserna av gjorda val, då flexibiliteten i framtida system erhålls till priset av ökad komplexitet och sämre överblick om inte adekvata stödsystem finns att tillgå. Samtidigt är anpassning till aktuell situation nödvändig för bästa resursutnyttjande.
2. Utveckling av signalbehandlingsalgoritmer syftande till att öka prestanda för den enskilda radarstationen genom anpassning av vågformer. Mjukvaru-uppgraderingar kan öka förmågan hos redan installerade system.
3. Radarsystem i nätverk
 - a. Datafusion
 - b. Multistatiska system.
4. Kompletterande system som ökar redundansen och minskar sårbarheten. Passiva system på lägre frekvenser, speciellt av multifunktionskaraktär, bedöms kunna ge

¹ AESA: "Active Electronically Scanned Array". Aktiv elektroniskt styrd gruppantenn.

bidrag inom detta område. Direkta erfarenheter krävs av dessa system som idag inte används operativt av oss.

Rekommendationer

Framtidens spaningssystem är heterogent, komplext och flexibelt. Inget enskilt delsystem kan sägas vara lämpligt för att lösa alla uppgifter. Systemet bör därför idealt vara uppbyggt av ett antal delsystem med komplementära förmågor.

Framtidens komplexa system ställer även höga krav på teknisk kunskap för att kunna fatta rätt beslut vid upphandlingar av nya system såväl som vid livstidsförlängningar av befintliga system. Sålunda krävs en kunnig kund vid upphandlingar för att undvika leverantörsinläsningar och för att minimera livscykelkostnaden. Denna kunskap tar tid att bygga upp och kräver ett visst mått av kontinuitet!

Arbete för att utveckla optimeringsmetoder för radarnätverket i olika scenarier och tillgänglighet till radarstationer efter ett anfall behövs. Detta arbete kräver, förutom metodutveckling, även tillgång till rätt verktyg för planering och för användning i det operativa arbetet. Flexibiliteten i ett framtida heterogent multifunktionssystem måste balanseras av användningen av verktyg och metoder som stödjer arbetet genom att ge klara besked om fördelar och nackdelar med olika resursallokeringsval.

Resurser för forskning och utveckling bör delvis inriktas på teknologier i tidig fas eller av kompletterade eller alternativ karaktär. På detta stadium kan enklare (och billigare!) prov ge vägledning inför framtida vägval. Detta gäller i synnerhet då de kommersiella aktörerna tenderar till att inte avsätta resurser inom dessa framväxande områden utan främst koncentrerar sig på kommersiellt viktiga delområden med högre mognadsgrad.

Läsanvisning

Kapitel 2 ger en kort sammanfattning av slutsatserna från tidigare studier för att motivera den fortsatta framställningen och sätta den kravbild som nya system skall bemöta.

Kapitel 3 behandlar valet av arbetsfrekvens för framtida radarsystem och de fördelar och nackdelar som erhålls vid given frekvens.

Kapitel 4 behandlar utformning av radarsystem för luftbevakning. Grundläggande principer, teknologiutveckling, signalbehandlingstekniker och ett antal icke-konventionella radarsystem behandlas.

I kapitel 5 ges ett antal exempel på system som kan bli relevanta i framtiden. Dessa diskuteras i termer av den uppställda kravbild.

2 Inledning

2.1 Motivering

Försvarsmaktens perspektivstudie [1] har diskuterat hur den strategiska betydelsen av närområdet, speciellt Östersjön och Barents hav, har ökat under de senaste åren. Detsamma gäller drivkrafterna att skydda nationella intressen. Samtidigt verkar krafter för en förskjutning från personalkrävande förband för lågintensiva konflikter till personalsnåla förband med hög teknisk nivå som främst skall verka i högintensiva konflikter. För att de senare framgångsrikt skall kunna lösa sin uppgift krävs dock att tillgängliga tekniska system utnyttjas till sin fulla potential och samtidigt har tillräcklig flexibilitet att kunna anpassas efter föränderliga yttre omständigheter.

Denna rapport behandlar kortfattat den kravbild som råder för luftmålspaning och skissar på tänkbara systemlösningar samt ett antal teknikområden som är viktiga. Tanken är också att detta, tillsammans med identifierade kunskapsluckor, ska utgöra områden att bedriva forskning runt. Att höja kunskapsläget genom forskning tar tid eftersom det inte bara handlar om teoretiska studier utan också om relevanta praktiska försök som underlag för att bedöma potentialen i verkliga system. Som exempel kan sägas att FOI gjorde de första teoretiska studierna runt gruppantennbaserade antenner för radar i slutet av 80-talet [2] och multistatisk radar i början av 90-talet [3]. Ungefär 1995 påbörjades, tillsammans med svensk industri, ett projekt för att bygga och testa en liten gruppantenn med en fullständig digital mottagarkanal bakom varje antennelement. Denna antenn användes sedan för olika studier 1996-2002 [4]. Industrin har sedan arbetat med grundtekniken och presenterade en ny produktfamilj baserat på denna teknik under 2014 [5].

Den sensorstudie [6], som Försvarsmakten genomförde från juni 2013 till mars 2014, utgör indata till den här rapporten i form av operativa scenarier och krav m.m. De slutsatser som drogs i denna studie gäller fortfarande, men den här rapporten kompletterar med tekniker och system inom radarområdet som kan bli aktuella i framtiden.

2.2 Avgränsningar

I denna rapport avhandlas system och tekniker inom radarområdet som är anpassade för att upptäcka, följa och ge underlag för klassificering av mål som befinner sig i luften och i rymden strax utanför atmosfären. Vi har inte tagit upp sådant som är tillämpligt på kortare avstånd, d.v.s. under cirka 10 km.

Tekniker för att hantera mål på låg höjd över sjö såsom missiler eller fartyg är däremot intressanta, speciellt om de kan appliceras på andra mål även om de då behöver optimeras på ett annorlunda sätt.

Fokus har dock varit på sådan radarsensorteknik som skulle kunna ingå i territorialförsvaret, d.v.s. spaningssensorer på marken, på fartyg eller upplyfta i flygplan, UAV:er² eller aerostater. Däremot har vi inte inkluderat målsökare i missiler eller granater och inte heller korthållsystem för övervakning eller för försvaret av en camp. Eftersom vårt fokus är icke-kooperativa spaningssystem har vi inte inkluderat sekundärradar tekniker, såsom ADS-B³, även om sådana system måste ingå i de flesta luftspaningssystem. Däremot ingår tekniker som hjälper till i klassificeringsprocessen, d.v.s. tekniker som ger en uppfattning om antal mål, någon form av målklass, de observerade objektens utsträckning o.s.v.

² UAV: "Unmanned Aerial Vehicle". Ett system med relativt stor självständighet.

³ ADS-B: "Automatic Dependent Surveillance". Kooperativt transpondersystem för luftövervakning.

Optroniska sensorer och signalspaningsmetoder baserade på pejling av aktiva emitterande mål är viktiga för att komplettera de aktuella radarsensorerna, men faller utanför ramen för denna rapport vilken endast behandlar sensorteknik baserad på radar.

3 Bakgrund

3.1 Sensorsystemets uppgift

Sensorsystemet är ett tekniskt stödsystem, utformat för att utföra nedanstående uppgifter. Samtliga dessa pågår parallellt, samtidigt i tiden och geografiskt, men med olika fokus:

- Strategisk och operativ styrning av sensorsystemet, så att det kan svara upp mot förväntade uppgifter och krav med längre och kortare tidshorisont. För att kunna göra detta gäller det att dels förstå hur varje sensor beter sig i olika situationer och också att kunna prediktera kommande situationer.
- Ständig sökning efter indikationer på att militärt intressanta situationer börjar uppstå. Detta görs normalt genom att varje sensor söker efter detektioner som sedan skickas till StriC för att sammanställas till en dynamisk lägesbild. Denna analyseras därefter för att detektera de intressanta situationerna. I denna fas är det viktigt att göra säkra detektioner så tidigt som möjligt.
- Följa upp de intressanta situationerna och ta reda på mer information som skall användas som beslutsunderlag inför beslut om någon form av insats skall utföras. Detta kräver kontinuitet och klassificerings- samt analysförmåga. Noggrannhetskraven är högre än under detektionsfasen, men inte lika höga som under insatsfasen.
- När insats beslutats skall sensorsystemet stödja insatsen på olika sätt, t.ex. genom att invisa JAS 39 eller Lv-robot fram till den tidpunkt då den egna målsökaren hittar målet. I denna fas är det viktigt med god noggrannhet kombinerat med hög uppdateringstakt och låg tidsfördröjning mellan sensor och vapensystem.
- Identifiera effekt av insats. Detta innebär bl. a. att fortsätta följa målet till en eventuell träff.

3.2 Relevanta scenarier

I sensorstudien [6] beskrivs hotbilden i stort, baserat på ett antal politiskt förankrade scenarier, se också [7]. Dessa scenarier analyserades och fyra typer av hot framstod som gränssättande för sensorsystemet på olika sätt:

- Taktisk Ballistisk Missil (TBM). Detta hot benämns också SRBM⁴ och består av en missil som avfyras på ett avstånd av 300-600 km med ballistisk eller nertryckt ballistisk bana. Hastigheten är mycket hög med en total bantid av ca 4-7 min.
- Kryssningsmissiler ("X-Rb"). Dessa har underljudshastighet men anflyger på låga höjder. Radarmålarean är också relativt liten.
- Signaturanpassade flygplan ("Stealth"). Dessa är flygplan med mycket liten radarmålarea som därför upptäcks sent av konventionella radarsystem.
- Obemannade attackflygplan (UCAV). Dessa kan uppträda på samma sätt som vanliga flygplan, men dessutom kan man förvänta sig okonventionella beteenden som t.ex. svärbeteende eller som skenmål.

Man ska också notera att det finns andra potentiella mål som upplevs som snarlika de som är militärt intressanta, t.ex. civila flygplan. Dessa är belastande för systemet och måste hanteras för att man ska kunna hitta de mål som verkligen är intressanta. De taktiska

⁴ SBRM: "Short-Range Ballistic Missile".

kraven innebär att man vill ha så tidig upptäckt att man hinner agera på något sätt, t.ex. med motangrepp eller skyddsåtgärder.

Under fredstid är låg driftskostnad viktigt och kraven är att provokationer ska hanteras samt att övningar ska kunna genomföras. Inga hot mot sensorsystemet föreligger då. Andelen ointressanta mål är då högt.

Under konflikt eller krig råder ett högt hot mot sensorsystemet i form av olika typer av störning, samt vapen styrda mot sensors läge eller signalsökande mot sensorerna. Andelen ointressanta mål är lågt.

I kristid råder en blandning av freds- och krigsförhållanden och det finns en stor osäkerhet om vad som egentligen gäller i politiskt och militärt hänseende, vilket gör att detta troligen är den svåraste och mest utmanande situationen. Här måste man hantera störning tillsammans med skenmål, ointressanta mål och provokationer från reella hot. När som helst kan det då bli ”skarpt läge”.

3.3 Begränsningar i dagens system

Dagens system består av ett visst antal av ett fåtal olika sensortyper benämnda PS 861 för mål på relativt långa avstånd och relativt hög höjd, samt PS 871 för mål på lägre höjd och för att fylla ”hål” i täckningen. Dessutom finns några få flygburna ASC 890 samt en kedja av kustspaningsradar, PS 640, vars främsta syfte är att detektera fartygsrörelser enligt vad Schengenavtalet föreskriver. Samtliga radarsystem rapporterar sina detektioner till ett antal centraler: StriC, SjöC och LvC, där beslut tas om den militära uppgift som skall utföras.

Var och en av de markbaserade radarsystemen är resultatet av kompromisser, d.v.s. de har ett fåtal arbetssätt som avsökningsmönster, vågformer m.m. som ger godtagbara prestanda utan att uppvisa för mycket negativa prestanda som t.ex. sannolikhet att rapportera ett mål trots att det inte finns något mål.

Den flygburna radarn är en relativt modern multifunktionsradar vars konfiguration anpassas efter vad operatören letar efter i en uppkommen situation. Den är sålunda ”smartare”, men har andra begränsningar som t.ex. uthållighet i spaningsläge eller hög driftskostnad.

Dagens system har svårt att upptäcka TBM:er av två anledningar. Den ena är att täckningsförmågan på riktigt hög höjd för snabba mål är begränsad. Den andra är att den relativt långsamma avsökningen hos varje enskild sensor medför att sannolikheten för att erhålla tillräckligt många detektioner av TBM:en blir för låg.

Likaså har sensorsystemet svårt att hantera X-Rb som anflyger lågt från långa avstånd. De markbaserade systemen blir begränsade av radarhorisonten. Följden blir att upptäckt sker i ett sent skede, vilket ställer stora krav på Lv-skydd av skyddsvärda objekt. Den flygburna radarn kan dock upptäcka dessa kryssningsrobotar om den befinner sig i luften på lämplig höjd och är rätt inriktad.

Hot från signaturanpassade farkoster är också svårt att hantera, speciellt i kombination med intelligent störning, med sen upptäckt som följd. En tröst är att farkoster med extremt låg radarmålarea kan förväntas vara relativt få till antalet på grund av komplexitet och kostnad, men måttligt signaturanpassade farkoster blir desto fler.

Komplexiteten med ointressanta mål hanteras i centralerna där dessa filtreras bort. En förutsättning är tillräcklig kapacitet i kommunikationsnät och i centralernas datorer samt effektiva algoritmer.

Viktigt ur systemsynpunkt är att överleva med tillräcklig förmåga efter ett första angrepp som riktar sig mot vårt sensorsystem.

3.4 Sensorstudiens slutsatser

Studien pekar på följande framgångsfaktorer:

- Många olika sensorsystem av tillräckligt antal och utspridda i arbetsfrekvens.
- För att kunna få förvarning om mål på låg höjd krävs även fortsättningsvis upplyfta sensorer, men dagens plattform är inte optimal.
- Sensorer som taktiskt kan utnyttjas på olika sätt:
 - Rörlighet, så att man inte ska kunna skicka ett navigerande vapen mot en förutbestämd punkt (mobila sensorsystem).
 - Fokusering, t.ex. att vissa sensorer fokuserar på TBM-hotet, medan andra hanterar spaning mot övriga måltyper på långt håll eller på lägre höjder och kortare målavstånd.
 - Tidsmässig adaptation till situationen, t.ex. genom att kunna invisa ett Lv-system under begränsad tid i ett begränsat geografiskt område.
- Ett ökat inslag av passiva system såsom ESM⁵ och PCL⁶.
- Förbättringar i kommunikationsnätverket så att tillräcklig kapacitet erhålls samtidigt som tidsfördröjningskrav kan tillgodoses i begränsade delar av nätet under begränsad tid.
- Ny funktionalitet i centralerna för att kunna taktisera med sensorer.
- Även bistatiska och multistatiska system är intressanta när de mognat. Ur forskningsperspektiv är de dock redan intressanta. Det operativa intresset består i att en lägesbild kan produceras på en plats, utan att aktiv signal behöver sändas från denna plats.

För att hantera ett TBM-hot, d.v.s. kunna invisa ett kapabelt Lv-Rb-system kommer det krävas att tillräckligt många sensorer detekterar TBM:en tillräckligt många gånger så att ett målspar med hög kvalitet kan bildas. Därefter ska en träffpunkt beräknas för en tidpunkt då en träff orsakar minst skada av de fragment som kommer att spridas. Tidsfönstret då detta skall ske är av storleksordningen en minut, innefattande alla mänskliga beslut. Således det finns inget utrymme för tveksamhet.

⁵ ESM: "Electronic Support Measures", metoder för analys av emitterad strålning från mål för detektion och lokalisering.

⁶ PCL: "Passive Coherent Localization", passiva multistatiska metoder utan dedikerad sändare.

4 Vågutbredning och måltyper: frekvensval

4.1 Principer

Ett radarsystems funktion beror av ett komplext samspel mellan ett antal faktorer [8]:

- Radarsystemets utformning vad gäller arbetsfrekvens och arbetssätt.
- Omgivningsförhållanden som påverkar utbredningen (topografi och atmosfäriska förhållanden).
- Målets egenskaper bestämmer radarmålarea givet aktuell systemfrekvens, polarisation och aspektvinkel.
- Motståndarsidans aktiva motåtgärder.

Valet av arbetsfrekvens för ett radarsystem påverkar samtliga av dessa faktorer och innebär en kompromiss mellan delvis motstridiga önskemål; optimal arbetsfrekvens är resultatet av hur de olika egenskaperna värderas inbördes.

De utsända vågornas växelverkan med objekt längs utbredningsriktningen beror av våglängden, λ : Objekt mindre än λ/π (Rayleigh-regionen) har allt mindre målarea (RCS) med ökande våglängd, medan objekt större än λ/π signifikant bidrar till spridningen [9]. I övergången mellan de två typfallen (Mie-regionen eller resonansregionen) då målet är jämförbart i storlek med våglängden oscillerar målarean och kan för ett givet mål anta höga värden vid specifika våglängder.

I allmänna termer påverkar radarsystemets arbetsfrekvens systemets funktion såtillvida att utbredningsförlusterna är lägre vid lägre frekvenser, vilket ger längre räckvidd för jämförbar uteffekt. Samtidigt är den tillgängliga bandbredden lägre, vilket medför sämre precision i positionering av mål.

Valet av arbetsfrekvens har även konsekvenser för systemets realisering genom att systemets antensystem, givet jämförbara antennlobber, blir allt större för lägre frekvenser. Å andra sidan är kostnaden lägre och tillgången större för högpresterande RF-komponenter på dessa lägre frekvenser. Detta gäller även digitala kretsar för behandlingen av data i basbandet.

Konventionella radarsystem för luftmål domineras av system utformade för S-, C-, respektive X-band (3-10 GHz). Dessa utgör också ryggraden i dagens svenska system. Utomlands förekommer även system på L-band (1-2 GHz) respektive UHF-frekvenser (0.3-1 MHz), främst för långräckviddig upptäckt av missiler. Radarsystem på frekvenserna 3-10 GHz utgör på många sätt en optimal avvägning för system som erbjuder god räckvidd och hög precision i positioneringen av mål, samtidigt som systemens fysiska storlek är rimlig. Denna situation är dock inte statisk! Omvärldsutvecklingen inom kommunikation, telekrig och material förändrar med tiden situationen och aktualiserar frågan om alternativa och framväxande radarfrekvenser som kan användas som komplement till huvudsystemen. Sensorstudien har tagit fasta på detta och pekar i sitt förslag på nyttan med radarsystem även på andra frekvenser.

De viktigaste fördelarna med att använda radarsystem med flera olika arbetsfrekvenser är i dagsläget:

- Sårbarheten minskar genom att det blir svårare att samtidigt rikta aktiv störning mot flera frekvenser.
- Flexibiliteten ökar genom att flera olika typer av radarsystem med komplementära egenskaper kan riktas mot potentiella mål.

4.1.1 Frekvenssamvaro

Frågan om (i fredstid) tillåtna frekvenser för radarspaning är också relevant. Trådlös datakommunikation tar upp allt större del av frekvensspektrum på C-band [10]. Passiva system som utnyttjar befintliga sändare (PCL eller parasiterade radar) kan genom samutnyttjande av frekvensspektrum bidra till att minska detta problem.

4.1.2 Terrängens inverkan

Ett för Sverige viktigt krav är att antennen måste kunna verka väl över trädtopparna, d.v.s. minst 25 m över markytan, eftersom en stor del av landet är täckt av växande skog. Kravet är besvärligt för en rörlig sensor eftersom en mastkonstruktion måste vara tillräckligt stabil under avsevärd vindlast. Indirekt ställer detta krav på ett relativt lätt och litet antennsystem.

4.2 Specifika frekvenser

4.2.1 HF (under 30 MHz)

HF-området är intressant främst p.g.a. av atmosfäriska effekter som kan utnyttjas för att nå längre räckvidd. Dessa OTH-system⁷ utnyttjar reflektion i jonosfären (s.k. rymdvåg) på samma sätt som kortvågsradio eller utbredningsfenomen nära havsytan (s.k. ytvåg). Då utnyttjas att radiovågorna tenderar att följa en krökt yta bortom den optiska horisonten. Spaningssystem som utnyttjar denna effekt brukar benämnas OTH-radar.

Av dessa är främst ytvågssystemen av intresse då dessa kan realiseras strandnära med relativt enkla, men förhållandevis utrymmeskrävande, antennsystem [11]. Ytvågens utbredning beror av salthalten i vattnet och därmed ökar räckvidden med salthalten. Effekten är större för lägre frekvenser (några MHz) än för högre (några tiotal MHz eller högre). Nackdelen med låga frekvenser är att det behövs stora antennsystem för att få vinkelupplösning och den möjliga bandbredden resulterar i dålig avståndsupplösning.

4.2.2 VHF/UHF (30-300 MHz respektive 300-1000 MHz)

Förmågan att upptäcka signaturanpassade mål har varit en drivande faktor för utvecklingen av radarsystem på dessa frekvenser, framför allt för stormakterna som har en lång utvecklingstradition inom denna typ av system (Ryssland, Kina). Detta beror på den resonans i växelverkan med målet [12], som inträffar då storleken på målets eller dess huvudsakliga delar är jämförbara med våglängden (0.3-1 m). Samtidigt är de material som används för att reducera målarean på smyganpassade farkoster mindre verkningsfulla på dessa lägre frekvenser.

UHF-system har även traditionellt använts för missilskydd (USA, Ryssland, Israel). Dessa stora och dyra system har dock ofta prestanda bortom vad som krävs för TBM-skydd. Dagens utveckling går också mot högre arbetsfrekvenser för att möjliggöra målpositionering med tillräcklig noggrannhet för verkan mot missilerna. Det är i dagsläget tveksamt om denna typ av system utgör en realistisk lösning för att uppnå TBM-skydd inom tillgänglig ekonomisk ram.

VHF/UHF-frekvenserna är även det naturliga frekvensområdet för passiva radarsystem av PCL-typ. Orsaken till detta är tillgången på civila sändare (FM-radio, DAB-radio, digital television, m.fl.) inom detta frekvensintervall som kan utnyttjas tillsammans med mobila mottagare i nätverk för att skapa en lägesbild. Dessa kan i krigstid kompletteras med ytterligare sändare på det aktuella frekvensintervallet.

⁷ OTH: "Over-the-Horizon".

Problemet med dålig riktverkan för små antenner i detta frekvensintervall kan delvis hanteras genom multistatiska system där den enskilda antennen har begränsad riktverkan. Mottagarna kan med fördel monteras även på uppflyfta plattformar (UAV:er) och därigenom ge ökad förmåga mot lågflygande mål som annars är svåra att se från markbaserade system.

4.2.3 L-, S-, C-, X-band (1-12 GHz)

Som tidigare nämnts utgör detta huvudfåran för fjärrspaning mot luftmål, med tonvikt på den lägre delen av frekvensintervallet för långräckviddig spaning. Signaturanpassade farkoster är avsedda för att undvika detektion på dessa frekvenser och aktiva motåtgärder riktas i allmänhet mot radarsystem på dessa frekvenser. Av denna anledning ger en alltför ensidig inriktning på detta frekvensintervall en sårbarhet. Denna kan delvis bemötas med ett fjärrspaningssystem som även innefattar alternativa spaningsmetoder baserade på frekvenser utanför detta intervall.

Tillgången på civila sändare som kan utnyttjas för passiva system är begränsad för det aktuella frekvensintervallet då de sändare som existerar i allmänhet har låg täckningsgrad i lufrummet och/eller låg uteffekt. Ett potentiellt undantag är användningen av GNSS-satelliter⁸ som sändare i ett bistatiskt system, vilket har demonstrerats på forskningsstadiet [13].

4.2.4 Ku-, K- och Ka-band (12-40 GHz)

Radar på dessa frekvenser liknar i stort radar på X-band, men med större utbredningsförluster. Den kortare våglängden leder dock till antenner av mindre storlek, vilket kan vara värdefullt vid tillämpningar som montering av radarsensorer på uppflyfta plattformar som t.ex. UAV [14] eller målsökarteknologi för robotar.

Kretsutvecklingen inom detta frekvensband drivs idag starkt framåt av det civila telekommunikationsområdet, teknologier som 5G och radiolänkar på Ka-band driver fram nya komponenter med högre RF-prestanda.

4.2.5 Millimetervågor över 40 GHz

Generellt har dessa frekvenser högre utbredningsförluster jämfört med lägre frekvenser, vilket resulterar i kortare räckvidd. Förlusterna är dock fortfarande låga jämfört med optiska frekvenser. Vid vissa frekvenser är utbredningen starkt begränsad p.g.a. absorption i vattenånga. Fördelarna är att realiserade system är små samt att den korta våglängden och höga bandbredden ger möjlighet till mer detaljerad avbildning av mål och därigenom möjligheter till förfinad klassificering av mål.

Hög uteffekt krävs för att kompensera för utbredningsförlusterna. Dock råder idag brist på RF-komponenter för detta frekvensområde med hög uteffekt och kompakt format. Denna situation bedöms bestå under de närmaste tio åren och frekvensområdet bedöms därför idag som mindre intressant för fjärrspaning mot luftmål. Däremot kan korthållsradar-tillämpningar komma ifråga inom detta frekvensområde.

4.3 Diskussion

System på lägre frekvenser (HF/VHF/UHF) som kan operera i passiv mod bedöms kunna utgöra ett viktigt komplement till system på konventionella radarfrekvenser. Sverige har dock i dagsläget begränsade erfarenhet av användningen av denna typ av system, speciellt vad gäller multifrekvenssystem och/eller multifunktionssystem.

⁸ GNSS: "Global Navigation Satellite System".

5 Systemutformning

5.1 Teknologikutvecklingen

Den teknologiska utvecklingen under senaste decennierna har innefattat ett antal teknologier som gjort radarsystem baserade på aktiva elektriskt styrda gruppantennor (AESA-system) allt mer kostnadseffektiva:

- RF-kretsar som tål högre effekter och som även potentiellt har högre verkningsgrad kan produceras i galliumnitrid-teknologi (GaN). Dessa kretsar kan i vissa fall även bli billigare än dagens kretsar, åtminstone för tillverkningsprocessen där GaN läggs på kisel ("GaN-on-Si").
- Kretsar som möjliggör synkroniserad sampling och vågformsgenerering av många kanaler i höga hastigheter (AD-omvandlare, DA-omvandlare, FPGA-kretsar⁹). FPGA-kretsar och kommunikationsgränssnitt utvecklas kontinuerligt mot kretsar som kan hantera allt större datamängder per tidsenhet.
- Beräkningskretsar (CPU) har allt fler beräkningskärnor som utför fler beräkningar per tidsenhet; även FPGA-kretsar har blivit ett alternativ för snabba beräkningar

Gemensamt för dessa framsteg är att utvecklingen drivs av angränsande fält som informationsteknologi och trådlös datakommunikation, men att de likväl kommer radarområdet till godo.

Då radarsystem av AESA-typ har stora fördelar med avseende på prestanda och flexibilitet är det troligt att radarsystem av denna typ kommer att dominera luftövervakningen i framtiden.

5.2 Principer för systemutformning

Kraven på radarsystem för luftbevakning över nationellt territorium och området omkring detta, är att upptäcka luftmål och nära rymdmål på höga höjder samt att upptäcka luftmål och ytmål på låga höjder. Målen måste inmätas, följas och klassificeras med tillräckliga prestanda för att kunna motverka och bekämpa hot med våra system eller för att åtminstone kunna skydda våra system, vår infrastruktur och befolkning.

Grundläggande för att upptäcka mål är att en tillräcklig uppdateringstakt kan uppnås. Detta är viktigt för att våra system skall få adekvat förvarningstid och för att informationen om upptäckta, följda och klassificerade mål skall vara av tillräckligt hög kvalitet för att styra vår motverkan och bekämpning. Konventionella radarsystem har ofta en fast uppdateringstakt som är en kompromiss mellan räckvidd, reaktionstid och noggrannhet.

Målen dynamiska egenskaper i form av flyghöjd, hastighet och lastfaktor (acceleration) bestämmer kraven på höjdtäckning, hastighetstäckning och uppdateringstakt. Vid följning av målen är uppdateringstakten extra viktig. Målen radarmålarea (RCS) är beroende av aspektvinkel vilket påverkar detektionsavståndet och därmed radarns täckningsområde. Nya måltyper som TBM och UCAV kommer att ha ökad flyghöjd, hastighet och lastfaktor jämfört med konventionella luftmål.

Täckningsområdet för en enskild radar bör väljas så att man får överlappande täckning av alla mål tillsammans med angränsande radarstationer i nätverket. Detta ger redundans och förbättrad inmättningsnoggrannhet vilket medför bättre följning och störskydd. Täckningsområdet över eget territorium kan realiseras med ett fåtal långräckviddiga

⁹ FPGA: "Field-Programmable Gate Array", typ av rekonfigurerbara kretsar med hög parallellitet.

radarsystem eller med flera korträckviddiga radarsystem som kan öka robustheten. Täckningsområdet utanför eget territorium kräver dock långräckviddiga radarsystem för att ge tillräcklig förvarningstid. Om våra radarsystem kan operera utanför vårt territorium, kan även korträckviddiga radarsystem användas. Dessa ger också bättre låghöjdstäckning utanför eget territorium.

Givet att kostnaden är proportionell med antenntyten och man bortser från redundans och låghöjdstäckning, gäller generellt att radarnätverk med långräckviddig AESA-radar är mera kostnadseffektiva än radarnätverk med korträckviddig AESA-radar.

Radarnätverk med kommunikation av målinformation till en central är mycket viktiga för att få redundans, förmåga till styrning av resurser, ökad mätnoggrannhet, minskad reaktionstid och ökad robusthet mot störning och bekämpning.

Inmätning av upptäckta mål bör kunna göras med flera radarstationer för att förbättra noggrannhet och ge möjlighet till uppgiftsfördelning mellan olika radarstationer. Följning av inmätta mål kräver tillräcklig uppdateringstakt beroende på målens beteende. Om målinformationen för följda mål skall användas för vapenstyrning blir detta ännu mer viktigt och kraven på reaktionstid mot målmanöver ökar.

5.3 Vågformer och signalbehandlingstekniker

Signalbehandling för moderna radarsystem baseras på koherenta signaler och digital teknik som medför att den analoga hårdvaran på RF-nivå förenklas och funktionaliteten blir fullt programmerbar. AESA-antennerna kommer i framtiden att få digitala sändare och mottagare för varje antennelement så att man kan kontrollera alla signaler fullt digitalt.

Digital lobformning införs för både sändning och mottagning vilket ger nya möjligheter till klotterundertryckning och störskydd. Digital vågformsgenerering införs, vilket ger bättre möjligheter att kontrollera sidolobber och spuriösa signaler för bredbandiga signaler. Digitaliserade signaler ger också möjligheter till kombinerad rum-tidfiltrering för att undertrycka klotter och störning.

Digital signalbehandling används också för måligenkänning med högupplösande metoder som använder lång integrationstid och stor bandbredd. Viktiga signalbehandlingstekniker är baserade på modellbaserade metoder som systematiskt använder a priori-information. Tekniker som bygger på gles rekonstruktion, kognitiva metoder och lärande metoder kan också bli intressanta.

Klassificering av följda mål för måligenkänning blir allt mer viktigt och detta ställer ökade krav på radarsystemen. Klassificering kan utgå från målets följda rörelser som kan ange måltyp. Mera noggrann klassificering kräver radarmoder med hög bandbredd och lång integrationstid för att ge upplösning av målets delreflektorer. Radarmoder som hög avståndsupplösning (HRR), mikrodoppler och invers syntetisk apertur radar (ISAR) kan krävas. En viktig förutsättning för klassificering är att kunna optimera tidpunkt och vågform för radarmoderna beroende på målets rörelse.

5.4 Passiva radarsystem

Passiva radarsystem bygger på att vi utnyttjar andra sändare som kan finnas tillgängliga kontinuerligt över vårt täckningsområde. Dessa sändare är huvudsakligen rundstrålande mot markytan som FM radio, DVB-T¹⁰ television och mobilkommunikation och de är placerade i höga master för att få täckning mot marken runt sändarmasten. Detta gör att höjdtäckningen för passiv radar baserad på dessa sändare är begränsad till relativt låga flyghöjder.

¹⁰ DVB-T: "Digital Video Broadcasting – Terrestrial"

Andra möjliga sändare är satellitkommunikation och DVB-S¹¹ satelliter men dessa har lägre utsänd effekttäthet mot täckningsområdet. Andra radarsändare kan vara möjliga att använda men då krävs att de belyser målet under tillräckligt lång tid för att kunna bidra till målinformation till vårt radarnätverk. Fientliga sändare kan inte antas sända för oss nyttiga signaler för passiv radar.

5.5 Nätverkskopplade multifunktions AESA-system

I en situation då man skall agera med Lv-system mot hot är tidskraven höga, speciellt för hot som upptäcks nära oss eller som kommer emot oss med hög hastighet. Det gäller att etablera målföljning, identifiera hotet, fatta insatsbeslut, låta målföljning få tillräcklig precision och överföra prediktionsinformation till Lv-systemet i tid, givet att Lv-systemet står på lämplig geografisk plats. Speciellt TBM-hotet utgör då en svår utmaning.

En lösning som kan hantera detta, är att nätverkskoppla alla radarsystem så att man vid LvC (Lv-systemets ledningsplats) har tillgång till data från samtliga radarsystem med minimal tidsfördröjning. Dessutom måste ett antal av dessa vara av multifunktions AESA-typ och befinna sig i en arbetsmod där en sektor avsöks snabbt elektroniskt och med mätförfarandet optimerat mot TBM-hot. Hur många system av den senare typen som krävs beror av storleken på det område som skall skyddas.

Även X-Rb-hotet blir tidskritiskt, då många kryssningsrobotar plötsligt kommer över horisonten och upptäcks. Nätverkskopplingen underlättar i denna situation genom att antal mätningar på målen ökar, vilket minskar upptäcktsfördröjningen, men avgörande för utgången är givetvis också Lv-systemets kapacitet, reaktionsförmåga samt räckvidd.

Taktisk rörlighet i kombination med multistatiska arbetsmoder kan hjälpa till att öka skyddet mot störning och fysisk bekämpning.

Avgörande förmåga för AESA-systemen är adaptationsförmågan, d.v.s. att utifrån styrorder prioritera inmätningsuppgifter och optimera varje deluppgift efter situation. Detta görs förutom i enskild station också i nätverket som helhet. Denna funktion bygger på modeller över våra sensorer och plattformar, den miljö som de verkar i och hotsystemen, till en detaljeringsnivå som gör att prestanda kan uppskattas med tillräcklig säkerhet. Styr- och optimeringsproblematiken blir komplex då det är många motstridiga krav som ska tillgodoses, samtidigt som denna funktion potentiellt kan störas av en initierad motståndare. En översikt av sensorstyrning ges i [15].

Varje system bör även kunna agera utan att vara inkopplat mot nätverket eftersom nätverket kan vara sårbart. Konsekvensen blir lägre totalprestanda.

5.6 Koherenta radarnätverk

Koherenta radarnätverk innebär att flera sändare är koherenta med varandra så att mottagna signaler kan integreras till en gemensam signal. Detta kan vara intressant för att undertrycka störning och klotter, förbättra noggrannhet vid följning och för att skapa signaler för klassificering. Det finns ansatser beskrivna för att kombinera ISAR-bilder från olika aspektvinklar till en gemensam bild [16].

5.7 MIMO och multistatiska radarsystem

MIMO-radar¹² och multistatisk radar är liknande koncept. MIMO innebär att olika signaler sänds ut från olika delantennor eller antennelement i en gruppantenn eller en distribuerad antenn [17]. Signalerna lobformas koherent till en tidsvarierande utsänd lobform.

¹¹ DVB-S: "Digital Video Broadcasting – Satellite"

¹² MIMO: "Multiple Input Multiple Output".

Multistatisk radar utnyttjar inte direkt koherens mellan sändare som i det monostatiska fallet, utan istället olika stora bistatiska vinklar mellan sändare och mottagare. MIMO för långräckviddig radar kan främst användas för vågformsdiversitet i olika riktningar som kan ge störskydd och robusthet mot signalspaning. Multistatisk radar för långräckviddig täckning kan använda mottagare nära målet och tillbakadragna sändare. De förra är inte emitterande och därför svårare att upptäcka och bekämpa.

MIMO-radar med samlokaliserade antennkanaler i en gruppantenn ger nya möjligheter till att skapa utsända vågformer som kan adaptivt matchas till målens signaturer och som kan möjliggöra adaptiva metoder för störundertryckning och klotterundertryckning.

MIMO-radar ger generellt vågformer som kan formas nästan godtyckligt som funktion av tid och rum. Denna vågformsdiversitet skapar nya möjligheter till systemutformning.

5.8 Diskussion

Systemutformning av radar för luftbevakning innehåller ökade krav på att detektera svåra luftmål som TBM, kryssningsrobotar, smyganpassade flygplan och UCAV. Kopplat till detta är också ökade krav på att kunna följa, inmäta och klassificera mål.

Uppdateringstakten måste öka och reaktionstiden måste minska för framtida luftbevakningssystem. Radarsystemen behöver kopplas ihop i nätverk för att öka redundans, robusthet, inmätningssnoggrannhet och störskydd. Kravet på täckningsområde innefattar hela det nationella territoriet och ett stort område omkring detta för alla flyghöjder.

Den tekniska utvecklingen kommer att ge avancerad elektronik till lägre kostnader och på högre arbetsfrekvenser. Digitalisering av olika byggblock i en radar ökar så att analoga kretsar enbart finns närmast antennen. Detta medför att alltfler funktioner blir programmerbara, adapterbara och uppgraderingsbara med programvara. AESA-radar kommer att ge förbättrade prestanda för alla typer av radararkitekturer. Nätverk av radarstationer kommer att förbättra hanteringen av luftlägesbilden och den taktiska styrningen.

Ett antal nya radararkitekturer för luftbevakningssystem kan komma att införas, men grunden för framtida luftbevakningssystem kommer att vara baserad på monostatisk AESA-radar. Täckningskraven mot mål på både hög och låg flyghöjd medför att både markbaserade och flygburna radarstationer behövs. Huvuddelen av radarstationerna kommer att ha lång räckvidd mot typiska mål men även flygburna radarstationer med kortare räckvidd mot mål på låg flyghöjd kan vara intressanta. Även passiva system är av intresse för att minska systemets sårbarhet genom ökad redundans. Sändningsförmåga på dessa lägre frekvensband kan dessutom troligen lättare återuppbyggas efter ett anfall än en fast radarstationskedja, vilket ger en uthållig spaningsresurs.

Inslaget av mjukvara i framtidens radarstationer ökar. Mjukvaruuppgraderingar kan öka förmågan hos redan installerade system, vilket motiverar fortsatt utveckling av nya signalbehandlingsmetoder.

6 Realiseringsexempel

6.1 AESA-radar

Radarsystem med aktiv elektriskt styrd gruppantenn (AESA) har många fördelar som motiverar de för närvarande högre kostnaderna jämfört med passiv elektriskt styrd gruppantenn (PESA) och mekaniskt styrda antenner [18]. För långräckviddig spaning behövs ofta stora tunga antenner som blir svåra att rikta mekaniskt med tillräcklig precision och snabbhet för att få flexibilitet i antennavsökningen. Med AESA och PESA kan man kombinera sökning och följning mot många, snabba och manövrerande mål som annars riskerade att tappas med mekaniskt styrda antenner med fast uppdateringstakt eller med långsam antennstyrning. Med AESA och PESA finns också möjligheten att växla mellan breda och smala antennlobber beroende på krav på höjdtäckning vid sökning eller monopulsinmätning vid följning.

En nackdel med AESA och PESA är att flera plana antenntytor kan behövas för att täcka större vinkelsektorer. En lösning är att kombinera AESA och PESA med mekanisk styrning för att öka vinkeltäckningen. En annan lösning är att använda krökta antenntytor som kan täcka större vinkelsektorer.

AESA bygger på ett stort antal sändar/mottagarmoduler (T/R-moduler) vilket ger en redundans mot hårdvarufel men ökar kostnaden. Den distribuerade arkitekturen ger också låga drivspänningar för förstärkarna i T/R-modulerna, vilket i sin tur leder till robusthet. Högre verkningsgrad i analoga RF-komponenter förväntas att minska energiförbrukningen, vilket är speciellt viktigt för flygburna radarsystem. AESA ger också nya möjligheter med digitaliserade sändare och mottagare, vilka ger bättre formade antennlobber och mindre felsegnaler från olinjäriteter från RF-komponenter.

AESA-radar blir en mer dominerande tekniklösning för långräckviddig radar beroende på att kostnaden för T/R-moduler och digitala kretsar minskar. Produktionstekniken för dessa komponenter förbättras och drar fördel av motsvarande teknikutveckling inom civil elektronikindustri.

Stirrande radarsystem bygger på att AESA eller PESA antenner kan riktas mekaniskt under längre tid mot valda täckningsområden för att koncentrera radarresurserna mot specifika områden som är taktiskt intressanta. Detta gör att man minskar täckningen temporärt mot icke intressanta områden eller att täckningen där får sämre prestanda.

Stirrande radarsystem kan också vara fast riktade i en viss spaningssektor men detta ger mindre flexibilitet och större risk för bekämpning.

6.2 Passivt multifunktionssystem

Inom ramen för det EU-finansierade projektet ARGUS 3D [19] har ett demonstratorsystem utvecklats. Detta utgörs av en passiv multifunktionradar som utnyttjar FM-radio, DAB-radio och digital-TV (DVB-T) som sändare. Dessa system är, inom ARGUS 3D, tänkta att komplettera civil primär och sekundär radar för civil flygtrafikledning, men är av intresse även för militära tillämpningar.

Systemet positionerar mål genom att kombinera FM-signaler med god räckvidd med DVB-T signaler som tillåter god avståndsupplösning. Höjdtäckning uppnås genom att även fusionera signalen från DAB-radio, som har bättre höjdtäckning än DVB-T. Systemet kombinerar även TDOA-mätningar¹³ med bäringsmätningar erhållna genom digital lobformning i en cirkulär gruppantenn för att öka prestanda. Även systemets målföljning utnyttjar datafusion genom att låta doppler-data från FM-delen av systemet peka ut

¹³ TDOA: "time-difference of arrival".

möjliga målvolymer, där integration sedan sker under längre tid för att förbättra avståndsupplösningen.

Systemet uppges ha goda egenskaper mot smygsmål genom frekvensvalet och genom förmåga att operera bistatiskt. Systemrealisationen är kompakt (mobil) och utnyttjar så långt möjligt digital signalbehandling av SDR-typ¹⁴. Främsta nackdelen är i dagsläget begränsad räckvidd över öppet hav långt från kusten, där tillgången på civila sändare är begränsad.

6.3 Upplyft plattform

Eftersom jorden är rund och radiovågorna utbreder sig i princip rakt fram så tvingas man att lyfta upp en sensor som ska kunna upptäcka lågflygande farkoster på längre avstånd. Ju längre avstånd, desto högre upp måste sensorn. Detta kan lösas på flera sätt;

- Buren av ett bemannat flygplan. Detta kan befinna sig på tillräckligt höga höjder, men har höga driftkostnader och kort uthållighet. Ett sådant system blir också ett högvärdigt mål för motståndarsidan, vilket begränsar var man kan operera systemet.
- Buren av obemannat flygplan (UAV eller RPAS¹⁵). Detta kan också befinna sig på tillräckligt höga höjder och har lägre driftkostnader och längre uthållighet. Systemet är dock ett lika högvärdigt mål, men kan troligen operera närmare konfliktområdet. Dagens regelsystem runt civil luftfart gör det dock svårt att öva och använda systemet under fredstid. Detta problem kommer dock troligtvis att lösas på 10-20 års sikt.
- Buret av ett förankrat luftskepp, en s.k. aerostat. Detta system skulle kunna få attraktiva egenskaper och betydligt lägre driftkostnader än ett flygburet system, men är avsevärt dyrare än ett antal markbaserade sensorer. Uthålligheten är stor samtidigt som tillgängligheten i vårt klimat ännu är otestad och överlevnaden under konflikt kan vara mycket kort.
- Satellitburet system. Ett sådant kommer dock att ha flera begränsningar i form av begränsade prestanda eller icke kontinuerlig täckning med rimligt antal satelliter. Ett intressant alternativ är att placera sändare i satelliter och sedan ha ett flertal mottagare (placerade på flera olika plattformar) som lyssnar på direktsignaler och reflekterade signaler. Varje mottagarstation kan då skapa en luftlägesbild utan att själv sända. För mål på låg höjd krävs naturligtvis att mottagaren är upplyft.

Alla dessa lösningar är tyvärr förhållandevis dyra och har varierande för- och nackdelar. Det går också att finna kompromisser, exempelvis kan man placera en relativt liten radar i ett större antal mindre RPAS:er, men detta leder till svårigheter vid ledning av dessa RPAS:er, se [20].

Radarsensorer placerade på upplyfta plattformar bör om möjligt förses med elektroniskt styrbara gruppantennor av AESA-typ. Den fysiska utformningen av antennen måste dock ta hänsyn till de plattformsbegränsningar, speciellt vid UAV-användning som ställer krav på begränsad storlek och vikt [14].

Den upplyfta plattformen kan även fungera som en plattform för andra typer av sensorsystem och erbjuda en robust multisensorplattform. Speciellt för TBM-scenariot skulle höga vinklar kunna erhållas, vilka kan erbjuda gynnsam kontrast. Även klassificeringsförmåga baserat på fotonräknande lasersystem skulle kunna stödja målklassificering på långa avstånd.

¹⁴ SDR: "Software Defined Radio". Radiosystem baserat på digitalsignalbehandling av digitaliserade signaler.

¹⁵ RPAS = Remotely Piloted Aerial System. Ett system med varierande grad av självständighet.

6.4 OTH-system

Den teoretiska förståelsen för ytvågs-OTH har ökat, liksom möjligheterna att med hjälp av nya vågformer och avancerad signalbehandling komma runt några av de traditionella begränsningarna för denna typ av system. Detta har lett till att nya konceptidéer börjar komma fram med potentiellt bättre prestanda. Dessa behöver dock verifieras med praktiska försök i svensk närmiljö, då salthalten i Östersjön är låg. Ett civilt OTH-system för ytströmsmätning har testats i Skagerack under 2015, men prestanda för militärt intressanta mål har tyvärr visat sig alltför begränsade [21].

Den potentiella nyttan är att ett OTH-system skulle kunna få rollen som en robust larmklocka, för mål på eller låg höjd över ytan, med förmåga till grov-invisning av övriga spaningssensorer. Speciellt intressant är möjligheten att utnyttja vindkraftparker för installation av OTH-system. Dessa består typiskt av ett antal vertikala antennelement med konstant separation, vilka installeras i anslutning till vatten. Detta oprövade koncept kan potentiellt öka systemets räckvidd, men kräver troligen viss anpassning av antensystemets utformning. Däremot bör installationskostnaden vara rimlig då vindkraftparkerna redan har tillgång till kraftmatning och kommunikationslänkar för styrning och övervakning.

6.5 Diskussion

Framtidens spaningssystem är heterogent, komplext och flexibelt. Ett stort antal lösningar kan användas för att kringgå begränsningar i dagens system, t.ex. multistatiska och passiva system för att hantera störning och smygsmål. Inget enskilt delsystem kan sägas vara lämpligt för att lösa alla uppgifter och fysiken sätter ibland begränsningar som är svåra att hantera enbart genom teknologiska framsteg. Framtidens system bör därför idealt vara uppbyggt av ett antal komplementära delsystem, speciellt bör följande förmågor beaktas:

- Upptäckt av mål på låg höjd genom upplyfta plattformar.
- Möjlighet till direkt eldledning genom sensor kedjan, vilket kräver djup integration av de enskilda radarstationerna i ett nätverk och verktyg för att samordna och synkronisera dessa.
- Minskad sårbarhet genom systemreduktion och diversitet på delsystemnivå. Vi saknar idag handfast erfarenhet från provanvändning av ett antal alternativa lösningar.

Framtidens komplexa system ställer även höga krav på bred teknisk kunskap för att fatta rätt beslut vid upphandlingar av nya system såväl som vid livstidsförlängningar av befintliga system. Tillräcklig grundkunskap krävs inom alla delsystem för att på bästa sätt kunna utnyttja systemen och utvärdera dessa i ett större sammanhang. Detsamma gäller förbättringspotential och taktik under systemets livslängd. Sålunda krävs en kunnig upphandlande kund för att undvika leverantörsinlåsningar och för att minimera livscykelkostnaden. Denna kunskap tar tid att bygga upp och kräver ett visst mått av kontinuitet!

Tillverkarna tillhandahåller AESA-system, men koncentrerar idag arbetet på den enskilda radarstationens uppbyggnad. Det är även rimligt att anta att det totala systemet innehåller sensorteknik från flera olika kommersiella aktörer. Förutom arbete på radarstationsnivå krävs därför även ett omfattande arbete för att utveckla metoder för optimering av radarnätverket till olika scenarier och för tillgänglighet till radarstationer efter ett anfall. Detta arbete kräver förutom metodutveckling även tillgång till rätt verktyg, både för planering och för användning i det operativa arbetet. Det är av vikt att förstå konsekvenser vid inriktning av sensorresurser och erhålla återkoppling eftersom flexibiliteten i ett framtida heterogent multifunktionssystem erhålls till priset av ökad komplexitet och sämre överblick om inte adekvat stöd finns tillgängligt för operatörer och för allokering av sensorresurser vid planeringsarbetet.

7 Referenser

- [1] R. Modigs (ed.), "Försvarsmaktens redovisning av perspektivstudien 2013", FM213-276:1, 2013-10-01.
- [2] L. Pettersson, "Digitala gruppantennor för multistatisk radar. En teknisk översikt", FOA C 30632-3.2, 8.4, 1991.
- [3] P.-O. Bergman och P. Grahn, "Ett distribuerat luftförsvar", FOA A 30080-8.4, 1993.
- [4] L. Pettersson, "An S-Band Digital Beamforming Antenna: Design, Procedures and Performance", FOA-R--99-01162-408--SE, 1999.
- [5] Saab Group, Pressmeddelande publicerat 2014-05-12 på <http://saabgroup.com/Media/news-press/news/2014-05/Saab-launches-five-new-radars-for-total-air-domain-awareness>. Se även http://saabgroup.com/globalassets/corporate/investor-relations/cmd/cmd15_surface-radars.pdf, http://www.nyteknik.se/nyheter/it_telekom/radio/article3826110.ece.
- [6] M. Bergstrand (ed.), Studiegrupp (HKV LEDS, HKV PROD, HKV INSS, LSS, SSS, LvSS, FOI, FRA), "Försvarsmaktsgemensam sensorstudie", FM2014-7806:1, 2014-09-16.
- [7] Luftförsvarsutredningen 2040, Omvärldsbeskrivningar, Statens offentliga utredningar, SOU 2013:86, 2013.
- [8] M. L. Meeks, "Radar propagation at Low Altitudes", Dedham, MA: Artech House, 1982.
- [9] M. Skolnik, Kapitel 11 i "Radar Handbook, 2nd Edition", NYC, NY: McGraw-Hill, 1990.
- [10] "European Commission Backs Reallocation of C-band Spectrum to Terrestrial Broadband", tillgänglig på <http://spacenews.com/42136european-commission-backs-reallocation-of-c-band-spectrum-to/> (hämtad 2015-11-13).
- [11] P. Grahn m.fl., "Radar bortom horisonten - OTH. En kort översikt med fokus på ytvågs-OTH", FOI-R--4039--SE, 2014.
- [12] E. F. Knott, J. F. Schaeffer, M. T. Tuley, "Radar Cross Section, 2nd Edition", Rayleigh, NC: Scitech Publishing, 2004.
- [13] V. Koch och R. Westphal, "A new approach to a multistatic passive radar sensor for air/space defense", Proc. of IEEE International Radar Conference RADAR 1995 (Washington, DC), May 1995.
- [14] A. Gustafsson (ed.), "Applikationsexempel, projekt Gruppantennbaserade Radarsystem", FOI MEMO 5541, 2015.
- [15] P. Grahn (ed.) m.fl. "Sensorstyrning i NBF, slutrapport", FOI-R--2397--SE, 2007.
- [16] P. van Dorp, M. P. G. Otten, J. M. M. Verzeilberg, "Coherent Multistatic ISAR Imaging", Proc. Radar 2012 International Conference on Radar Systems (Glasgow, UK), October 2012.
- [17] J. Li och P. Stoica, "MIMO Radar Signal Processing", Hoboken, NJ: Wiley-IEEE Press, 2009.

- [18] W. L. Melvin och J.A. Scheer, "Principles of Modern Radar, Vol. III: Radar Applications", Edison, NJ: Scitech Publishing, 2014.
- [19] H. Kuschel m.fl., "Passive Radar Components of ARGUS 3D", IEEE A&E Systems Magazine, vol. 29:3, p. 15-25, 2014.
- [20] T. Mårtensson (ed.), "RPAS för territorialövervakning 2030 – värdering av några alternativ", FOI-R--3987--SE, 2014.
- [21] P. Grahn, L. Ulander, A. Nelander, "OTH Radarteknik: Genomfört arbete oktober 2014 - juni 2015", FOI MEMO 5429, 2015.

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



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
164 90 Stockholm

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

www.foi.se