

Magnus Herberthson

## Systemstudier Ledningsradar - slutrapport 2003

TOTALFÖRSVARETS FORSKNING SINSTITUT

Sensorteknik

SE-581 11 Linköping

FOI-R--1040--SE

December 2003

ISSN 1650-1942

**Användarrapport**

Magnus Herberthson

## Systemstudier Ledningsradar - slutrapport 2003

<b>Utgivare</b> Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Sensorteknik SE – 581 11 Linköping	<b>Rapportnummer, ISRN</b> FOI-R--1040--SE	<b>Klassificering</b> Användarrapport
	<b>Forskningsområde</b> 4. Spaning och ledning	
	<b>Månad, år</b> December 2003	<b>Projektnummer</b> E3028
	<b>Verksamhetsgren</b> 5. Uppdragsfinansierad verksamhet	
	<b>Delområde</b> 42 Spaningssensorer	
<b>Författare/redaktör</b> Magnus Herberthson	<b>Projektledare</b> Magnus Herberthson	
	<b>Godkänd av</b> Svante Ödman	
	<b>Uppdragsgivare/kundbeteckning</b> FM	
	<b>Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig</b> Magnus Herberthson	
<b>Rapportens titel</b> Systemstudier Ledningsradar - slutrapport 2003		
<b>Sammanfattning (högst 200 ord)</b> <p>Forskning inom VHF/UHF-radar är intressant av flera skäl. Ett huvudskäl är att de förhållandevis låga frekvenserna ger möjlighet till att i viss mån se genom lövverk (spaning mot markmål) eller att, speciellt i kombination med bistatiska mätgeometrier, upptäcka smyganpassade flygmål (stealth). Dessa fenomen, med tonvikt på det senare, har studerats inom projektet "Systemstudier Ledningsradar". Arbetet sammanfattas i denna rapport.</p> <p>Speciellt har ett koncept med en ytdistribuerad markbaserad luftmålsradar (AASR – associativ apertursyntesradar) studerats. Här ger multistatiska mätgeometrier i kombination med nära målresonanta frekvenser ett system med god förmåga till upptäckt, inmätning och följning av flygmål, inklusive smyganpassade sådana. Systemets design gör vidare att det är störtåligt och robust. Å andra sidan ger den speciella mätsituationen upphov till icke-triviala signalbehandlingsproblem; i projektet har vi visat hur det så kallade associationsproblemet kan lösas.</p> <p>Arbetet ligger väl i linje med den internationella utvecklingen. Det finns ett ökat intresse för bi- och multistatiska sensorsystem, inte minst eftersom de signalbehandlingskrav som förut var övermäktiga, med dagens processeringsförmåga är överkomliga. Arbetet är dessutom viktigt med tanke på Sveriges kommande behov av en moderniserad luftmålsradar.</p>		
<b>Nyckelord</b> VHF/UHF-radar, markmål, flygmål, smygmål, bistatisk, multistatisk, associationsproblemet.		
<b>Övriga bibliografiska uppgifter</b>	<b>Språk</b> Svenska	
<b>ISSN</b> 1650-1942	<b>Antal sidor:</b> 21 s.	
<b>Distribution enligt missiv</b>	<b>Pris:</b> Enligt prislista	

<b>Issuing organization</b> FOI – Swedish Defence Research Agency Sensor Technology SE-581 11 Linköping	<b>Report number, ISRN</b> FOI-R--1040--SE	<b>Report type</b> User report
	<b>Programme Areas</b> 4. C4ISR	
	<b>Month year</b> December 2003	<b>Project no.</b> E3028
	<b>General Research Areas</b> 5. Commissioned Research	
	<b>Subcategories</b> 42 Surveillance Sensors	
<b>Author/s (editor/s)</b> Magnus Herberthson	<b>Project manager</b> Magnus Herberthson	
	<b>Approved by</b> Svante Ödman	
	<b>Sponsoring agency</b> FM	
	<b>Scientifically and technically responsible</b> Magnus Herberthson	
<b>Report title (In translation)</b> Concept studies Guidance Radar - final report 2003		
<b>Abstract (not more than 200 words)</b> <p>Research activities in VHF/UHF radar are interesting for several reasons. One main reason is that the comparably low frequencies enable some detection capability through foliage (ground targets) or, in particular in combination with bistatic measurement geometries, enable detection of air targets of stealth type. These issues, especially the latter, have been studied in the project "Concept studies Guidance Radar". The work is summarized in this report.</p> <p>In particular, the concept with a ground based distributed radar for air surveillance (AASR – associative aperture synthesis radar) has been studied. In this concept, multistatic geometries in combination with frequencies which are in near resonance with the targets, give a system with good capacity of detection, positioning and tracking of air targets, including stealth targets. On the other hand, the particular measurement geometry gives non-trivial signal processing problems; we have shown, within the project, how to solve the so-called association problem.</p> <p>The work is well in line with the international development. There is an increasing interest for bi- and multistatic sensor systems, one reason being that signal processing demands which were previously without reach, with the current processing power are surmountable. The work is also important considering Sweden's upcoming need for a modernization of the air surveillance radars.</p>		
<b>Keywords</b> VHF/UHF radar, ground targets, air targets, stealth targets, bistatic, multistatic, the association problem		
<b>Further bibliographic information</b>	<b>Language</b> Swedish	
<b>ISSN</b> 1650-1942	<b>Pages</b> 21 p.	
	<b>Price acc. to pricelist</b>	

## Innehåll

<b>1 Syfte och Bakgrund</b>	<b>5</b>
<b>2 Markmål</b>	<b>6</b>
<b>3 Luftmål</b>	<b>7</b>
3.1 Internationella trender . . . . .	7
3.2 Försvarsmaktens behov . . . . .	7
3.3 Samarbeten . . . . .	9
3.4 Principen för AASR . . . . .	9
3.4.1 Associationsproblemet . . . . .	10
3.5 Uppnådda forskningsresultat . . . . .	12
3.5.1 Signalbehandlingsalgoritmer . . . . .	12
3.5.2 Signalbehandling . . . . .	15
3.5.3 Mätningar och beräkning av bistatisk målarea . . . . .	16
3.5.4 Bistatiska mätningar mot flygmål . . . . .	17
3.5.5 Övrigt . . . . .	18
3.6 Fortsatt forskning . . . . .	18
3.7 Slutsatser . . . . .	19
3.8 Referenser . . . . .	20

## 1 Syfte och Bakgrund

Denna rapport syftar till att sammanfatta aktiviteter och uppnådda forskningsresultat inom projektet "Systemstudier Ledningsradar", samt peka på dessas betydelse för svenska intressen. Projektet, som har varit finansierat av Försvarmakten, har löpt åren 2001-2003 med en årsbudget på drygt fyra miljoner kronor.

Det övergripande syftet har varit att undersöka övervakningssystem som medger inmätning av såväl yt- som luftmål. Vad gäller ytmål, och kanske då främst markmål, så har utmaningen varit att åstadkomma ett flygbaserat radarsystem (LORA) som medger en hög avsökningskapacitet i kombination med förmågan att detektera rörliga markmål.

I flygmålsfallet har projektet syftat till att undersöka möjligheterna att designa ett i såväl rum som frekvens distribuerat system som skall kombinera förmågan att upptäcka flygmål, inklusive smyganpassade sådana, med egenskapen att vara störtåligt och robust. Ett sådant system, associativ apertursyntesradar, (AASR) har föreslagits och studerats.

## 2 Markmål

Forskningen kring markmålsfrågor har skett i samarbete med projekten “Radarsignalbehandling för SAR och GMTI” samt “Radarsystemteknik och bredbandsradar”. Dessa projekt har varit huvudaktörer i markmålsfrågor medan projektet “Systemstudier Ledningsradar” har haft en stöttande funktion; för det senare projektet har tyngdpunkten legat på luftmålsfrågor. Av den anledningen beskriver vi i denna rapport arbetet kring luftmålsövervakning medan vi för markmålsfrågorna hänvisar till [23], [25] och däri angivna referenser.

### 3 Luftmål

#### 3.1 Internationella trender

När det gäller de internationella trenderna för luftmålsspaning med radar, kan man förmoda att en stor del av de senaste landvinningarna är omgärdade med sekretess. Det är därför svårt att veta exakt hur stora framsteg som har skett. Vad som dock är klart är den tydliga trenden att studera och utveckla bistatiska och multistatiska radarsystem, såväl system med mottagare och sändare samlokaliserade som system med sändare och mottagare åtskilda. I det senare fallet skiljer man dessutom mellan aktiva (sändaren är en kontrollerad del av radarsystemet) och passiva (sändaren styrs ej av radarsystemet utan har ett annat primärt syfte, till exempel att sända ut en radio- eller TV-signal) system.

Fördelarna med sådana system är uppenbara, även om det naturligtvis även finns nackdelar. Bland nackdelarna ser vi till exempel en mer komplex mätgeometri, krav på fler "fri-sikts-sträckor", positionerings- och synkroniseringsproblem. Vidare ställs ökade krav på förmågan att kommunicera sensordata, antingen mellan radarnoder eller till en separat signalbehandlingsenhet. Dessutom kan klotterproblematiken i vissa lägen vara ogynnsam, samtidigt som många samtidigt mål kan ge komplexa mållokaliseringsalgoritmer.

Dessa problem behöver dock ej vara oöverstigliga och när de lyckas bemästras finns flera fördelar. Mottagarna kan ej lokaliseras genom signalspaning och en störsändare måste därför sprida sin signal både geometriskt och ibland frekvensmässigt, vilket naturligtvis är en nackdel sett ur störarens synvinkel. Även om bi- eller multistatiska system ger mer komplexa mätgeometrier, erbjuder dessa dock ofta en fördel när det gäller detektion av mål. Den bistatiska radarmålarean är som regel avsevärt större än den monostatiska dito. Det kan dels bero på att eventuell smyganpassning har skett mot monostatisk detektion och dels på att den fundamentala bistatiska spridningen är omöjlig att ens i princip eliminera (fysikaliskt känd som Babinets princip). Ett multistatiskt system kan dessutom erbjuda en större robusthet och redundans. En förlust av enstaka sensorer behöver inte innebära att systemet slutar fungera utan snarare att man får viss prestandaförsämring ("graceful degradation"). För en utförligare genomgång av bi- och multistatiska funktioner hänvisas till [26], [2], [1].

När det gäller existerande och operativa system så råder som sagts en viss sekretess. Två uppmärksammade system är "CELLDAR" (Roke Manor Research) och Lockheed Martins system "Silent Sentry". Bägge systemen är multistatiska passiva system, där det förra utnyttjar sändsignaler från mobiltelefonimaster medan det senare använder TV-signaler. Deras exakta prestanda är ej offentliga, och förmodligen inte heller kända eftersom de befinner sig i ett utvecklingskede och ej är i operationell drift.

#### 3.2 Försvarsmaktens behov

Det finns naturligtvis ett stort behov av markbaserad luftmålsspaning i Sverige eller i svensk regi utomlands i samband med internationella insatser. De bägge markbaserade radarsystemen PS860 samt PS870 som arbetar på S-band resp C-band har varit i drift ett tjugotal år, och även om det finns planer på mer eller mindre omfattande uppgraderingar kommer behovet av att på allvar ersätta dessa att växa kontinuerligt.

Det finns idag planer på att förnya sensorsystemen för bland annat spaning mot



luftmål till, säg, år 2012-2014. Man kan då titta på spaning från mark, flygande plattformar eller aerostater (satellitspaning mot flygmål bedöms ej vara realistiskt för Sveriges del, men är en prioriterad delkomponent i amerikanska framtidslösningar [9]), men under alla omständigheter pekar tidshorisonten på att utvecklingsarbetet med att ta fram morgondagens system måste inledas omgående.

Den snabba allmänna teknikutvecklingen, inte minst vad gäller signalbehandling, erbjuder helt nya möjligheter för sensorrealiseringar. Detta bör naturligtvis utnyttjas också i fallet luftmålsspaning. Studier, till exempel [5], pekar på möjliga framtida sensorer och deras roll i ett större perspektiv: till exempel utveckling av PS890, aerostater, OTH-radar samt det ytdistribuerade luftövervakningssystemet AASR (Associativ apertursyntesradar). Detta senare koncept har studerats inom projektet "Systemstudier Ledningsradar", och kommer att beskrivas nedan. AASR nämns eller ingår också i andra sammanhang, [6], [3], och vi påpekar också att en värdering av AASR-tekniken tillsammans med dess nytta för det svenska försvaret kommer att bli föremål för ett speciellt försvarsmaktsfinansierat uppdrag under 2004.

### 3.3 Samarbeten

Som tidigare nämnts sker arbetet på FOI-nivå i nära samarbete med projekten "Radarsignalbehandling för SAR och GMTI" samt "Radarsystemteknik och bredbandsradar". Den gemensamma nämnaren är det generiska lågfrekventa radarsystemet LORA. Detta system har möjliggjort bistatiska mätningar mot flygmål (se avsnitt (3.5.4)) till en mycket låg rörlig kostnad eftersom samma hårdvara kan utnyttjas för flera olika tillämpningar, i detta fall antingen en markbaserad konfiguration för spaning mot flygmål eller en flygplansinstallation för markmålsspaning. Sett ur ett rent ekonomiskt perspektiv bör dessa bägge spår hållas vid liv samtidigt eftersom man får dubbla tillämpningsområden för LORA (hårdvaran) till en låg extra kostnad.

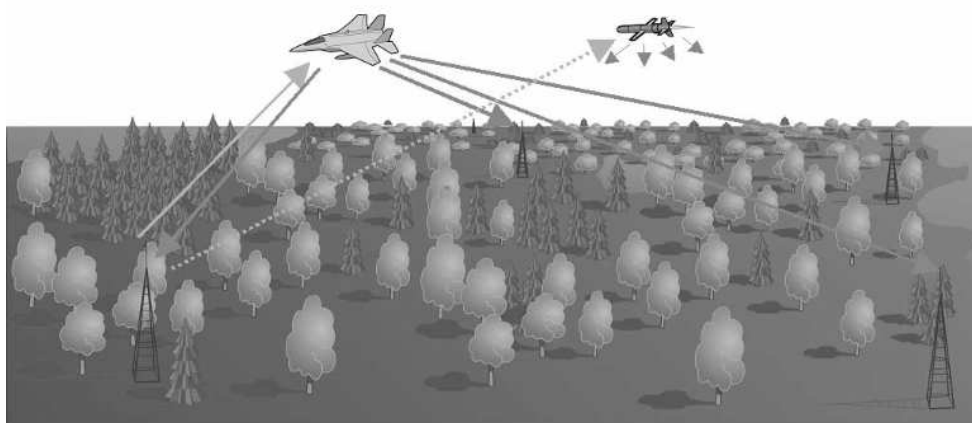
Vidare bedrivs vid FOI projektet "Avancerade målsökarsystem och koordinatstyrning" som tittar på frågeställningar kring prestandakrav hos sensorsystem för att kunna leda en robot mot luftangrepp av olika typ till exempel en robot. Som sensorsystem har AASR valts och frågeställningar som berörs är till exempel krav på sensorsystemet vad gäller noggrannhet, uppdateringstakt, kommunikationskrav etc. Ytterligare information fås i [24].

Främsta samarbetspartner utanför FOI har varit EMW (Ericsson Microwave Systems AB) som också har studerat tekniken kring AASR. Samarbetet har inneburit ett regelbundet informations- och erfarenhetsutbyte. Mycket grovt kan sägas att arbetet, med uppdragsgivarnas goda minne, har delats upp så att FOI har lagt tyngdpunkten på signalbehandlingsfrågor, medan EMW har utnyttjat sin erfarenhet i mera praktiska radarfrågor, till exempel störundertryckning och antenndesign.

Internationellt finns inget stadfäst samarbete på bilateral nivå, även om diskussioner och visst informationsutbyte förekommer. Däremot deltar projektet i det initierade CEPA-programmet "CEPA-1 Multistatic Radar Technology".

### 3.4 Principen för AASR

Principen för AASR är den följande, se figur 1.



Figur 1: Principen för AASR

Man tänker sig ett antal radarstationer utplacerade över ett område. Varje station kan i princip vara en sändare eller mottagare eller sändare och mottagare. I denna rapport behandlar vi fallet att varje mast innehåller såväl sändare som mottagare (se dock avsnitt (3.6)).

Det innebär att varje mast dels kommer att göra en monostatisk mätning, men också att varje mast tillsammans med de närliggande masterna åstadkommer bistatiska mätningar. Den precisa utformningen av antennen kan variera, men i ett grundutförande påvisas hur systemet kan fungera i fallet att varje antenn är isotrop (rundstrålande). (Även om de nedan diskuterade signalbehandlingsalgoritmerna fungerar i fallet total antennisotropi, kan man av andra skäl, till exempel störundertryckning eller för att få en antennvinst, tänka sig många olika antenner och antennarrayer.) Den tillgängliga informationen blir därför monostatiskt eller bistatiskt avstånd samt motsvarande radiella (eller radialelliptiska) doppler.

Givet dessa indata är AASR sedan kapabelt att detektera, associera, positionera och följa inmätta mål. Positioneringen skall ske med avseende på både läge och hastighet, det vill säga målen skall bestämmas i ett sexdimensionellt tillståndsrum. Associeringen och positioneringen blir, som vi kommer att se nedan, icke-trivial med tanke på formen på indata. Det hela bygger på en viss typ av överbestämning via de bistatiska mätningarna, mätningar som förutom att ge redundans och robusthet, via sin geometri är extra lämpade att detektera smyganpassade mål (jämför avsnitt (3.1)).

Eftersom AASR inte finns i den fysiska världen är det svårt att ange exakta parametrar för systemet. Det beror naturligtvis också på utformning, syfte och placering av systemet. Likaså kan man tänka sig såväl stationära som mobila system vilka då kan komma i olika varianter. För att ändå ge en uppfattning om systemdesignen tänker vi oss ett system med följande exempelparametrar:

- Mastavstånd 20-50 km
- Masthöjd  $\sim 30$  m
- Frekvenser  $\sim 500 - 1500$  MHz
- Bandbredd 10 - 40 MHz
- Uppdateringstakt  $\sim 1$  Hz

För vidare information om systemparametrar och AASR i stort hänvisar vi till [10], [12].

### 3.4.1 Associationsproblemet

Givet ett system med AASR-design, det vill säga ett system där vi endast har tillgång till avstånds- och dopplerinformation (monostatisk eller bistatisk) men ingen vinkelinformation, uppstår problemet hur man korrekt skall associera data från olika mätfaciliteter. (Med en mätfacilitet avses här antingen en monostatisk eller en bistatisk mätning.) Nämligen, två faciliteter som bägge ser ett antal gemensamma mål kan ej avgöra vilken registrering hos en facilitet som motsvarar samma mål hos en annan registrering. Mätningarna uppträder som mängder utan någon speciell ordning.

**Exempel.** I ett enkelt fall, som ändå illustrerar principen, tänker vi oss tre radarstationer som via sina monostatiska mätningar ser  $N$  mål var; vi bortser för tillfället från dopplerinformationen. Varje radarstation kan, till varje mål och dess avstånd  $R_i$ , enbart veta att målet är på en sfär med radie  $R_i$  runt stationen i fråga. Det innebär att vi totalt sett har tre skaror av sfärer, var och en av skarorna centrerad kring någon av radarmasterna. Av detta följer (här bortser vi från en

spegelsymmetri) att dessa sfärer kan skära varandra (alla tre) i upp till  $N^3$  skärningspunkter. Problemet är att avgöra vilka punkter av dessa  $N^3$  som hyser de  $N$  målen. Detta kan inte göras utan extra information, det vill säga för att lösa problemet behövs ytterligare mätningar, monostatiska eller bistatiska. Givet dessa extra mätningar, så att målen kan positioneras i princip, kvarstår ändå frågan hur man gör i praktiken (om  $N$  är stort blir det för tidsödande att undersöka alla  $N^3$  punkter). Det problemet kallas associationsproblemet och fomuleras på nytt nedan. Ett antal lösningar på problemet beskrivs sedan i nästa avsnitt.

Låt oss införa följande beteckningar. Vi tänker oss  $N_s$  radarstationer i ( $\mathbf{R}^3$ ). Stationerna betecknas med  $s_j, j = 1, \dots, N_s$  och deras ortsvektorer med  $\bar{r}_j, j = 1, \dots, N_s$ . Vi tänker oss också  $N_t$  rörliga mål som skall detekteras. De betecknas med  $t_i, i = 1, \dots, N_t$  och deras motsvarande ortsvektorer med  $\bar{p}_i = \bar{p}_i(t), i = 1, \dots, N_t$ .

Varje station har förmågan att för varje mål (upp till något maximalt avstånd) mäta avstånd och radiell doppler. Sålunda, station  $s_j, 1 \leq j \leq N_s$  kommer, vid en given tid, registrera

$$d_j(k) = |\bar{p}_k - \bar{r}_j|, \quad k = 1, 2, \dots, N_{d_j} \leq N_t$$

$$v_j(k) = \frac{d}{dt} |\bar{p}_k - \bar{r}_j|, \quad k = 1, 2, \dots, N_{d_j} \leq N_t$$

För tillräckligt närliggande stationer får vi också bistatisk information genom att man sänder från en station och tar emot från en annan. För stationsparet  $(s_i, s_j)$ , innebär det att man mäter, för  $1 \leq i, j \leq N_s$ ,

$$\begin{aligned} d_{ij}(k) &= |\bar{p}_k - \bar{r}_i| + |\bar{p}_k - \bar{r}_j| = d_i(k) + d_j(k), & k = 1, 2, \dots, N_{d_{ij}} \leq N_t \\ v_{ij}(k) &= \frac{d}{dt} |\bar{p}_k - \bar{r}_i| + \frac{d}{dt} |\bar{p}_k - \bar{r}_j| = v_i(k) + v_j(k), & k = 1, 2, \dots, N_{d_{ij}} \leq N_t \end{aligned} \quad (1)$$

Med dessa beteckningar följer att,  $d_{ii}(k) = 2 d_i(k), v_{ii}(k) = 2 v_i(k), i = 1, 2, \dots, k = 1, 2, \dots$

Associationsproblemet är då att bland alla tänkbara kombinationer av indata diskriminera mellan korrekta sådana (mål) och falska sådana (spöken). En association som ännu inte är bestämd till att vara ett mål eller ett spöke kallas ibland en kandidat. Målen skall bestämmas till läge och hastighet, det vill säga vi tittar på punkter i tillståndsrummet  $S = \mathbf{R}^6$ .

Associationproblemet är nu: *Givet indata på formen (1), bestäm mål  $t_i, i = 1, 2, 3, \dots$  i  $S$  kompatibla med indata.* Observera att monostatiska mätningar ingår i (1) om  $i = j$ .

Metoder för att lösa detta problem finns både beskrivna och/eller utvärderade i [10], [12], [15], [18], [22], [19]. Se även nästa avsnitt. Låt oss först dock kommentera följande faktum. Antag att vi vill positionera flygmålen över en delmängd i tillståndsrummet  $S$  som i rummet är ett rätblock med kvadratisk basyta på 50 km x 50 km och med en höjd på 20 km, och som i hastighetsrummet är en kub med sidan 2000 m/s. Man ser att med upplösningsceller som är 5 m i sida i lägesrummet och 4 m/s i sida i hastighetsrummet, får denna del av  $S \cdot 10^{19}$  celler. Förutom de rent matematiska problemen innebär det stora antalet celler att traditionella metoder som till exempel bakåtprojektion beräkningsmässigt blir omöjliga att använda.

### 3.5 Uppnådda forskningsresultat

I detta avsnitt ger vi en översikt över (större) aktiviteter och resultat som har framkommit inom luftmålsspaningsdelen av projektet. Aktiviteterna har varit blandade, vilket framgår av avsnittsrubrikerna nedan. Således har matematiska frågeställningar kombinerats med framtagning av signalbehandlingsalgoritmer som sedan implementerats och utvärderats. Praktiska mätningar mot flygmål har genomförts liksom mätning och beräkning av bistatisk målarea. Under projekttiden 2001-2003 har tre patent sökts, se [11], [14], [16].

#### 3.5.1 Signalbehandlingsalgoritmer

Under det hittills varande arbetet har tre olika metoder för att lösa association-sproblemet utvecklats. Dessa kommer här kort att beskrivas tillsammans med hänvisningar till utförligare förklaringar. Inledningsvis kan dock kort sägas att de tre metoderna är av två principiellt olika slag. Den ena, *metoden med reduktion av tillståndsrummet* tar just tillståndsrummet  $S$  som utgångspunkt. Metoden försöker sedan undersöka  $S$  på ett listigt sätt, se nedan. De två andra metoderna, *den direkta lokaliseringmetoden* samt *snabb bistatisk associering*, försöker i stället utgående från indata direkt beräkna målens läge i  $S$ .

##### Metoden med reduktion av tillståndsrummet.

Tanken här är att inte direkt dela in  $S$  i det stora antal celler som man potentiellt sett har enligt diskussionen i avsnitt (3.4.1), utan att i stället göra en initialt sett mycket grövre indelning. Med samma exempelparametrar som i avsnitt (3.4.1), kan man tänka sig att dela in den relevanta delen av  $S$  i rätblock med låt säga sidan 1 km resp 100 m/s. Dessa blir då hanterbart många. Idén är nu att till varje sådant grövre rätblock undersöka hur många faciliteter som potentiellt sett *kan* se mål i rätblocket i fråga, och sedan analysera hur många av dessa faciliteter som faktiskt *har* registreringar som är kompatibla med rätblocket i fråga.

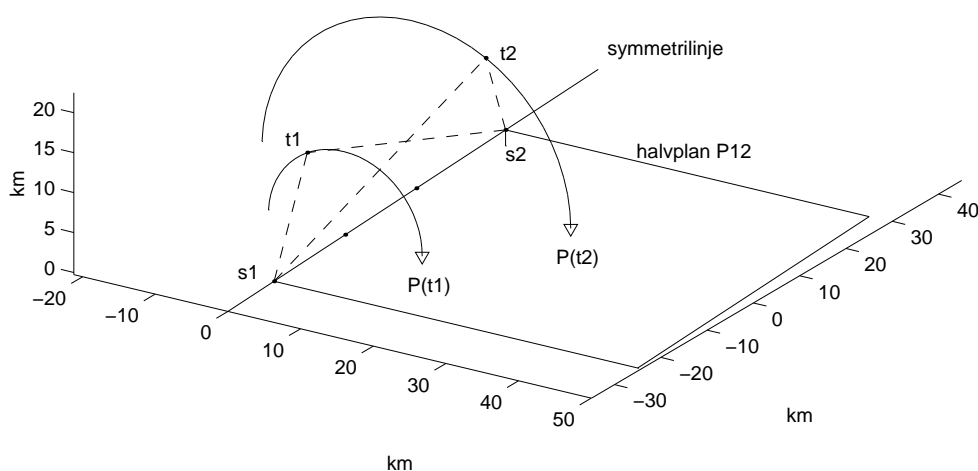
Att en mätfacilitet "ser" ett mål i ett rätblock innebär alltså att det finns ett mål (någonstans) vars avstånd och doppler gör att det *kan* ligga i rätblocket. Om tillräckligt många av de aktuella faciliteterna ser ett mål i ett givet rätblock sparas det som ett kandidaträtblock, i annat fall kasseras det som tomt. Genom att ett antal rätblock nu blir förkastade kan de överlevande rätblocken delas in i mindre rätblock utan att det totala antalet blir för stort. Genom indelningen kommer kandidaträtblock som i själva verket råkar vara tomma bli förkastade med ökad sannolikhet, medan rätblock som innehåller mål kommer att överleva (det vill säga den mindre del där målet finns). Metoden finns utförligare beskriven i [10], [12] och [22], men kan förenklat sammanfattas på följande sätt:

- Dela in tillståndsrummet  $S \in \mathbf{R}^3$  i relativt grova rätblock.
- Bestäm, för varje rätblock, hur många av de faciliteter som kan se mål i rätblocket som faktiskt gör det.
- Jämför detta antal med ett tröskelvärde och förkasta rätblocket (som tomt) eller behåll det (som kandidaträtblock).
- Samla alla kandidaträtblock och dela dem i mindre rätblock.
- Upprepa förfarandet.

- Sluta när rätblocken har nått ner till önskad rumslig respektive hastighetsupplösning.

### Den direkta lokaliseringsmetoden.

Denna metod försöker utgående från mätdata direkt bestämma målens lägen i tillståndsrummet. Den bygger på följande observation: Till två givna stationer gäller att deras monostatiska mätningar och deras kombinerade bistatiska mätningar delar en rotationssymmetri, nämligen runt den tänkta linje som förbinder de bägge stationerna, se figur 2. Det innebär att om vi bara har ett mål som dock ses av de tre faciliteterna, så är målet bestämt till att ligga på en halvcirkel, där halvcirkeln i fråga bestäms av enbart de monostatiska mätningarna. Den bistatiska mätningen kommer att antingen förkasta eller stödja halvcirkeln men inte i sig ge någon mer precis lägesbestämning. Motsvarande kommentar gäller för dopplermätningarna.



Figur 2: Principen för AASR

Om vi har de monostatiska mätningarna  $\{d_i(k)\}_k$  och  $\{d_j(m)\}_m$  tillsammans med motsvarande dopplermätningar  $\{v_i(k)\}_k$ ,  $\{v_j(m)\}_m$  samt även tillhörande bistatiska mätningar  $\{d_{ij}(n)\}_n$ ,  $\{v_{ij}(n)\}_n$  så måste följande gälla. För givna  $k$  och  $m$  så kan  $d_i(k)$  och  $d_j(m)$  (och även  $v_i(k)$  och  $v_j(m)$ ) bara höra till samma mål om det också finns ett  $n$  så att, med någon lämplig tolerans,

$$d_{ij}(n) = d_i(k) + d_j(m) \quad \text{och} \quad v_{ij}(n) = v_i(k) + v_j(m)$$

Detta ger en möjlighet att göra en förassociering av data i ett fyrdimensionellt rum (i stället för ett sexdimensionellt), och denna lägre dimensionalitet gör associeringen snabbare. För att sedan positionera målen i det fulla sexdimensionella tillståndsrummet kombinerar man symmetrifall enligt ovan på ett sätt som beskrivs närmare i [15], [14], där också metoden som helhet beskrivs noggrannare. En grov sammanfattning blir, under antagandet att det finns  $N$  mål som ses av alla faciliteter,

- Fixera  $i, j$ .

- Givet  $\{d_i(k)\}_k$  och  $\{d_j(m)\}_m$ , bilda  $N^2$  kandidater (alla kombinationer).
- Behåll endast kandidater om det finns ett  $n$  så att  $|d_i(k) + d_j(m) - d_{ij}(n)| < \text{tolerans}$
- Behåll endast dessa kandidater om också, för samma  $n$ ,  $|v_i(k) + v_j(m) - v_{ij}(n)| < \text{tolerans}$
- Tag kandidater från två par av stationer  $(s_i, s_j)$  och  $(s_i, s_k)$  där en station är gemensam.
- Kombinera kandidater från dessa två stationspar för att antingen förkasta falska kandidater eller bestämma överlevande kandidaters tredimensionella läge och hastighet.

Denna metod kräver endast  $O(N^2 \log N)$  antal operationer om  $n$  är antalet mål.

Snabb bistatisk associering.

Metoden med snabb bistatisk associering är till sin natur lika den direkta lokaliseringmetoden i det att den också arbetar direkt med indata. Den huvudsakliga skillnaden är att metoden endast använder bistatiska mätningar, vilket är en avgjord fördel vid detektion av smyganpassade mål som företrädesvis är utformade för att ge litet radareko vid monostatiska radarmätningar. Vissa smärre komplikationer uppstår i gengäld; i allmänhet ger skärningar av cirklar och sfärer (från monostatiska mätningar) upphov till kvadratiske ekvationssystem som enkelt kan lösas medan bistatiska mätningar, som ger skärningar mellan ellipser och ellipsoider i allmänhet medför algebraiska ekvationer av ordning fyra. I den här beskrivna metoden finns dock en viss redundans som gör att det problemet försvinner.

Den bärande idén i metoden med snabb bistatisk associering är en observation som liknar den för den direkta lokaliseringmetoden, men alltså endast utnyttjar bistatiska mätningar. Priset är att det krävs bistatiska mätningar mellan fyra inblandade stationer även om metoden inte behöver utnyttja samtliga dessa.

Antag sålunda för enkelhets skull att vi återigen har  $N$  mål som alla ses från de bistatiska mätningar som uppkommer från fyra radarstationer. Det innebär att vi för den bistatiska mätningen  $B_{ij}$  (mellan station  $s_i$  och  $s_j$ ) har mätningarna

$$d_{ij}(k) \text{ och } v_{ij}(k), 1 \leq k \leq N, \quad ij = 12, 34, 13, 24, 14, 23$$

Till ett givet mål ges alltså de bistatiska avstånden av  $d_{14}(k), d_{23}(\kappa), d_{12}(n), d_{34}(\nu), d_{13}(m), d_{24}(\mu)$  för några värden på  $k, \kappa, n, \nu, m, \mu$  (och på samma sätt för dopplermätningarna). Man observerar nu att för dessa värden på  $k, \kappa, n, \nu, m, \mu$  måste gälla att

$$d_{14}(k) + d_{23}(\kappa) = d_{12}(n) + d_{34}(\nu) = d_{13}(m) + d_{24}(\mu)$$

Detta kan användas för att associera och sedan positionera målen. Betydelsen av att ha tre storheter som alla är lika är att man kan få antingen ökad förmåga att förkasta falska mål eller också skaffa sig en förmåga att hantera vissa typer av databortfall.

Metoden, som kräver  $O(N^2 \log N)$  operationer ( $N$  antal mål) finns utförligare beskriven i [19], men kan kort sammanfattas enligt följande.

- Bilda de  $N^2$  summorna  $d_{12}(n) + d_{34}(\nu)$ ,  $1 \leq n, \nu \leq N$ . Sortera dem och använd beteckningen  $d_{12+34}(k)$ ,  $1 \leq k \leq N^2$ .

- Gör samma sak med  $d_{13}(m) + d_{24}(\mu)$ ,  $1 \leq m, \mu \leq N$  så att vi får  $d_{13+24}(\kappa)$ ,  $1 \leq \kappa \leq N^2$ .
- Associera mål från  $d_{12+34}(k)$ , med mål från  $d_{13+24}(\kappa)$  (kandidater) om  $|d_{12+34}(k) - d_{13+24}(\kappa)| < \text{tolerans}$
- Behålla associerade mål om också  $|v_{12+34}(k) - v_{13+24}(\kappa)| < \text{tolerans}$
- Positionera målen i tillståndsrummet.

Om mätningarna  $d_{14}$  och  $d_{23}$  finns tillgängliga används dessa på lämpligt sätt. Vi nämner också att det finns effektiva metoder att från fyra elliptiska avstånd snabbt verkligen beräkna målens position och hastighet.

### 3.5.2 Signalbehandling

De tre algoritmerna beskrivna i föregående avsnitt har alla implementerats och utvärderats i varierande omfattning. Vi beskriver här kort läget för var och en av de tre metoderna, och avslutar med några erfarenheter från simuleringarna.

#### Metoden med reduktion av tillståndsrummet.

Denna metod finns implementerad och utvärderad i Matlab. Det finns också en första implementering i C++, men ännu ingen utvärdering där. Jämfört med de bägge andra metoderna, som är implementerade i C++, verkar denna till sin natur (dvs bortsett från valet av programmeringsspråk) vara långsammare under de situationer som vi har valt att simulera. Det visar sig dock att det finns sätt att snabba upp associeringshastigheten genom att arrangera delningen i tillståndsrummet lite annorlunda och sedan stryka indata som hör ihop med redan detekterade mål. Implementeringen och en simulering av metoden finns beskriven i [22].

#### Den direkta lokaliseringmetoden.

Den direkta lokaliseringmetoden finns implementerad i C++ med ett gränssnitt i Java. I programmet finns en omfattande möjlighet att välja stationsgeometri, målkaraktäristik, mätnoggrannhet, att spara scener och målfördelningar eller att utvärdera data etc. Metoden visar sig vara snabbare än ovanstående, vilket också är förväntat. Implementering och simulering finns beskrivet i [18].

#### Snabb bistatisk associering.

Denna metod, som är den senast framtagna, finns implementerad i C++ (gränssnitt i Java) men den är ännu ej utvärderad. I snabbhet ligger den nära den direkta lokaliseringmetoden.

Erfarenheterna från simuleringarna så långt är de förväntade. Metoden med reduktion av tillståndsrummet är den långsammaste metoden även om inte något stort arbete lagts ner på att verkligen optimera koderna med avseende på snabbhet. Notera också att simuleringarna hittills antar att målen är små punktformiga (isotropa) objekt, vilket inte är sant, men att också metoderna inte drar nytta av en eventuell historik à la målföljning i simuleringarna. Ytterligare en egenskap hos mätgeometrin bekräftas av simuleringarna, nämligen att målpositioneringen ger sämre noggrannhet när det gäller att korrekt bestämma höjden på lågt flygande mål.

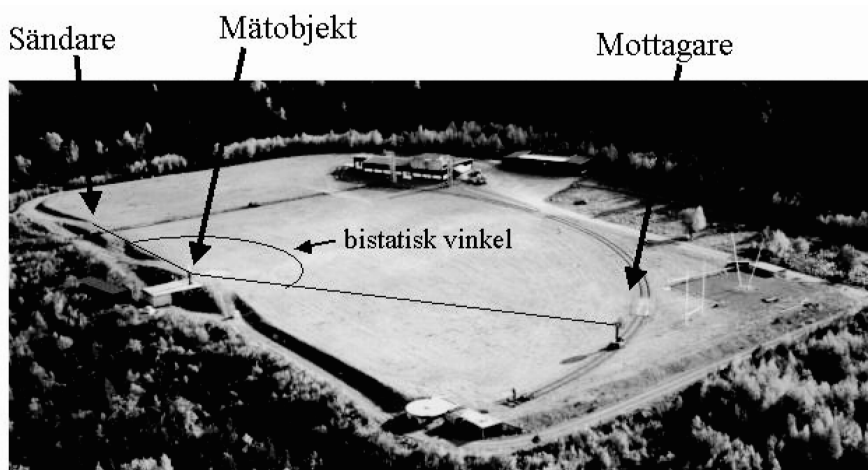


### 3.5.3 Mätningar och beräkning av bistatisk målarea

Som indikeras i avsnitt 3.1 har bistatiska radarmålareor rönt ett ökat intresse under de senaste åren. Ett skäl är att tekniken att smyganpassa objekt (flygplan, fartyg, etc.) har huvudsakligen tillämpats i det monostatiska fallet, dvs man försöker vid designen av nya farkoster begränsa återspridningen av belyst radarstrålning i infallsriktningen. Även om denna begränsning i viss mån kan åstadkommas genom radarabsorberande material, är det vanligaste sättet att tillse att den inkommande energin sprids i andra riktningar än infallsriktningen. Som också kommenterades i avsnitt 3.1 har bistatiska och multistatiska system fått ökad uppmärksamhet, vilket naturligtvis också gäller motsvarande radarmålarea.

I fallet AASR är bistatiska detektioner centrala och av den anledningen har mätningar och beräkningar av bistatisk målarea utförts. I valet mellan att ha ett "realistiskt" eller "enkelt" mål föll valet på det senare på grund av att det då går att jämföra mätningarna med beräkningar.

Mätningarna har utförts vid FOI:s mätplats "Lilla Gåra", se figur 3.



Figur 3: Mätuppställningen på Lilla Gåra

Som nämnts valdes till denna mätning ett mål med enkel geometri; en cylinder. Med tanke på mätapparatur och mätönskemål befanns en lämplig storlek (längd) på cylindern vara omkring en meter. Eftersom en cylinder kan ses som en enkel nedskalad modell av en kryssningsrobot bör valet av frekvens skalas på samma sätt. Från en tänkt situation där en kryssningsrobot med längd upp till 10 m belyses av radarstrålning med frekvenser på uppemot 1 GHz, valdes för mätningarna frekvenser kring 10 GHz. Som bistatiska vinklar valdes vinklarna  $90^\circ$ ,  $100^\circ$ ,  $110^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $140^\circ$ ,  $150^\circ$ ,  $160^\circ$ ,  $170^\circ$ , samt även  $0^\circ$ , dvs en monostatisk mätning.

Ytterligare en tanke med mätningarna var att undersöka olika dämpmaterials inverkan, återigen speciellt i fallet stora bistatiska vinklar. Mätningarna skedde därför mot en metalldcylinder samt motsvarande cylinder klädd med två olika dämpmaterial. Slutligen skedde mätningarna mestadels i polarisation VV (vertikal i sändning och mottagning).

Sålunda har mätningarna utförts under följande omständigheter:

- Bistatiska vinklar:  $(0^\circ, )90^\circ, 100^\circ, 110^\circ, 120^\circ, 140^\circ, 150^\circ, 160^\circ, 170^\circ$ .
- Frekvenser: 8.0, 8.5, 9.0, ... 11.0 GHz.

- Polarisationer: VV ( samt HH på den monostatiska mätningen)
- Aspektvinklar hos mätobjektet:  $0^\circ - 180^\circ$ , i steg om  $360^\circ/2^{14} \sim 0.022^\circ$ .
- Utgående från en metalldcylinder med längd 1 m och diameter 10 cm undersöktes radarmålarean för cylindern i tre fall:
  - i enbart metalldcylindern
  - ii metalldcylindern klädd med dämpmaterial 'AN72'
  - iii metalldcylindern klädd med dämpmaterial 'AN73' (se nedan)

Dämpmaterialen 'AN72' samt 'AN73' står för motsvarande material hos leverantören Emerson & Cuming:s ECCOSORB-serie.

Resultatet av dessa mätningar finner man i [8]

Som nämntes tidigare möjliggör cylindersymmetrin förhållandevis enkla teoretiska beräkningar av den bistatiska radarmålarean. Sådana har utförts vid institutionen för mikrovågsteknik vid FOI i Linköping, och beräkningarna har skett med en tidsdomänbaserad numerisk lösare (FDTD). Vidare har parametrarna vid dessa beräkningar valts för att efterlikna mätsituationen. Resultaten av dessa beräkningar, som visar god överensstämmelse med mätningarna, finns redovisade i [7].

### 3.5.4 Bistatiska mätningar mot flygmål

För att också skaffa sig en erfarenhet om bistatiska mätningar mot flygmål, har sådana utförts vid FOI. Geometriskt har två mätplatser varit inblandade, nämligen FOI i Linköping samt FOI:s mätplats Lilla Gåra (se figur 3) som är belägen ca 20 km söder om FOI (i Linköping). Vid Lilla Gåra har den existerande utrustningen använts, medan vid FOI har LORA-hårdvaran använts. Vidare har Lilla Gåra enbart använts som sändare medan FOI har använts som såväl sändare som mottagare. Det innebär att mätningarna har gett en bistatisk mätning (Från Lilla Gåra till FOI) samt en monostatisk mätning (FOI - FOI).

Mätningen skedde mot en SK60 som flög på ca 1000 m höjd i en cirkulär bana med radie 1 km. Använda frekvenser låg i intervallet 800 - 830 MHz, där dock varje mätning använde en signal med låg bandbredd (pulsad cw). Mätomständigheterna kan sammanfattas enligt nedanstående:

- Pulsform: pulsad cw, pulslängd  $20 \mu s$  (6 km).
- PRF: 2 kHz (vid FOI) resp. 4 kHz (vid Lilla Gåra).
- Uteffekt: 500 W (FOI) resp. 30 W (Lilla Gåra) toppeffekt.
- Antennvinst 12 dB (FOI) resp. 23 dB (Lilla Gåra).
- Samplingstakt: 25.6 MHz.

Mätningarna utvärderas i skrivande stund, varför inga strukturerade resultat redovisas. Dock detekteras målet i såväl de monostatiska som bistatiska mätningarna där vi dock kan notera stora fluktuationer i SNR som till stor del förmodligen kan tillskrivas en aspektvinkelberoende målarea och/eller varierande markfärdning. En annan erfarenhet är den stora fördel det innebär att, vid bistatiska mätningar,

kunna registrera i mottagarantennen direktsignalen från sändaren. Det visar sig nämligen att även ytterst små skillnader i PRF (förutom faktorn två) hos de olika sändarna/mottagarna påverkar signalbehandlingen avsevärt.

### 3.5.5 Övrigt

De gångna tre årens arbete innehåller naturligtvis många aktiviteter av mer löpande art, till exempel möten med samarbetspartners, information till uppdragsgivaren, deltagande i studier etc. Vidare har all verksamhet ej ännu dokumenterats alternativt kommit projektet tillgodo på andra sätt än via rapporter. Nedan beskriver/sammanfattar vi några sådana aktiviteter.

Som nämnades i föregående avsnitt kan markfädningen ha stor betydelse vid radarspaning mot luftmål. En enkel modell som undersöker dessa effekter finns beskriven i [20].

Av stor betydelse för AASR som system är naturligtvis förmågan att mellan stationerna eller till någon centralenhet kommunicera data och resultat. Kommunikationskraven för en AASR-modell finns undersökta i [4].

Pågående arbeten som ännu ej nämnts/formellt avtappats involverar till exempel studier för informationshantering i ett AASR-nätverk eller prestanda vid målföljning. Se vidare avsnitt 3.6.

Som tidigare nämnts har det under projektiden sökts tre patent kring tekniken för AASR, [11], [14], [16], och projektet eller specifika delar har även presenterats vid internationella konferenser, [13], [17], [21].

Återigen hänvisar vi till [25], citeBL vad gäller aktiviteterna för markmålsspaning samt utveckling av LORA-hårdvaran.

## 3.6 Fortsatt forskning

Som har framgått av denna rapport har, vad gäller luftmålsspaning med hjälp av AASR, större delen av arbetet lagts på teoretiska studier. Främst har det handlat om att kunna lösa det icke-triviala associationsproblemet (avsnitt 3.4.1) under ganska idealiserade omständigheter. Projektet har dock drivits så att mer praktiska frågor också har beaktats; mätningar av bistatisk radarmålarea, mätningar mot flygmål och studier av kommunikationsbehovet kan ges som exempel.

Vad gäller AASR i stort är det naturligt att fortsättningsvis studera alternativa realiseringskoncept. Vad får ett system med separerade sändare och mottagare för prestanda? Hur påverkas associeringsalgoritmerna? Vad innebär krav på mobilitet för designen? Kan man kombinera en flyginstallerad sändare med markbaserade mottagare?

Vad gäller fortsatt arbete med principen för associationen är det naturligt att relaxera gjorda idealiseringar. Hittills har målen betraktats som punktformiga isotropa spridare vilket naturligtvis inte är sant. Ett verkligt aspektvinkelberoende (eller modellerat sådant) hos radarmålarean kan förväntas förändra associeringsalgoritmernas prestanda. Å andra sidan bör eventuella försämringar kunna vägas upp av att man har en målföljningsmodell, så att man slipper detektera och associera målen på nytt efter varje mätning. Sålunda, studier av målföljningsmöjligheter, parat med effekterna av dataförluster eller mer varierade registreringar är ett naturligt område att fokusera mot. I detta sammanhang bör också principerna för informationshantering studeras. Är det möjligt att beskriva olika målspar i termer av troligheter à la probabilistiska nätverk?

För AASR-nätverket finns också andra praktiska frågor att studera närmare. Vilken relativ tidsnoggrannhet krävs mellan stationerna? Hur sker synkroniseringar? Skall kommunikationen ske till radarstationerna eller separata databehandlingsnoder?

På den experimentella sidan bör de initierade mätningarna av bistatistisk målarea fortsätta. Att få en praktisk förståelse för fenomenologin är inte bara viktigt i sig, verkliga mätningar är också viktiga för att kunna behandla teoretiska beräkningar korrekt. Likaså bör de inledda mätningarna mot flygmål fortsätta, allra helst på sikt med tre inblandade stationer i stället för två.

### 3.7 Slutsatser

Det är idag möjligt att studera radarsystem som för några år sedan bedömdes orealistiska, främst beroende på de processeringskrav som ställs. Med dagens och morgondagens datorkraft, och därmed med möjlighet till mer avancerad signalbehandling, kan nya system med nya prestanda studeras. Vidare har även försvarets behov styrts mot flexibilitet och mobilitet, bland annat via tanken att sensorer skall ingå som komponenter i det nätverksbaserade försvaret (NBF). Som ett exempel på en tydlig trend kan nämnas intresset för bistatistiska och multistatistiska system.

Vi har i detta projekt, enskilt och tillsammans med projekten "Radarsystemteknik och bredbandsradar" samt "Radarsignalbehandling för SAR och GMTF", visat på hur de nya möjligheterna kan användas vid spaning mot såväl mark- som luftmål. I markmålsfallet har vi visat på möjligheten att bygga en luftburen SAR med möjlighet att detektera rörliga mål. I luftmålsfallet har vi visat på vissa principiella problem som kan uppstå vid användandet av multistatistiska system samt hur dessa kan lösas, och vi har också inlett realistiska bistatistiska mätningar mot luftmål. Med tanke på potentialen hos dessa system, erfarenheterna hos verksamheten så långt och den internationella utvecklingen i allmänhet, finns det all anledning för det svenska försvaret att fortsättningsvis studera relaterade forskningsfrågor samt bevaka området i stort.

### 3.8 Referenser

#### Referenser

- [1] Alm, A., *Analys av bistatiska och multistatiska funktioner* FOI memo 03-2238, 2003
- [2] Chernyak, V.S., *Fundamentals of Multisite Radar Systems*, ISBN: 90-5699-165-5, Gordon and Breach Science Publishers, 1998.
- [3] FMV, *PerP-studie SAG Sensorsystem*, pågår
- [4] Fors, K., *Krav på AASRs kommunikationssystem utifrån ett scenarioperspektiv*, FOI memo 03-2741, 2003
- [5] Försvarsmakten, Flygtaktiska kommandot, *Försvarsmaktsgemensam sensorstudie (luftmål)*, FC99201S, 2002
- [6] Försvarsmakten, *Målbildsinriktningar inför Försvarsbeslut 2004*, Bilaga 1 till 23 210:63182, 2003
- [7] Gunnarsson, R., *Beräkning av radarmålarea för en cylinder*, FOI memo 03-2716, 2003
- [8] Gustafsson, N., Haapalahti, G., Herberthson, M., *Mätningar av bistatisk radar-målarea hos en cylinder*, FOI report FOI-R--0870--SE
- [9] Hartnet, P., em Bistatic Surveillance Concept of Operations, Proceedings of the 2001 IEEE Radar Conference, 2001
- [10] Hellsten, H., *A Network of Homogeneously Distributed Ground Radar Stations for Surveillance and Precision Positioning of Air Targets*, FOI report, bet. 01-3333, 2000
- [11] Hellsten, H. *System för att med från mål spridda signaler bestämma lägen och hastigheter för målen*, Patentansökningsnummer 0101661-7, 2001
- [12] Hellsten, H., *AASR III, Radarsystem för att med från mål spridda signaler bestämma lägen och hastigheter för målen*, Utdrag ur patentansökan 0101661-7. FOI reg nr 01-2449, 2002
- [13] Hellsten, H., *Low Frequency Bistatic Radar Network for Precision Positioning of Air Targets*, PIERS, Boston, 2002
- [14] Herberthson, M., *Sätt att med från mål spridda signaler bestämma lägen och hastigheter för målen*, Patentansökningsnummer 0101662-5, 2001
- [15] Herberthson, M., *A direct target localization method for AASR - principles and implementation*, FOI report FOI-R- -0515--SE, 2002
- [16] Herberthson, M., *Sätt att genom bistatiska mätningar med från mål spridda signaler bestämma lägen för målen*, Patentansökningsnummer 02011818-2, 2002
- [17] Herberthson, M., *Methods for Processing Data from a low frequency Bistatic Network*, PIERS, Boston, 2002

- [18] Haapalahti G., Herberthson M., *Simulations of direct target localization and clustering for AASR*, FOI report FOI-R-0679--SE, 2002
- [19] Herberthson, M., *On determining multiple positions and velocities from bistatic measurements – fast bistatic association in AASR*, FOI report FOI-R--0815--SE, 2003
- [20] Herberthson, M., *Höjdsfattning av flygmål via markmätning*, FOI memo 03-2168, 2003
- [21] Herberthson, M., *A Multistatic Radar Network for Airport Surveillance or Air Traffic Management*, IRS, Dresden, 2003
- [22] Kaijser, T., *Simulations of an exclusion principle for target positioning in AASR*, FOI report FOI-R--0690--SE, 2002
- [23] Larsson, B., *Radarsystemteknik och bredbandsradar – slutrapport 2003*, under registrering
- [24] Pettersson, M. *Halvårsrapport juli 2003 i projektet “Avancerade målsökarsystem och koordinatstyrning”*, FOI memo 03-1833, 2003
- [25] Ulander, L., *Radarsignalbehandling för SAR och GMTIRadarsignalbehandling för SAR och GMTI – slutrapport 2003*, under registrering
- [26] Willis, N., *Bistatic Radar*, ISBN 0-89006-427-X, Artech House, Inc., 1991