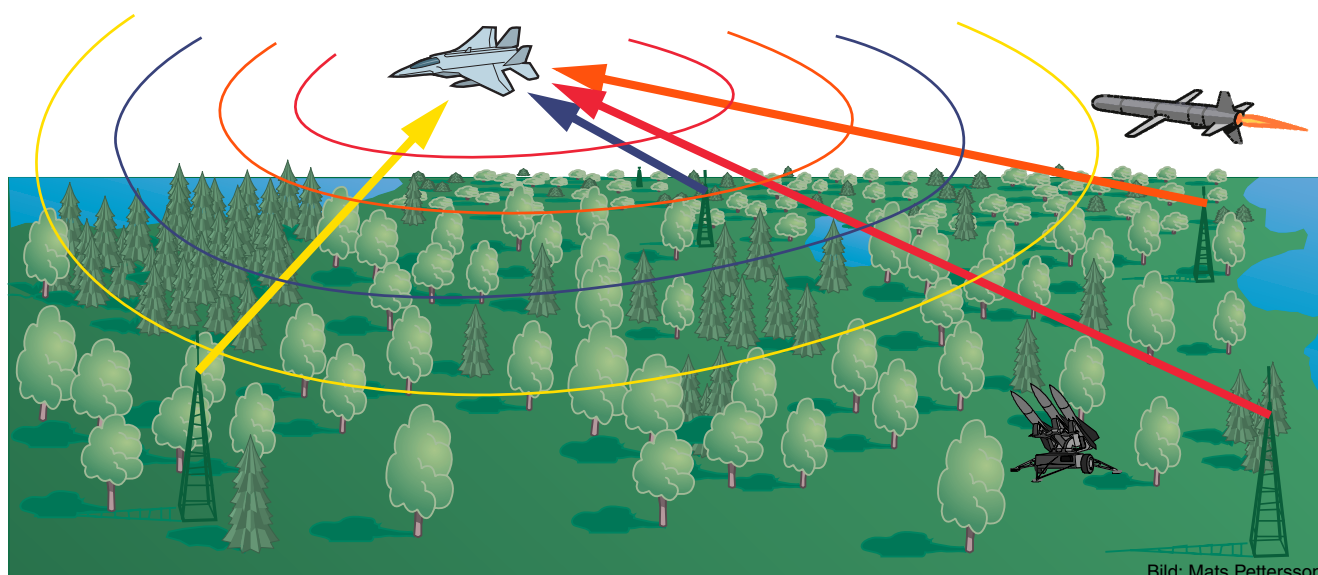


Per Grahn, Magnus Herberthson, Gustav Haapalahti, Anders Alm, Ola Kärvell

Värdering av AASR - Slutrapport



Pärmens baksida, som avsiktligt är blank.

TOTALFÖRSVARETS FORSKNINGSINSTITUT
Sensorteknik
Box 1165
581 11 LINKÖPING

FOI-R--1265--SE
Juni 2004
ISSN 1650-1942

Användarrapport

**Per Grahn, Magnus Herberthson, Gustav Haapalahti, Anders Alm,
Ola Kärvell**

Värdering av AASR - Slutrapport

Avsiktligt blank sida

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut – FOI Sensorteknik Box 1165 SE-581 11 LINKÖPING	Rapportnummer, ISRN FOI-R--1265--SE	Klassificering Användarrapport
	Forskningsområde 4. Spaning och ledning	
	Månad, år Juni 2004	Projektnummer E3066
	Verksamhetsgren 5. Uppdragsfinansierad verksamhet	
	Delområde 42. Spaningssensorer	
Författare/redaktör Per Grahn, Magnus Herberthson, Gustav Haapalahti, Anders Alm, Ola Kärvell	Projektledare Per Grahn	
	Godkänd av	
	Uppdragsgivare/Kundbeteckning FM	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig	
Dokumentets titel Värdering av AASR - Slutrapport		
Sammanfattning (högst 200 ord) AASR är ett radarkoncept som kan användas i många situationer, inte ett klart definierat system. Exempel på andra användningsområden än luftförsvar av eget område (ursprungligt förslag) kan vara olika varianter av internationella insatser samt som ett stöd till polisiär verksamhet mot brottslig verksamhet i luften. AASR är ett lågfrekvent multistatiskt system, där den grundläggande idén är att systemfunktion nås genom samverkan av ett stort antal nätverkskopplade enkla stationer. Varje station mäter in mål ofullständigt genom att mäta avstånd och avståndshastighet samt motsvarande bistatiska mätningar med övriga stationer i närheten. Vi bedömer att det är för tidigt för försvarsmakten att ta ett definitivt beslut om anskaffning eller ej av ett AASR-system. Däremot har AASR många för försvaret intressanta egenskaper vilket motiverar att man bör gå vidare med att bygga en försöksutrustning, utföra försök och fördjupa och komplettera kunskapsläget inom ett antal områden. Målsättningen bör vara att ha ett ordentligt beslutsunderlag inom 4-5 år. De mest utmärkande egenskaperna är hög upptäcktsannolikhet även mot signaturanpassade mål kombinerat med hög mätnoggrannhet och relativt hög uppdateringsfrekvens inom områden med hög upptäcktsannolikhet. Systemet är dessutom robust i den meningen att enstaka stationer kan slås ut inne i nätverket med liten effekt på systemprestanda.		
Nyckelord VHF/UHF-radar, bistatisk, multistatisk, flygmål, markmål, smygsmål, radarnätverk		
Övriga bibliografiska uppgifter		Språk Svenska
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 38	
Distribution enligt missiv	Pris:	

Issuing organization FOI - Swedish Defence Research Agency Sensor Technology P.O. Box 1165 SE-581 11 LINKÖPING SWEDEN	Report number, ISRN FOI-R--1265--SE	Report type User report
	Programme Areas 4.C4ISR	
	Month, year Juni 2004	Project no. E3066
	General Research Areas 5. Commissioned Research	
	Subcategories 42. Surveillance Sensors	
Author/s (editor/s) Per Grahn, Magnus Herberthson, Gustav Haapalahti, Anders Alm, Ola Kärvell	Project manager Per Grahn	
	Approved by 	
	Sponsoring agency Swedish defence	
	Scientifically and technically responsible 	
Report title (In translation) Assessment of AASR - Final report		
Abstract (not more than 200 words) AASR is a radar concept which can be used in many situations, it is not a clearly defined system. Examples in other fields of application than air defense of own territories can be different types of international efforts and as a support to police operations against law breaking activities in the air. AASR is a low frequency multi static radar system where the basic idea is that the function of a system can be achieved by cooperation of a large number of network related simple stations. One and each of these stations are measuring targets incompletely by measuring range, speed of range and corresponding bistatic measurements with other stations nearby. It is our judgement that it is too early for the military authorities to decide about procurement of a AASR system or not. However, AASR has many interesting qualities to the national defence, which motivates an ongoing activity building experimental equipment, doing experiments and intensify and complete the position of knowledge within a number of areas. The goal should be to have a proper rationale for a procurement decision within 4 to 5 years. The most significant characteristics is high probability of detection, even against stealth targets, combined with high accuracy and relatively high update rate within areas of high probability of detection. The AASR system is robust in the sense that separate stations in the interior of the radar network could be eliminated with small effects on the performance of the system.		
Keywords VHF/UHF-radar, bistatic, multi static, air targets, ground targets, stealth targets, radar network		
Further bibliographic information 		Language Swedish
ISSN 1650-1942	Pages: 38	
	Price acc. to pricelist 	

Innehåll

1. Inledning och läsanvisning	7
2. Sammanfattande värdering	9
2.1 Egenskaper hos AASR-system	10
2.1.1 Inverkan av vågutbredningsfenomen.....	10
2.1.2 Upptäcktsannolikhet	11
2.1.3 Falsklarmrisk	11
2.1.4 Inmättningsfel	11
2.1.5 Associering	12
2.1.6 Användbarhet mot svåra måltyper.....	12
2.1.7 Känslighet mot RFI och aktiv störning	13
2.1.8 Avsökningsteknik	14
2.1.9 Uppdateringstakt.....	14
2.1.10 Robotledningsförmåga	14
2.1.11 Robusthet	15
2.1.12 Byggteknik	15
2.2 Exempel på prestanda	15
2.3 Osäkerheter i bedömningar	19
2.3.1 Fram till nu belysta områden	19
2.3.2 Otillräckligt belysta områden	20
2.4 Förslag till framtida insatser	20
2.5 Bedömda kostnader.....	22
3. Beskrivning av AASR-konceptet	25
3.1 Realiseringsalternativ	25
3.2 Det ursprungligen föreslagna AASR-systemet.....	26
3.3 System anpassat mot internationell insats.....	28
3.4 Parasiterande funktion	29
4. Använda scenarion	31
5. Prestandaberäkningsprogram	33
5.1 Prestandaberäkningsverktyg	33
5.2 Visualiseringsverktyget.....	34
5.3 Exempel på beräkning.....	35
6. Referenser.....	37

1. Inledning och läsanvisning

Projektet AASR eller "Associativ AperturSyntes Radar" att användas vid luftförsvar av eget område formulerades och drevs ursprungligen av Hans Hellsten vid dåvarande FOA. Under ett antal år därefter var allt som rörde AASR sekretessbelagt, även patenten som Hans Hellsten sökte. Senare startade forskningsprojekt vid FOA och även EMW fick studieuppdrag efterhand. Sekretessen för AASR blev också sänkt och forskningsverksamheten kunde ske mer öppet.

Det som här rapporteras är en sammanfattande värderingsstudie som skett under ett halvårs tid för att ge försvarsmakten lite mer underlag om vad AASR kan användas till och vilka egenskaper det kan tänkas ha samt hur kostnadsbilden ser ut.

Rapportens huvudavsnitt är kapitel 2 (Sammanfattande värdering) har det ovan beskrivna innehållet medan efterföljande kapitel är tänkta som fördjupning på ett antal punkter.

2. Sammanfattande värdering

AASR ska *inte* betraktas som ett väl definierat system utan det är snarare ett brett koncept som kan varieras inom ganska vida gränser.

Den bärande idén är att utnyttja ett nät av många relativt enkla radarstationer som var och en inte mäter in mål fullständigt. För en fullständig inmätning krävs tre eller fler stationer som samarbetar genom att utbyta data över ett kommunikationsnätverk. Alla kombinationer av mono- och bistatiska¹ mätningar utnyttjas varför hög sannolikhet för systemfunktion erhålls.

I detta koncept kan de enskilda stationerna se lite olika ut beroende på den aktuella applikationen. Kärnan i varje station är dock lika oavsett användningsfall.

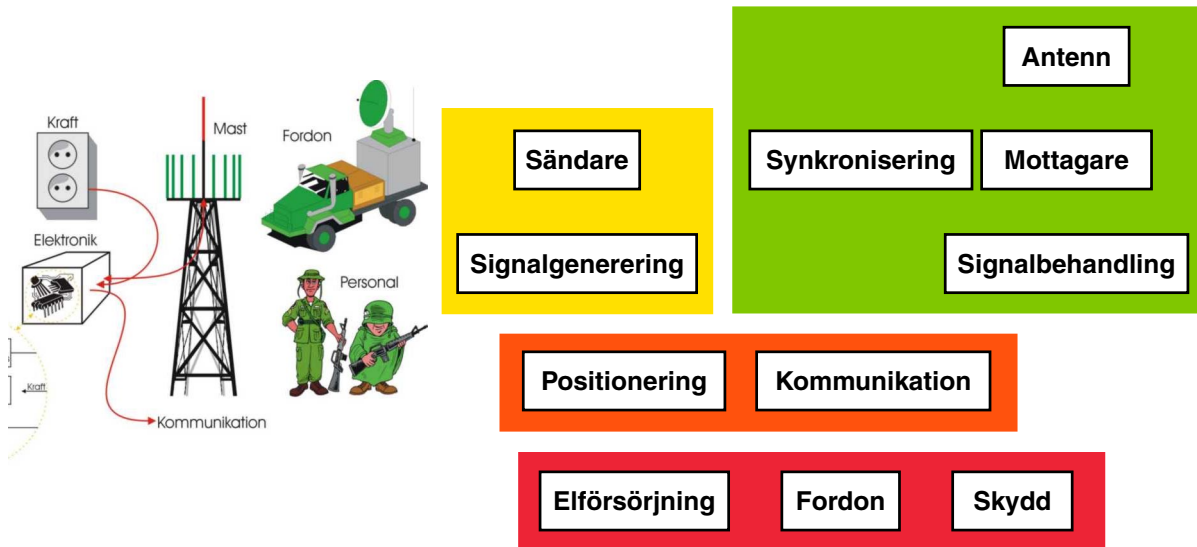
När AASR definierades av Hans Hellsten så var det enbart typsituationen "försvar av eget territorium" som var aktuell. Några andra för AASR intressanta typsituationer beskrivs kortfattat:

- Civil luftpolisiär övervakning där man är intresserad av att upptäcka lagbrytare av olika slag t.ex. sådana flygplan som inte har sina transpondrar igång av olika skäl såsom smuggling, flyktinghantering, terrorism och sist men inte minst avslagen, saknad eller trasig transponder.
- FN-uppdrag: Garant för säkerhet. Här är intresset att uthålligt skydda en eller flera befolkningsgrupper mot terrorangrepp från andra grupper. Målet är att upptäcka artillerigranater, raketer, småflygplan och enklare robotar (stora modellflygplan) med otrevliga stridsmedel. Det kan också vara av intresse att upptäcka otillåtna fordon i vissa områden.
- FN-uppdrag: Mobilitet i väpnad strid. Här gäller det att upprätta ett skyddsparaply runt framryckande trupp, en situation av IRAK-karaktär. Skyddet är riktat mot luftangrepp från motståndsgupper. Fokus är att ständigt flytta radarenheterna så att skyddsparaplyet upprätthålls under framryckningen.
- FN-uppdrag: Kontroll av flygförbudszon. Här skall man uthålligt övervaka en förbudszon mot otillåten trafik. Flera situationer är tänkbara t.ex att vi kan placera radarenheter i zonen eller att vi måste placera radarenheter utanför zonen.

Ett annat intressant användningssätt är det rent passiva där man parasiterar (snyltar) på utsänd energi från helt andra system som t.ex Digital-TV, mobiltelenätet eller varför inte motståndarens egen radar.

Ett AASR-system kan som vi sett vara inriktad mot ett antal olika uppgifter och vi kommer därmed att få ett antal realiseringsalternativ. Man kan dock identifiera en kärna som alltid måste vara med i samtliga fall. Det är givetvis denna del man skall satsa mest på att få standardiserad och billig, se figur 2.1. Andra delar som t.ex. positionering och kommunikation krävs för

1. Bistatisk = sändare och mottagare befinner sig ej på samma geografisk plats



Figur 2.1: Kärnkomponenterna i grönt behövs i alla konfigurationer med i stort sett samma krav.

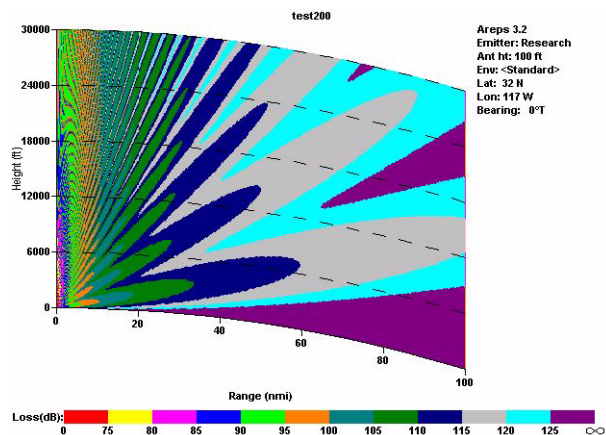
samtliga enheter som är flyttbara osv. Det går därför att skapa ett modulärt system som kan konfigureras på lite olika sätt beroende på de gällande kraven.

2.1 Egenskaper hos AASR-system

I det här avsnittet beskrivs ett antal egenskaper med ord, och hänvisning görs till annat avsnitt i den här rapporten eller till andra rapporter.

2.1.1 Inverkan av vågutbredningsfenomen

Vid det frekvensområde som AASR-systemet avses utnyttja (140 - 1000 MHz) är atmosfärens frirymdsdämpning mycket låg. Vi får också signalpenetration genom vegetation speciellt i det lägre frekvensområdet.



Figur 2.2: Dämpning som funktion av avstånd och höjd vid 200 MHz vid en jämn jordtyta och en masthöjd på 30 m. Höjdskalet är kraftigt överdriven.

Vid dessa frekvenser uppstår emellertid speglingsfenomen som bland annat tar sig i uttryck att signalen interfererar med sig själv. Denna interferens verkar både förstärkande och dämpande med följden att signalstyrkan från en enskild sändare varierar kraftigt med höjden, se figur 2.2. Systemeffekten av detta fenomen blir att området med hög upptäcktsannolikhet blir något större och mer diffust jämfört med frirymdsutbredning, se figur 2.6.

Ytterligare vågutbredningsfenomen som spelar in är refraktion eller avböjning som kan verka på flera sätt t.ex. åstadkomma extra inmätningssfel, åstadkomma förhöjd RFI-nivå, förlänga räckvidden på låga höjder, öka förmågan runt "kanter" etc. Problemet är när man inte känner till när de mer onormala situationerna förligger så att man kan ta hänsyn till effekten. Det kan tänkas att ett AASR-system behöver utrustas med instrument för att skatta de för stunden rådande utbredningsförhållandena.

2.1.2 Upptäcktsannolikhet

Täckningsområdet definieras av det område där upptäcktsannolikheten överskrider någon lämplig nivå t.ex 0.5. Detta innebär att det är 50% chans att systemet vid ett enda inmätningssök skall upptäcka ett specificerat mål, givet att det finns ett mål.

Sannolikheten för upptäckt inom den bevakade ytan är mycket hög. Detta beror på att det är många simultana mono- och bistatiska par av mätningar från olika riktningar som samverkar, dock behövs minst tre för fullständig positions- och hastighetsbestämning. Låga frekvenser ger också relativt god täckning på låga höjder, till och med igenom glesare vegetation. Räckvidden utanför radarnätet är begränsad varför ett AASR-system behöver kompletteras med långräckviddig spaningsradar.

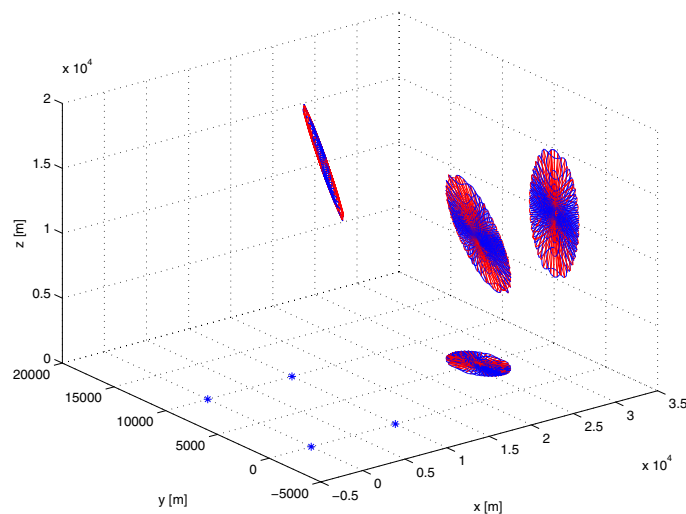
2.1.3 Falsklarmrisk

Den associeringsalgoritm som finns vars syfte är att förkasta orimliga kombinationer av mätdata sorterar naturligt bort en stor del av de falskmål som orsakas av spaningssensornas falsklarmrisk per upplösningsscell. Se [19] för en närmare utredning. Falsklarmrisken bör bli något lägre jämfört med dagens system.

2.1.4 Inmätningssfel

En komplett inmätning åstadkoms genom att kombinera mätningar från ett stort antal mono- och bistatiska par av mätningar. Varje par beskriver målet som att det befinner sig på ett ellipsoidformat skal med det primära avståndsfellets tjocklek. Det primära avståndsfellets storlek bestäms av systemets bandbredd som är en radarparameter. En sammanvägning av dessa skal resulterar i att det totala felet kan beskrivas som en liten ellipsoid med centrum i den beräknade målpositionen. Denna felellipsoid kommer att vara mer eller mindre utsträckt i en riktning beroende på hur många mätpar som använts och hur dessa geometriskt förhåller sig till varandra. Totalt sett blir det mycket svårt att intuitivt få en känsla för hur stora felen är eller hur de är orienterade för ett givet mål. Felkalkylen har därför modellerats

och ingår i det prestandaberäkningsprogram som tagits fram i detta värderingsprojekt. Figuren 2.3 visar en felellipsoid och hur den kan projiceras på plan parallella med koordinataxlarna.



Figur 2.3: En felellipsoid med lutande orientering och dess projektioner på planen som beskrivs av koordinataxlarna. Felellipsoidens storlek är kraftigt överdriven i figuren. Avsikten är att visa att man kan ha ett mycket litet fel i en riktning och ett ganska stort i en annan.

Man kan konstatera att felellipsoidens storlek växer snabbt utanför det område som vi mäter in med hög upptäcktsannolikhet, se figurerna 2.7 och 2.8. Detta är dock högst normalt i alla typer av spaningssystem - har vi svårighet att upptäcka ett mål blir precisionen i uppskattningen av positionen också stor.

2.1.5 Associering

Radarmätdata som hör till samma mätobjekt skall associeras till varandra.

En stor del av den forskning som lagts på AASR har koncentrerats just på associationsproblemet, se [14], [15], [16], [17], [18] och [9]. Flera algoritmer har tagits fram och också patenterats [14] och [16]. För den snabbaste av dessa algoritmer, den så kallade "direkt bistatisk association", stiger beräkningsbördan med faktorn $N^2 \log N$ där N är antalet mål. Detta är en avsevärd uppsnabbning jämfört med det renodlade associeringsproblemet som är så kallat NP-komplett vilket betyder att problemets storlek växer oerhört snabbt.

Associeringsproblemet kan tack vare uppsnabbningarna anses vara hanterbart i dagens datorer och utgör inget problem i morgondagens.

2.1.6 Användbarhet mot svåra måltyper

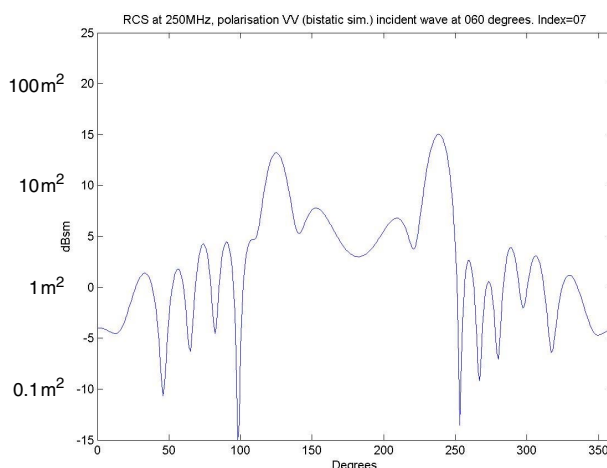
AASR-konceptet kan detektera lågsignaturmål på låga höjder beroende på tre fenomen:

- Låga frekvenser. Bärfrekvensens våglängd hamnar i eller nära resonans med målobjektets storlek. Detta innebär att det är mycket

svårt att genomföra signaturanpassningsåtgärder som är verksamma mot ett AASR-system. Figur 2.4 visar att målytan faktiskt är ganska stor vid låga frekvenser att jämföra med målytan vid mikrovågsfrekvenser som är avsevärt lägre, speciellt om signaturanpassningsåtgärder använts.

- Multistatisk inmätning. Vi mäter in målet från flera olika håll med olika bistatiska mätkonfigurationer vilket leder till att upptäcktsannolikheten fortfarande blir hög även om man lyckats spegla bort en del energi.
- Ytdistribuering. Mätningar sker alltid från flera håll samtidigt och aldrig från mycket långa avstånd varför jordens krökning inte spelar någon stor roll. En större roll spelar däremot kuperad terräng som åstadkommer skuggfenomen.

Studie om detektion av små flygande mål har gjorts av EMW, se [25] och [27]. Beräkningar och mätningar har också gjorts av FOI, se [6] och [7]



Figur 2.4: Beräknad radarmålyta för kryssningsmissil vid 250 MHz. Missilens längd är 4.8 m och spännvidd är 2.6 m. Beräkningen har också verifierats med riktiga mätningar mot modeller

Användbarhet mot markmål är ej närmare studerad men i öppen eller halv-öppen terräng borde det finnas en god chans därför att dämpningen är låg, däremot inverkar markfuktighet samt speglings- och skuggfenomen negativt.

2.1.7 Känslighet mot RFI och aktiv störning

Studier som gjorts på EMW antyder att en enskild AASR-station är relativt känslig för RFI¹, se [26]. Behov av störundertryckning är orsak till att det föreslås att en gruppantenn användes till mottagaren. Gruppantenn på mottagarsidan underlättar troligen också målinmätning vid det parasiterande användningssättet.

Systemeffekten av RFI är outredd. I signalbehandlingen ligger det en algoritm som naturligen undertrycker störningar om de inte blir för många.

1. RFI = Radio frequency Interference = radiofrekvent störning som inte är orsakade av motsidan

Positivt för systemfunktionen verkar också det faktum att mycket redundanta mätningar används. Den stora risken ligger troligen i att associationsprocessen blir överbelastad.

2.1.8 Avsökningsteknik

I AASR-systemet finns det ingen avsökning i rummet - varken mekaniskt eller elektrisk. I AASR-konceptet används väsentligen antenner med samma känslighet hela varvet runt. All positionsbestämning är en följd av ett antal tidsskillnadsbestämningar så något avsökningsförfarande för att täcka spaningsområdet finns inte. AASR-systemen genomgår däremot en cykel av pulser på olika frekvenser och detta tar en viss tid vilket medför att tiden för avsökning blir lika med tiden för en pulscykel och denna är förhållandevis kort.

2.1.9 Uppdateringstakt

Som nämndes i föregående avsnitt så avsöks hela spaningsvolymen på den tid det tar att genomgå en pulscykel. Systemets inmätningstakt begränsas förutom av tiden för en pulscykel också av den tid det tar att skicka resultatet av en mätning till den eller de enheter i systemet som utför måldatautvärderingen. Med de antaganden som gjorts om antal mål, antal bitar/mål och överföringstakt i [4] så kommer kommunikationen (längsta överföringstid och antal länkesteg till beräkningsenhet) att vara det som begränsar inmätningstakten.

Det verkar dock troligt att man skall uppnå inmätningstakter för ett AASR-system i storleksordningen 1-20Hz beroende på val av radarparametrar och kommunikationssystem.

2.1.10 Robotledningsförmåga

Tre faktorer är viktiga för att uppnå en hög träffsannolikhet:

- Stor precision i mätvärden vad avser position och hastighet.
- Hög uppdateringstakt.
- Kort fördröjning mellan sensorobservation och robot.

AASR-systemet kan erbjuda både stor precision och hög uppdateringstakt medan kort fördröjning inte enbart beror på AASR-systemet självt utan också på övriga fördröjningar i robotens uppdateringskedja. Den av AASR-systemet orsakade fördröjningen överstiger inte AASR-systemets periodtid och är troligen avsevärt bättre än så.

Se vidare [23] och [2] som avhandlar de krav som ställs på spaningssystemet för att uppnå hög träffsannolikhet.

Slutsatsen måste bli att AASR-konceptet kan vid lämpliga val av radarparametrar och kommunikationssystem erbjuda tillräckliga prestanda för att leda en robot nästan ända fram till ett manövrerande mål. En robot behöver sin egen målsökare endast i det absolut sista skedet innan träff vilket minskar risken för motåtgärder.

2.1.11 Robusthet

Enstaka stationer kan slås ut med liten effekt på totala systemprestanda. Detta är en följd av ett visst överlapp mellan ingående stationer och att det finns så många mono- och bistatiska mätmöjligheter. Om man mitt inne i ett större nät av AASR-stationer plockar bort en enstaka station kan man knappast se någon som helst effekt på systemprestanda, varken på upptäcktsannolikhet eller på inmätningfelen. Tar man bort ytterligare en station intill den första så påverkas fortfarande upptäcktsannolikheten mycket lite, medan felet stiger något mer. Tar man bort tre stationer intill varandra bort så ser man en tydligare försämring av upptäcktsannolikheten och felet men vi har fortfarande kvar en systemfunktion med något försämrade prestanda. Detta framgår i de beräkningsexempel vi gjort, se figurerna 2.10 och 2.11.

2.1.12 Byggteknik

De komponenter som ingår i en AASR-station är relativt enkla och billiga varför komponentkostnaderna troligen blir låga. Mest komplicerad blir mottagaren på grund av krav på stort avstämbart frekvensområde och relativt stor momentan bandbredd tillsammans med en hög dynamik och flera kanaler. Enligt en kalkyl gjord i [11] och [12] så skulle dynamikkraven stanna vid cirka 70 dB för att undvika egenbländning.

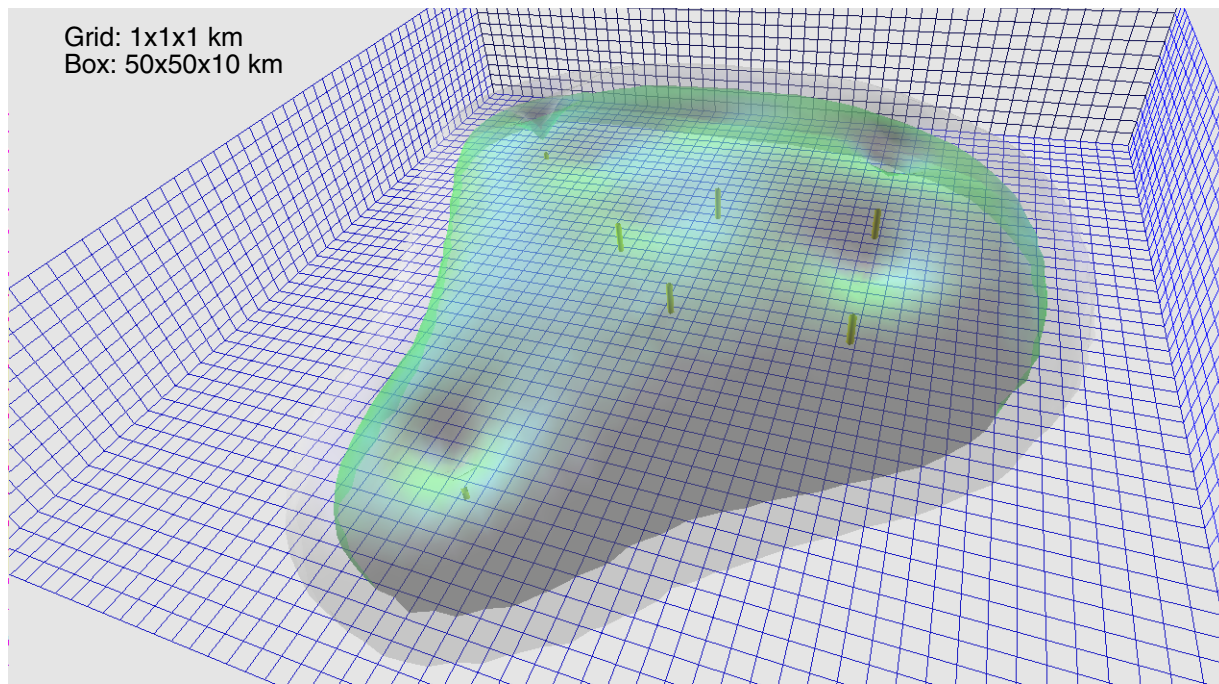
Man skulle redan idag kunna digitalisera signalen på RF-nivå och sedan sköta all signalbehandling digitalt. Detta leder till att man kan massproducera högintegrerade mottagare till ett lågt styckepris om volymen är stor.

Synkroniseringen mellan de olika stationerna kräver högstabila tidsreferenser eftersom synkronisering på fasnivå krävs för dopplerhastighetsbestämningar. Eftersom AASR-systemet avses arbeta med relativt låga frekvenser kommer det inte att krävas den dyraste tekniken utan det är möjligt att klara sig med enklare teknik som stöts av till exempel satellitnavigeringssystemen.

Antennen är även den ganska enkel och billig att producera, även gruppan-tennvarianterna enligt uppgift från EMW.

2.2 Exempel på prestanda

Det första exemplet kan sägas vara en AASR-variant avsedd för det internationella scenariot "garant för säkerhet". Det innebär att hotet först och främst är mindre flygande farkoster med otrevligt innehåll, vilket leder till att vi väljer den övre delen av frekvensbandet. Utplaceringen i exemplet är något slumpmässig men illustrerar vad som händer när en station är lite längre från de övriga, se figur 2.5. Som framgår av figuren så har man en hög upptäcktsannolikhet inom den yta som de sju stationerna står på, men också något utanför detsamma. Man kan se på isoytan för $P_d = 0.5$ att den buktar ner rakt över AASR-stationen vilket beror på att vi här valt vertikala dipolantennar som ju har ett minimum rakt upp. Gemensamt för figu-



Figur 2.5: Exempel 1, 7 stationer vid 750 MHz, fri rymd, vågutbredning ignorerat. Bilden visar en 3D-projektion av ytor med konstant upptäcktsannolikhet P_d för värdena 0.1 (grå) och 0.5 (blågrön). Målet har radarmålytan 1 m^2 . Beräkningsmetoden beskrivs i avsnitt 5.

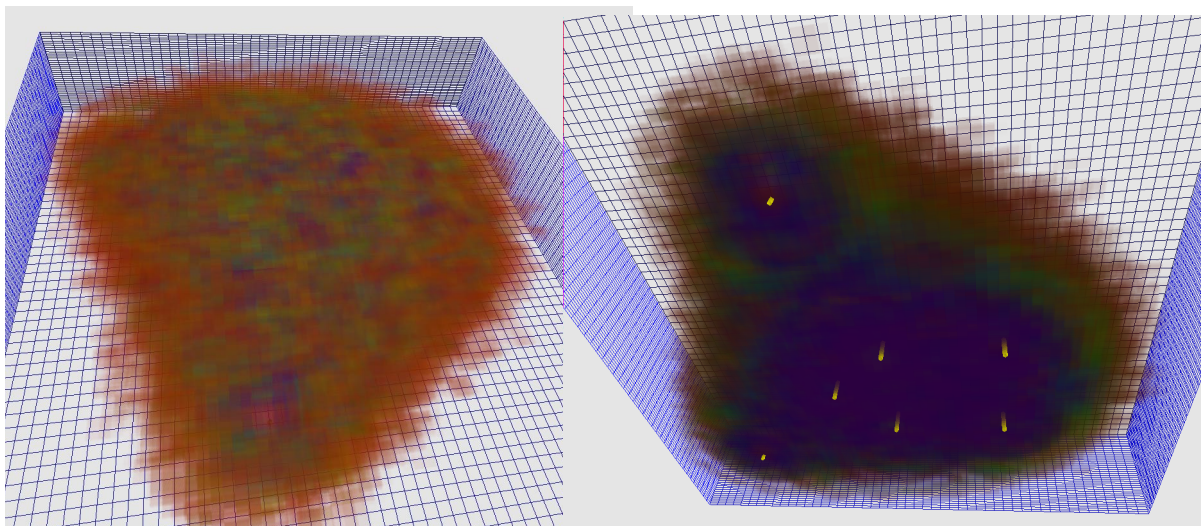
rerna 2.5 till 2.11 är att man placerat ett mål på 1 m^2 på olika punkter i ett 3-dimensionellt gitter, och sedan räknat fram upptäcktsannolikhet och en mätfelsskattning för det totala systemet. Givet är att minst tre mätpar kan mäta in målet, se avsnitt 5 för bättre beskrivning av hur beräkningarna gjorts.

Figur 2.6 visar samma situation som föregående men med hänsyn taget till vågutbredning enligt modellen EREPS¹. Resultatet visar att det totala området med hög upptäcktsannolikhet blir något större i detta fall men att övergången från låg till hög upptäcktsannolikhet blir mjukare (mer utdragen) jämfört med frirymdfallet. Vidare kan man se att den station som ligger längre ifrån de övriga visar en svag tendens att isoleras från de övriga med början på lägre höjder. Geometrin har med andra ord betydelse när man närmar sig marginalerna.

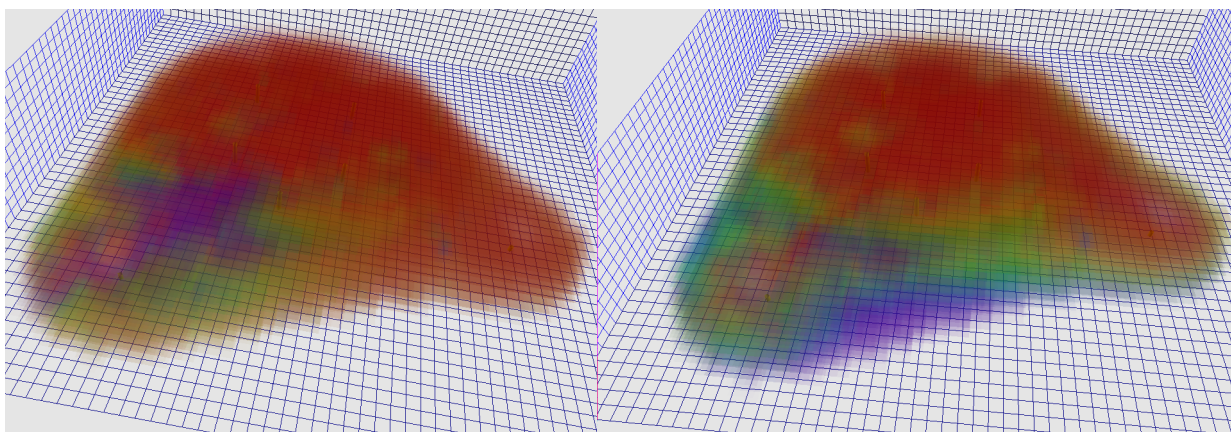
Inmättningsfelen i den 3-dimensionella positionsangivningen illustreras i figur 2.7 som visar att felet är mycket litet i kärnområdet och sedan växer beroende på de geometriska förhållandena. Avgörande för ett litet fel är att man mäter in målet från ett antal olika riktningar. Man kan också konstatera att felen i höjdlid är större än felen i planet speciellt på låga höjder. Samma sak gäller också för felen i hastighet, se figur 2.8.

Nästa exempel åskådliggör den klassiska AASR-varianten där vi valt en frekvens i den undre delen av bandet (150 MHz) och gitteravstånd på 35 km. Figur 5.1 på sidan 36 visar utplaceringen av de 41 stationer som be-

1. EREPS = Engineer's Refractive Effects Prediction System från NRL i USA.

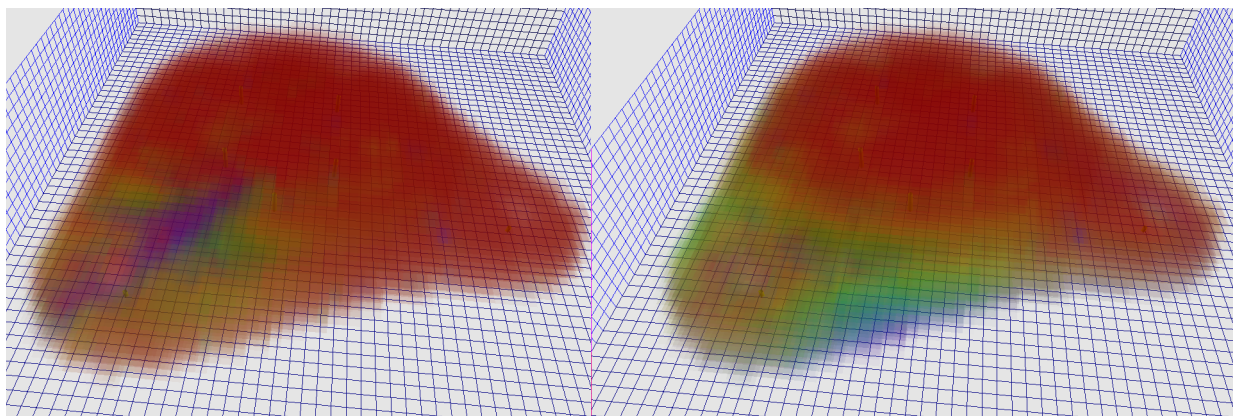


Figur 2.6: Samma situation som figur 2.5 men med vågutbredningsfenomen enligt EREPS. Upptäcktsannolikheten är färgkodad från rött ($P_d=0.1$) till violett ($P_d=1.0$). Upptäcktsannolikheter mindre än 0.1 är inte synliga. Till vänster: snett ovanifrån, Till höger: snett underifrån

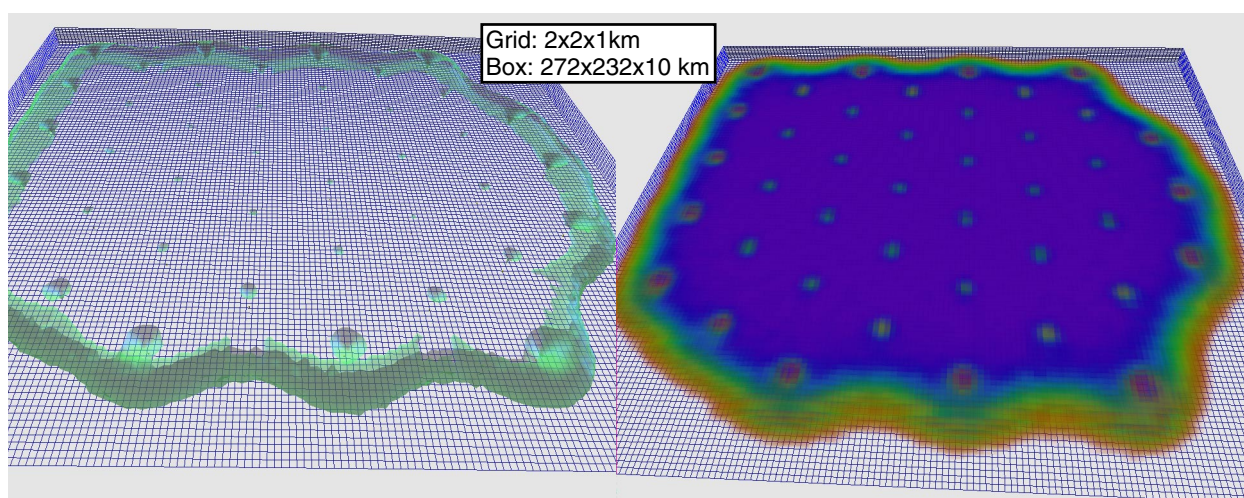


Figur 2.7: Visar lägesfel för situationen i figur 2.5. Felen är färgkodade så att rött är nära 0 m och violett är 50 m eller mer. Vänster bild visar felet i xy-planet. Höger bild visar höjdfelet.

hövs för att täcka ett område runt Stockholm och in mot Örebro samt Södermanland och Uppland. Upptäcktsannolikheten vid frirymdsfallet åskådliggörs i figuren 2.9 både som isoyta och som färgkodad volymbild. Man kan se var stationer står genom en sänkning av upptäcktsannolikheten på hög höjd rakt ovanför antennen. Det inre spaningsområdet täcks mycket väl, däremot blir inte räckvidden särskilt stor utanför radarnätet. Man kan förbättra den räckvidden något genom att höja effekten och masts höjden på de stationer som sitter vid randen av nätet men för långa räckvidder krävs att man också har långräckviddiga spaningssystem i sitt nätverk t.ex en flygburen spaningsrader (FSR). För att bedömma robustheten har vi i figur 2.10 lagt till vågutbredningsfenomen enligt EREPS och tagit bort tre AASR-stationer intill varandra i det inre området. I den vänstra figuren som väsentligen visar upptäcktsannolikheten på högre höjder kan man

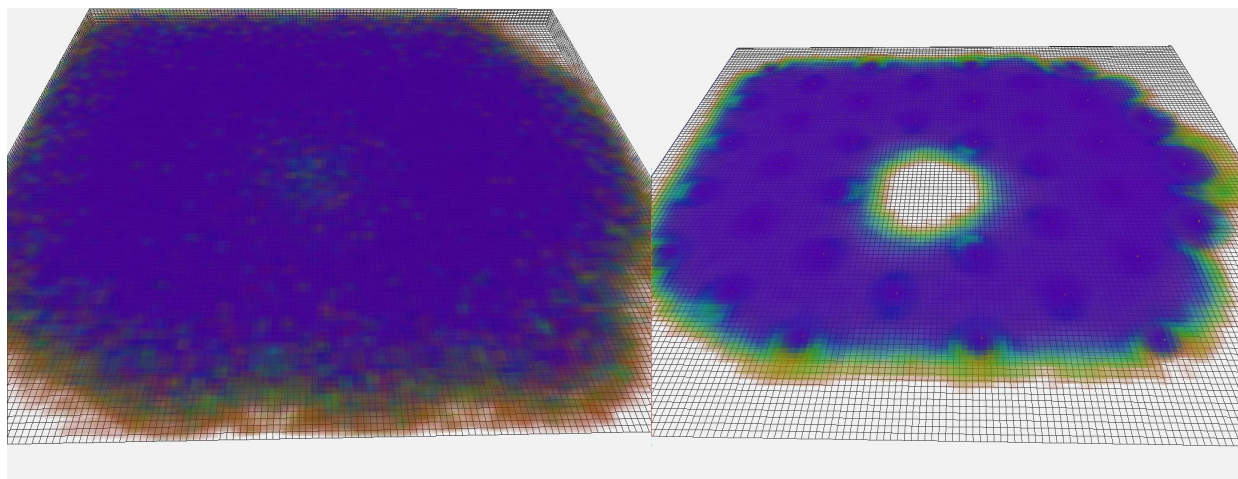


Figur 2.8: Visar hastighetsfel för situationen i figur 2.5. Felen är färgkodade så att rött är nära 0 m/s och violett är 25 m/s eller mer. Vänster bild visar felet i xy-planet. Höger bild visar höjdfelet.

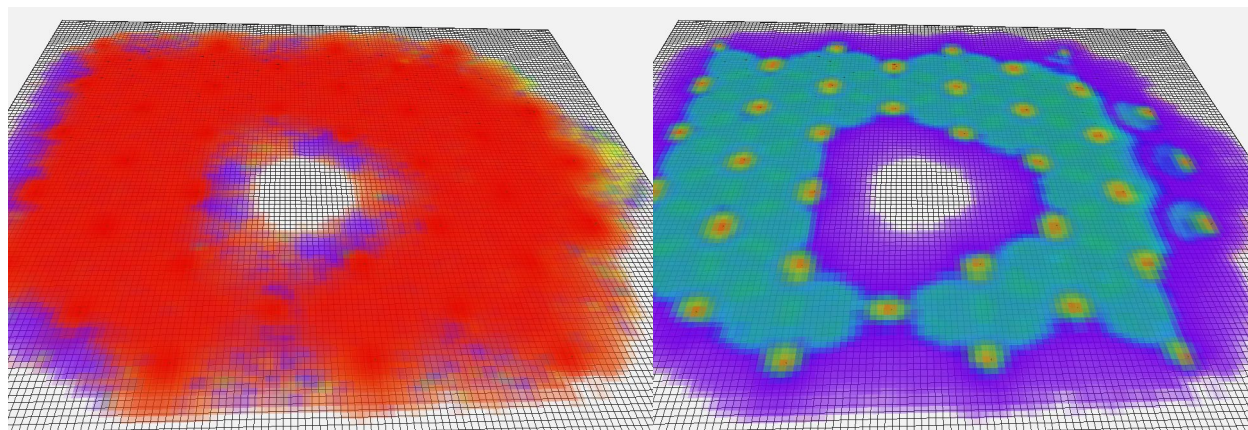


Figur 2.9: Upptäcksannolikhet från ett system bestående av 41 stationer vid 150 MHz utan vågutbredningsfenomen. Till vänster: Yta med konstant P_d , "tak" på ytan når högre än 10000m. Till höger: samma data men visat som färgkodad volymdata. rött betyder P_d i närheten av 0.1 och violett motsvarar 1.0, övriga färger ligger däremellan.

knappt se någon effekt överhuvudtaget. Däremot så ser man en tydlig effekt i den högra bilden som enbart visar höjdsnittet 0 till 200 m. AASR-systemet tål med andra ord att enstaka stationer slås ut inne i radarnätet, priset man får betala är något sämre låghöjdstäckning och därmed ett något större fel i närheten av förlusten. Om någon randstation försvinner blir det däremot omedelbart ett hål i täckningen. Felens absoluta storlek följer i stort upptäcksannolikhetens nivå. På lägsta höjd är felellipsoiden riktad så att felet i xy-koordinaten är mycket mindre än i höjdskoordinaten, vilket kan ses i figur 2.11.



Figur 2.10: Samma system som i figur 2.9 men vi har lagt på vågutbredningsmodellen EREPS och tagit bort tre stationer intill varandra i det inre området. Vänster: 0-10000m i skikt om 1km. Höger: 0-200m i skikt om 20m



Figur 2.11: Samma system som i figur 2.9. Visar lägesfelen i höjdsikten 0-200m. Rött är fel nära 0, violett är fel större än 50m. Till vänster: felen i xy-planet. Till höger: höjdfel.

2.3 Osäkerheter i bedömningar

2.3.1 Fram till nu belysta områden

I de forskningsprojekt som bedrivits på FOI och de studieuppdrag som utförts av EMW har följande områden belysts

- Grundläggande systemanalys, [10], [11], [12], och [13].
- Associeringsproblemet, [14], [15], [16], [17], [18] och [9].
- Modeller och simuleringar med inriktning på associering, se [21] och [9].
- Inledande analys av förutsättningar för radiosamband, [4]
- Inledande RFI och störanalys (EMW), [26]
- Variationsstudier av konceptet (EMW och FOI)

- Modellering och simulering av enklare mål, se [6], Nyligen också kryssningsmissil.
- Verifierande mätningar av enklare mål, [7]
- Ett verifierande experiment har genomförts som verifierar osynkroniserad bistatisk inmätning mot rörligt mål vid frekvenser omkring 800MHz, se [8].
- Analys av inmättningsfel och falsklarmrisk, se [20] och [19].
- Framtagit och implementerat en första modell för att bedömma prestanda, se avsnitt 5.

2.3.2 Otillräckligt belysta områden

Vi har med ledning av det arbete som utförts så här långt kunnat identifiera ett antal områden där vi inte vet tillräckligt mycket för att utforma och bygga ett AASR-system eller för att förstå en eventuell motståndares liknande system. Dessa områden är:

- Radarparameterval och signalbehandling
 - ☐ PRF, vågform, frekvensval etc
- Avancerad signalbehandling
 - ☐ Modellbaserad inmätning
 - ☐ Målanalys
- Synkronisering och positionering
- Signalmiljö (RFI, frekvensplanering, vågutbredning)
- Strålrisker / miljöproblem
- Aktiv störning
 - ☐ Liten studie av enskild station har gjorts, ej av hela systemet
- Parasiterande / Passiva moder
- Byggmetoder och realiseringsalternativ
- Kommunikationskrav
- Detektion mot olika typer av mål
 - ☐ Normala flygfarkoster
 - ☐ Signaturanpassade eller "små" flygfarkoster
 - ☐ Mål på eller nära marken

2.4 Förslag till framtida insatser

Fram till nu har verksamheten varit inriktad på att lösa några grundläggande tekniska problem samt att klara ut om AASR-konceptet verkar rimligt och vilka egenskaper det skulle kunna få.

Vår bedömning är att det är för tidigt för Försvarsmakten att i dagsläget ta ett definitivt beslut om AASR-konceptet är något som skall anskaffas eller ej. Tekniken har många intressanta egenskaper som motiverar en fortsatt satsning på forskning och försök i syfte att klara ut om de mestadels teoretiska beräkningarna håller även ute i verkligheten. Kostnaderna för detta bedöms vara 3-4 miljoner per år i 3 till 5 år på FOI plus ett utvecklingsprojekt på omkring 10 miljoner per år på industrin.

Vi föreslår därför att FM bör satsa ytterligare 3-5 år på forskning och försök kring AASR-liknande teknik innan ett beslut tas om anskaffning eller ej. Vidare måste FM i detta läge ta beslut om hur den huvudsakliga inriktningen bör vara, dvs vilka användningsfall som är mest intressant.

Figur 2.12 beskriver hur vägen fram mot ett AASR-system skulle kunna se ut och det vi föreslår utgör första steget på denna väg.

Inriktningen för detta första steg blir:

- Radarparameterval och signalbehandling
- Vilket handlar om att noggrannare bestämma de reella valmöjligheter man har vad gäller parametrar som bärvågsfrekvenser, vågformer, pulsfrekvenser, sändscheman etc för att realisera de olika systemförmågorna.
- Signalmiljö
- Handlar om att genom mer beräkningar och genom praktiska försök klarlägga hur svåra problemen med signalmiljön egentligen är både vad gäller den naturliga miljön och vad gäller risker med aktiv störning.
- Detektion av olika måltyper, flyg, stealth, mark
- Handlar om att göra försök med detektion av olika måltyper för att verifiera tidigare teoretiska resultat.
- Synkroniseringsproblem
- Denna fråga har tidigare inte närmare berörts mer än att man konstaterat att problemet är lösbart. Frågan är nu: hur löser vi synkroniseringsproblemet? och dessutom skall en lösning provas i praktiken.
- Kommunikationsbehov
- Mer omfattande studier av kommunikationsbehovet framför allt vad gäller datamängd per tidsenhet och länk.
- Parasiterande miljö
- Ett första försök med inmätningar baserat på signaler utsända av exempelvis digital-TV-sändare bör genomföras liksom studium av tillhörande signalbehandling.
- Avancerad signalbehandling
- Undersöka om man kan analysera målen i klassificeringssyfte genom

olika modellbaserade eller matchande algoritmer. Också frågan om hur man mäter in utbredda (stora) mål bör studeras.

Delar av försöksutrustningen finns redan idag i form av det mottagarsystem som primärt byggts för SAR och GMTI inom frekvensområdet 200-800MHz, se [22]. En försöksverksamhet startar därför inte från noll utan får en flygande start om den inleds inom 1 till 2 år. Därefter är risken stor att startsträckan blir längre.

Medverkande i denna forsknings- och försöksverksamhet borde även industrin vara, men då finansierade via FMV. Även FOI skulle kunna ha en liten verksamhet som finansieras via FMV för att förstärka samarbetet och kunskapsöverföringen mellan FOI och industrin på samma sätt som tidigare skedde under det så kallade AIMT¹-programmet.

De olika rollerna skulle grovt kunna vara:

- FOI
 - ☐ Specifikation, kravställande
 - ☐ Grundläggande fenomen
 - ☐ Försök, planering, genomförande, efteranalys
- Industri
 - ☐ Framtagning utrustning
 - ☐ Realiseringsalternativ
 - ☐ Delta i försök

2.5 Bedömda kostnader

Att bedömma kostnader för ett framtida AASR-system är vanskligt därför att osäkerheten i utformning och teknikutvecklingen är stor. En viktig faktor är att man kan identifiera en kärna i systemet som består av mottagarantenn, mottagare, synkroniseringsenhet och signalbehandlingsenhet.

Denna kärna kan göras oberoende av användningsfall och massproduceras. I de fall där vi sänder aktivt krävs en modulator, sändare och sändarantenn alternativt en modulator och synkroniseringsenhet för inkoppling i de digital-TV-sändare vi hyrt tid på för sändning. Icke-stationär användning kräver dessutom egen positioneringsenhet och kommunikationsenhet. Skall vi dessutom vara rörliga krävs egen elförsörjning, fordon samt eventuellt skydd, se figur 2.1 på sidan 10.

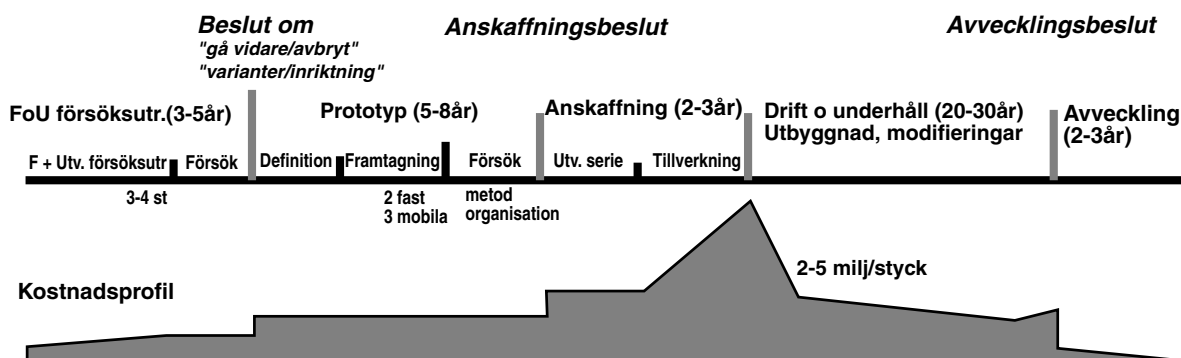
Dyraste enskilda modul bedöms mottagaren vara eftersom kraven på bandbredd, dynamik, linjaritet och ett flertal kanaler driver på kostnaderna. På sikt tror vi att man kan massproducera en lämplig mottagare som är i det närmaste helt digital eftersom digitalisering kan ske direkt på bärvågen. Detta ökar tillförlitlighet, stabilitet och sänker kostnader. För synkronisering krävs det en högstabil oscillator men bedömningen är den att man inte

1. AIMT = AntennIntegrerad MikrovågsTeknik

behöver atomklockor utan ett enklare system som stöttas från någon lämplig frekvensnormal t.ex satellitnavigeringssystemen.

Driftskostnaderna varierar kraftigt beroende på systemutformning. En samgruppering med mobiltelestation sparar mycket kostnad då man kan dela på kostnaderna för energiförsörjning och service, försvaret behöver i detta fall ingen egen organisation. För ett AASR-system i ett internationellt uppdrag kommer driftskostnaderna att bli högre, speciellt om man behöver en helt egen infrastruktur vad gäller kommunikation och kraftförsörjning. Risken för sabotage eller bekämpning är också större vilket medför att man måste ha ett större reservdelsförråd samt servicepersonal och visst skydd. Kraftbehovet per station bedöms inte överstiga 2 kW.

Vi har försökt att göra en grov kostnadsprofil för AASR inklusive forskning, försök, prototyp, drift och avveckling, se figur 2.12. Det bör påpekas



Figur 2.12: Kostnadsprofil för ett tänkt framtida ytdistribuerat nät av lågfrekvensradarstationer (AASR)

att osäkerheten i kostnadsbedömningarna är stora utom för den mest närliggande fasen.

Minsta antalet enheter som måste anskaffas för rimlig funktion är troligen i storleksordningen omkring 100, där 20 används för utbildning och prov, 60 är i aktiv tjänst inom och utom landet samt resterande 20 utgör reserv. Vid denna låga nivå finns heller inte kapacitet för mer än ett internationellt uppdrag och endast ett litet område inom landet kan bevakas.

3. Beskrivning av AASR-konceptet

Dagens radarsystem för övervakning och stridsledning består av ett litet antal långräckviddiga och kapabla radarstationer. Dessa system är mycket sårbara, dels genom att radarstationerna relativt lätt kan upptäckas, och dels för att de är så få.

AASR-konceptet avser att förbättra denna situation. Förbättringen består dels av att övervakningsfunktionen är fördelad på ett stort antal utspridda men relativt enkla radarstationer, där vissa kan förloras utan att lägesbilden på ett avgörande sätt försämras. Enskilda radarstationer är dessutom små och lättransportabla och placeras ut med kort varsel utan omfattande markinstallationer eller andra förberedelser och kan alltså inte på förhand inspanas. Däremot är räckvidden utanför AASR-nätet begränsad.

Ett annat motiv till AASR-konceptet är att kommande generationers militärflygplan förväntas få allt minskande radarmålärea. Redan i dag finns det signaturanpassade flygplan¹ som har en radarmålärea mindre än en tiotusendel av konventionella flygplan. Under de närmaste åren kommer nya typer av militära flygplan att bli operativa som har lika små radarmåläreor men som dessutom är högpresterande avseende fart- och svängförmåga. Dessa flygplan kommer till en början att vara få till antalet men på sikt lär tekniken spridas till många flygplanstyper och till många nationers flygplan.

3.1 Realiseringsalternativ

Genom val av huvuduppgift för AASR-systemet så kommer man att behöva variera sättet att realisera de ingående stationerna. Exempelvis har man följande val att göra:

- Antenn
 - ☐ Enkel dipolantenn
 - ☐ Gruppantenn
 - ☐ Upplyft dipol med hjälp av aerostat
- Sändare
 - ☐ Helt egen sändare
 - ☐ Egen sändare "påhängd" på mobiltele-nätet
 - ☐ Egen modulator men hyra sändningstid av t.ex Teracom (Digital-TV-kanaler, ERP $\approx$ 750kW)
 - ☐ Parasitera på andras sändare
- Mottagare
 - ☐ Helt egen mottagare
 - ☐ Egen mottagare "påhängd" på mobiltele-nätet

1. Signaturanpassade flygplan betecknas "stealth" på engelska

- Kommunikation
 - ☐ Ansluta till befintligt data/telenät
 - ☐ Radiolänk
 - ☐ Optisk länk
 - ☐ Specialmod i radarn
- Mobila stationer
 - ☐ Separata sändare- och mottagarstationer eftersom separata sändare kan vara mer rörlig
 - ☐ Master monterade på fordon
 - ☐ Positionerings och synkroniseringssystem
 - ☐ UAV-monterad sändare som kortvarig "gapfiller"
- Central eller distribuerad målutvärdering
- Bemanning - väsentligen obemannat

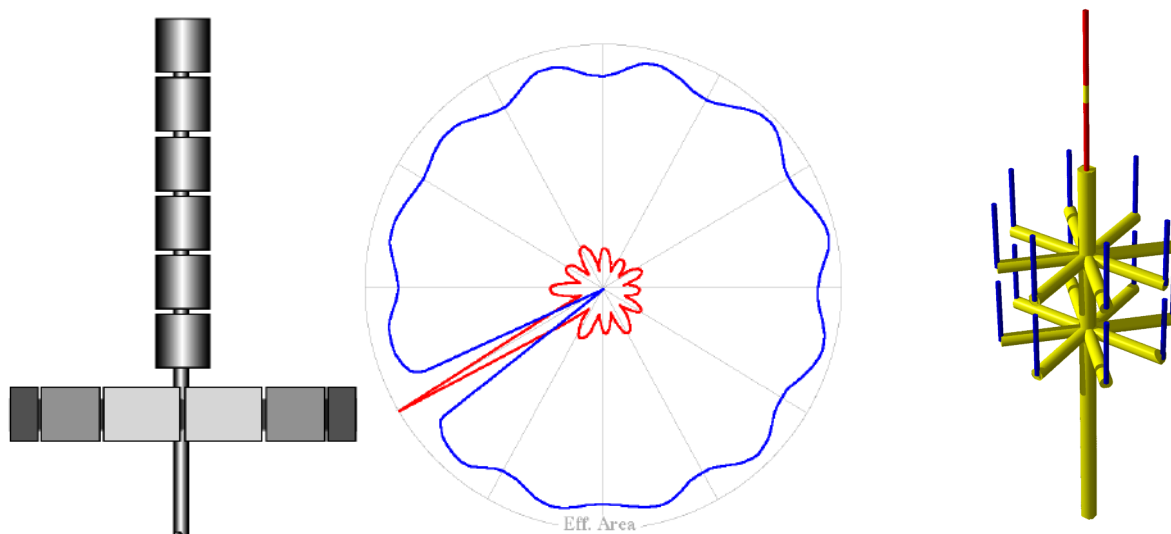
3.2 Det ursprungligen föreslagna AASR-systemet

Det ursprungliga AASR-systemet definierades av Hans Hellsten och är främst avsett som ett system för att bevaka lufterummet över eget territorium och något utanför detta, se [10], [11], [12] och [13].

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.

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 signalbehandlingsalgoritmerna fungerar i fallet isotrop antenn, kan man av andra skäl, till exempel störundertryckning eller för att få en antennvinst, tänka sig många olika typer av antenner och antennarrayer, se figur 3.1 för två förslag till hur antennerna skulle kunna se ut. Den tillgängliga informationen blir därför monostatiskt eller bistatiskt avstånd samt motsvarande radiella- (eller radialelliptiska) dopplerhastigheter.

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 6-dimensionellt 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 smygpassade mål.



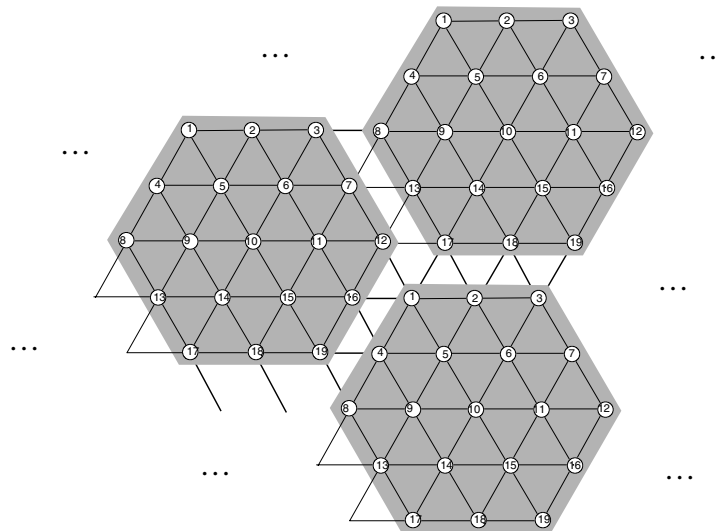
Figur 3.1: Två förslag till hur antennsystemet till en AASR-station skulle kunna utformas för att erhålla möjligheten till störundertryckning eller för att göra passiva rikttningsbestämningar.

Ett fördelaktigt sätt att placera sändare och mottagare är att i varje gitterpunkt i ett regelbundet liksidigt gitter samlokalisera dem, med t ex gemensam antenn. Ett liksidigt gitter kan vara rombiskt, kvadratisk, eller hexagonalt utgående från vald polygon. Ett rombiskt gitter uppbyggt av liksidiga trianglar kallas ekvidistant eftersom de möjliga gittertranslationerna samtliga är multiplar ett och samma gitteravstånd. För det föreslagna övervakningssystemet är det ekvidistanta nätet att föredra eftersom det medför den jämnaste möjliga utspridningen av radarstationerna över ytan.

En ansats till frekvenstilldelning utgår från att radarstationerna ligger fördelade i ett ekvidistant gitter.

Radarsändning och radarmottagning för varje station genomförs så att den för en viss avståndsupplösning nödvändiga radarbandbredden delas in i lika många delband som antalet stationer som ligger inom dubbla gitteravståndet med avseende på någon godtycklig gitterpunkt. Antalet delband blir då 19. Varje stations mottagare utförs så att mottagning kan ske över hela bandbredden medan stationen vid varje sändningstillfälle endast sänder frekvenser inom något av delbanden.

Frekvenstilldelningen över gittret utgår vidare från en för varje frekvensteg valfri tilldelning av de 19 delbanden inom den liksidiga sexkanten som erhålls av ett godtyckligt val av 19 stationer i angränsande gitterpunkter. Det inses att ett utsträckt gitter kan delas upp i liksidiga sexkanter och att den givna frekvenstilldelningen kan upprepas genom translationer över hela gittret som framgår av figur 3.2. Genom translationssymmetrin garanteras att även för helt godtycklig gitterpunkt kommer den liksidiga sexkanten av 19 stationer, som har punkten i sitt centrum, innehålla 19 olika frekvenser. Således kan den i varje mottagningspunkt och vid varje sändningstillfälle registrerade fulla bandbredden unikt härledas till utsändningar inom olika delband från de olika stationerna inom sexkanten.



Figur 3.2: Frekvenser kan tilldelas i en sexkantig cellstruktur som sedan upprepas över ett stort AASR-nät. Antalet frekvenser (delband) är 19 i detta exempel.

Den fulla bandbredden för varje facilitet generas över tiden med den kända tekniken kallad "stegad frekvens". Detta innebär att efter att varje sändning med den givna frekvenstilldelningen en ny frekvenstilldelning åstadkoms genom att stationer som sänder frekvens 1 i detta nästa steg sänder frekvens 2, stationer som sänder frekvens 2 nu sänder frekvens 3 osv för alla delband till och med att stationer som sänder frekvens 19 nu sänder frekvens 1. En hel sändningscykel består av 19 sådana frekvenstilldelningar, varvid signaler täckande den fulla bandbredden kommer registreras med avseende på varje möjlig station med sändare och mottagare högst två gitteravstånd från varandra.

3.3 System anpassat mot internationell insats

Det finns ett antal modifieringar av grundkonceptet som kan behövas för att verka i en internationell insats. Det mest elementära är att man snabbt skall kunna etablera ett system på platser som ofta saknar eller har förstörd infrastruktur. Konsekvensen är att stationerna måste vara lätt flyttbara och några behöver vara mobila, d.v.s. ständigt monterade på fordon. Ytterligare saker som behövs är kommunikation, elförsörjning samt positioneringshjälpmedel.

För att uppnå minskad sårbarhet och ökad rörlighet kan man separera sändare och mottagare från varandra och montera sändarna på de mest rörliga enheterna, kanske till och med i ett flygplan eller UAV. Sändarna behöver kraftförsörjning och utrustas med enkla antenner, positioneringsenhet samt modulerings- och enklare variant av synkroniseringsenhet. På mottagarsidan som är helt passiv finns det däremot en mer avancerad synkroniseringsenhet, eventuell gruppantenn och hela signalbehandlingsenheten. Mottagarna blir något mindre rörliga på grund av det större antensystemet och det högre kravet på positionering och synkronisering.

För att uppnå uthållighet krävs att tekniken är robust och lättservad samt har hög MTBF och låg MTTR. Att krav på bemanning, elkraft eller kommunikation skall vara uppfyllda är viktigt för att uthållighet skall uppnås. Den parasiterande moden kan också spela en roll givet att det finns tillförlitliga andra signalkällor på lämpliga platser.

För att minska risken för bekämpning (sabotage) bör man ha små stationer som inte avviker för mycket från omgivningen.

För att minska effekten av bekämpning bör man se till att det går lätt och snabbt att byta hela eller delar av en station. Speciellt utsatta stationer kan behöva ett visst fysiskt skydd och/eller bevakning. Om enstaka inre stationer i ett större AASR-nät slås ut blir systemeffekten inte speciellt stor.

För att få en bättre räckvidd i randen av ett AASR-nät kan man tänka sig hissa upp, speciellt sändarantennen, högt med exempelvis en enklare aerostat för att nå antennhöjder på några hundra meter. Detta är också en fördel vid starkt kuperad terräng eller för att täcka mycket låga höjder över en större yta. För kortvarig "gapfiller"-funktion eller tillfällig räckviddsförlängning kan en sändarenhet monteras i en UAV.

Generellt kan sägas att kostnaden för ett AASR-system anpassat för internationella insatser blir betydligt dyrare per station jämfört med det stationära fallet helt enkelt därför att vi själva måste stå för en större del av infrastrukturen.

3.4 Parasiterande funktion

Den parasiterande funktionen som på engelska kallas "Passive and Covert Radar" (PCR) eller "Passive Coherent Localization" (PCL) är internationellt omgärdat med viss 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.

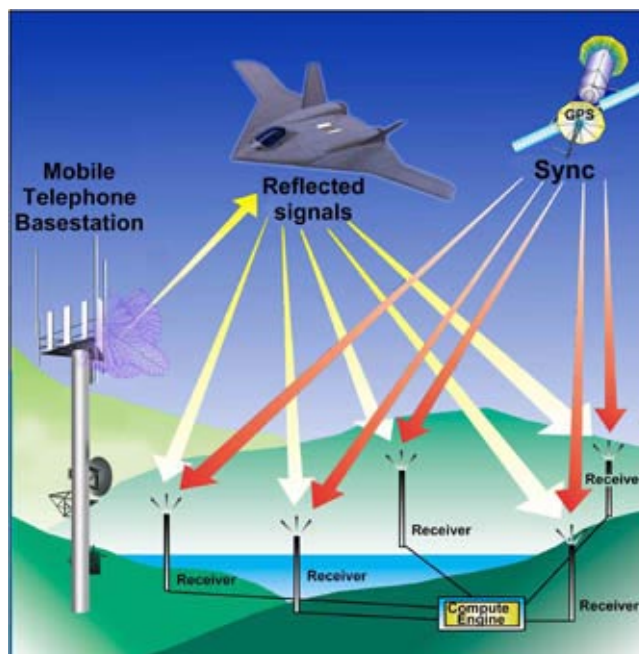
Dessa problem behöver dock ej vara oöverstigliga och när de bemästras finns flera fördelar. Mottagarna kan ej lokaliseras genom signalspaning och en störsändare måste därför sprida sin signal både geometriskt och ibland

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 detektionen av mål. Den bistatiska radarmålarean är som regel 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 i framåtriktningen är omöjlig att ens i princip eliminera (fysikaliskt känd som Babinet's 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 [24], [3], [1].

När det gäller existerande försökssystem under utveckling så råder som sagts en viss sekretess. Två uppmärksammade system är *CellDar* (Roke Manor Research), se figur 3.3, 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.

Det hävdas, bland annat i [28], att mobiltelenätets basstationer har för låga uteffekter för att ge rimliga prestanda mot flygmål, men att TV-nätet skulle kunna utnyttjas med rimliga prestanda. Resultat publicerade på konferenser antyder att korrelationsegenskaperna hos analoga TV-signaler är mindre bra eftersom de leder till mångtydighet. Däremot skulle digital TV och radio ge utmärkta korrelationsegenskaper.



Figur 3.3: *CellDar* som utnyttjar mobiltelesignaler, GPS och akustiska sensorer.

4. Använda scenarion

Nedanstående scenarion inom ramen för FN-uppdrag har använts för att diskutera hur en anpassning av AASR-konceptet skulle kunna se ut. Inspiration till dessa scenarion har hämtats från olika spel som genomförts och händelseförlopp ute i världen idag.

Garant för säkerhet

Skydda region/område mot terrorhandlingar från omgivande länder/grupperingar med till exempel UAV¹:er och större modellflygplan.

UAV kan vara utrustade med explosivämnen eller BC-stridsmedel. Syftet kan vara både att utöva terror som att genomföra sabotage.

Relativt god kontroll över verksamheten på marken är etablerad dock finns risk för sabotagehandlingar. Områdets infrastruktur fungerar väl.

Krav på systemet att med stor sannolikhet upptäcka små mål på låg höjd.

Exempel: Israel, nytt fritt Kurdistan, Norra Sri Lanka

Mobilitet vid väpnad strid

Systemet skall svara för spaning mot luftmål och inriktning av system för bekämpning av luftmål som ett delsystem i en större militär operation. Hotet kan utgöras av kvalificerade luftmål (signaturanpassade UAV och flygplan, kryssningsrobotar m.m.)

Krav finns på kontinuerlig övervakning av luftrummet under framryckning.

Exempel: Befrielsen av Kuwait

Uppnås med självkonfigurerande sändande och mottagande enheter där en del av enheterna kan vara under omgruppering.

Kontroll av flygförbuds zoner

Etablera övervakning av område med flygförbud i en låg konflikt nivå. Behov kan föreligga att se in över "fientligt område".

1. UAV = Unmanned Airborne Vehicle = Obemannad flygande farkost

5. Prestandaberäkningsprogram

För att kunna bedömma systemprestanda från olika konfigurationer av AASR-system så har det under detta värderingsprojekt skapats ett värderingsverktyg bestående av två delar:

- Prestandaberäkningsverktyg som beräknar upptäcktsannolikhet och uppskattade fel i slutresultatet som funktion av koordinat i rummet.
- Visualiseringsverktyg som visar de beräknade data presenterade på ett par olika sätt. Verktöget utnyttjar 3D-teknik för att ge en överblick över prestandaparametrarnas variation i rummet.

Båda verktygen är program som skrivits i programspråket C++ speciellt för det här tillfället. Båda bygger på andra program som använts i tidigare projekt och anpassats till den här applikationen.

5.1 Prestandaberäkningsverktyg

Prestandaberäkningsverktyget bygger på programkod (MSRSIM¹) som utvecklats under ett projekt som bedrevs i slutet av 80-talet och början av 90-talet som handlade om multistatisk radar. Då var det endast stationer baserade på digitala gruppantennar, DGA², som var aktuella. Denna kod beräknar upptäcktsannolikhet som funktion av målyta och punkt i rummet baserat på en bistatisk formulering av radarekvationen. Eftersom ett geodetiskt koordinatsystem användes så kommer jordens krökning in på ett naturligt sätt. Anpassningar har behövt göras avseende antenmodeller och inmättningsmodeller. En tidig version av detta verktyg finns beskrivet i [5].

Vi har också lagt till en modell för vågutbredning, EREPS³, som räknar ut dämpningsfaktorn som en funktion av vågutbredningsfaktorer. I denna modell tas hänsyn till: atmosfärsdämpning, interferens, refraktion och markytans beskaffenhet över hela det aktuella frekvensområdet. Det är också möjligt att välja parametrarna på ett sådant sätt att anomala förhållanden kan simuleras även om vi inte utnyttjat detta i den här studien.

Den stora nyutvecklingen har varit målinmättningsmodellen som förutom systemets resulterande upptäcktsannolikhet beräknar den så kallade korrelationsmatrisen som beskriver felellipsoiden till storlek och orientering i rummet. Utgångspunkten för dessa beräkningar är upptäcktsannolikhet för varje enskild mono och bistatisk mätkombination, osäkerheten i avstånd och avståndshastighet för varje enskild mono och bistatisk mätkombination samt den för stunden rådande geometrin. För en närmare matematisk beskrivning se [20].

Beräkningsgången i prestandaberäkningsverktyget beskrivet grovt är att vi placerar ett mål med känd omnidirektionell målyta, i vårt fall 1 m^2 , på olika

1. MSRSIM = MultiStatisk Radar SIMulator

2. DGA = Digitala GruppAntenner = Antenner bestående av många antenkanaler där det bakom varje antennelement sitter en komplett mottagare med A/D-omvandling.

3. EREPS = Engineer's Refractive Effects Prediction System från NRL i USA

platser i rummet i ett 3-dimensionellt gitter. För varje gitterpunkt frågar vi oss: om jag placerade detta mål här, vilken upptäcktsannolikhet skulle jag då få från varje bistatisk kombination av de sändande och mottagande stationerna i mitt AASR-system. Alla de bistatiska kombinationer vars upptäcktsannolikhet överstiger detektionströskeln skickas vidare till den rutin som beräknar resulterande upptäcktsannolikhet och korrelationsmatris givet att fler än tre bistatiska kombinationer finns med i listan. Resultatet registreras sedan i en datafil.

I starten av prestandaberäkningsverktyget så byggs scenariot upp, dvs vi placerar ut varje enskild AASR-station på en plats i rymden och vi ger värden på alla radar-, vågutbrednings- och målparametrar. Hela scenariot är beskrivet i en enda datafil i textform.

Dessa beräkningar blir mycket tunga att köra då scenariot innehåller många AASR-stationer och/eller beräkningsgittret innehåller många punkter. Detta beror både på att många beräkningar utförs per gitterpunkt och att mycket stora matriser temporärt behöver allokeras i felberäkningsrutinen. Som ett exempel kan nämnas att scenariot i figur 5.1 där antalet beräkningspunkter var $272 \times 232 \times 10 = 631040$ och vi körde på en 4 CPU:ers SUN-Fire-V440 (1.3 GHz) med 4 Gbyte RAM per CPU med 17 trådar så tog hela beräkningen cirka 13000 sekunder.

Givetvis finns det fortfarande aspekter som man inte tar hänsyn till i det här programmet till exempel effekter av olika sätt att välja delband eller följer av mångtydigheter orsakat av olämpliga val av PRF. Det blir en uppgift för en eventuell fortsättning.

5.2 Visualiseringsverktyget

Visualiseringsverktyget läser utdatafilen från prestandaberäkningsverktyget. Sedan kan man välja olika visualiseringsvarianter för prestandaparametrarna: upptäcktsannolikhet, positionsfel projicerat på xy-planet, positionsfel projicerat på z-axeln, hastighetsfel projicerat på xy-planet och hastighetsfel projicerat på z-axeln. För var och en av dessa parametrar kan man välja att visualisera som:

- Ett antal halvgenomskinliga isoytor dvs ytor där prestandaparametern har ett konstant värde. För upptäcktsannolikheten är dessa värden 0.1, 0.5 och 0.9. En visualiseringsform som fungerar bäst då parametern varierar relativt långsamt. I vårt fall då vi inte tar hänsyn till vågutbredningsfenomen.
- Ett antal isokurvor parallellt med xy-planet, dvs kurvor där prestandaparametern har ett konstant värde för en given höjdkoordinat. Den här formen är enbart användbar vid detaljstudier av ett givet höjdsikt.
- Volymbild. Här har vi skapat en halvgenomskinlig 3-dimensionell "bild" av parametervärdet där parametervärdet styr den färg som bilden skall anta i en punkt. För punkter där parametervärdet understiger en

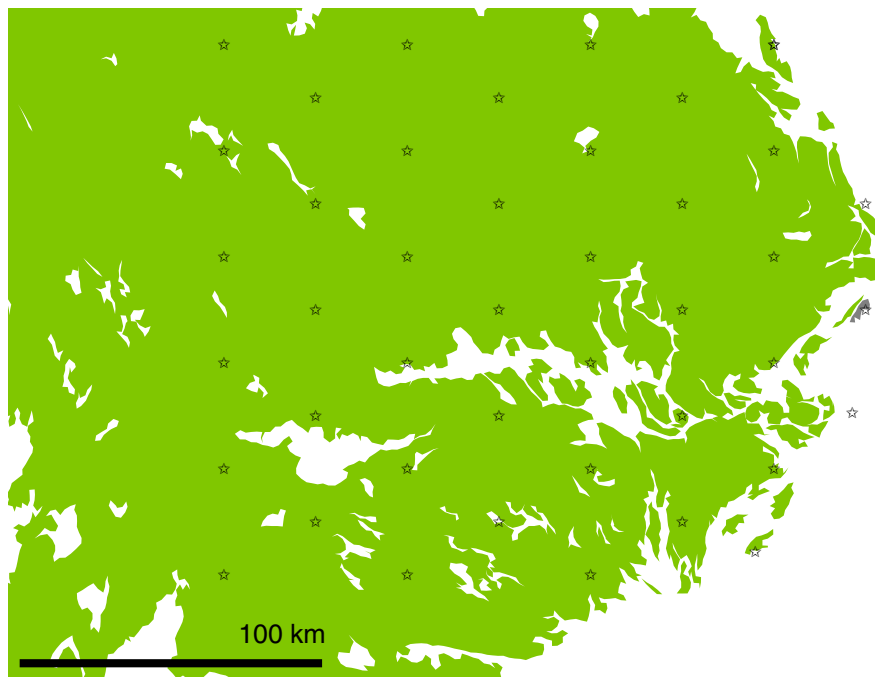
tröskelnivå gör man punkten helt genomskinlig. Färgvärdet går från rött till blått när man varierar parametervärdet från lägsta till högsta värdet. En tröskelsättning finns också för att färgskalan skall utnyttjas. De allra flesta bilderna i avsnitt 2.2 (Exempel på prestanda) är gjorda med den här tekniken eftersom den ger en god överblick.

Programmet är en enklare modifiering av exempelprogram som medföljer programkoden till projekten för öppen källkod "FLTK" och "OpenRM" som utgör grunden till vårt visualiseringsprogram. Huvudfunktionerna i programmet förutom att välja visualiseringsform är att vrida och vända på den visualiserade bilden samt åka med "kameran" ut och in i bilden och välja belysningskällor. Slutligen kan man också spara den bild som visas på skärmen i en fil.

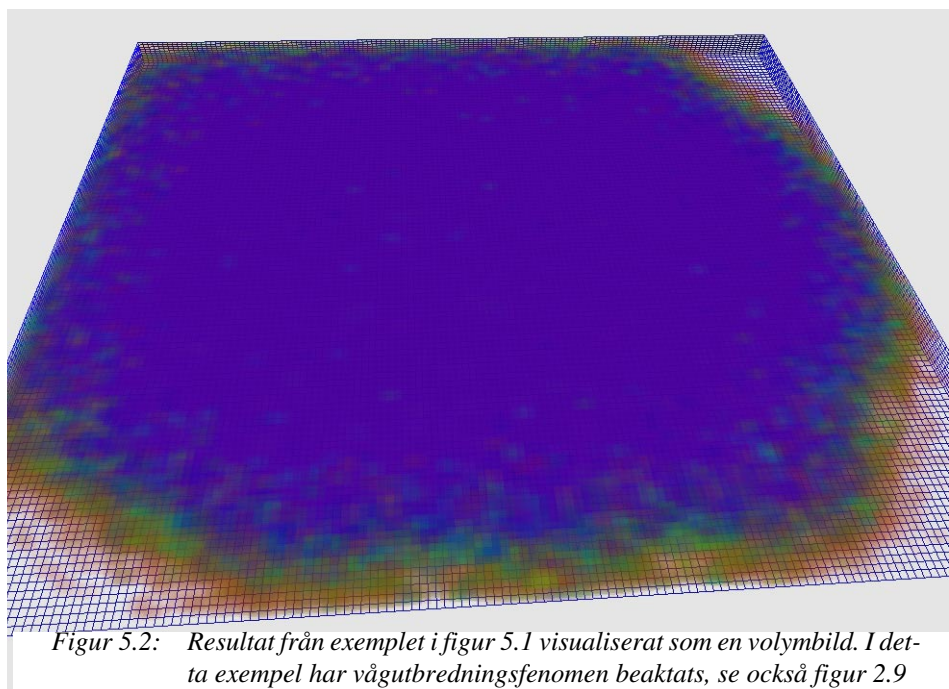
5.3 Exempel på beräkning

Först sätter man upp scenariot i en textfil där i det här exemplet anges ett AASR-system bestående av 41 stationer utspridda i ett ekvidistant nät med medelavstånd 35 km. Sedan anges ett antal parametrar som till exempel är bärvågsfrekvens=150MHz, bandbredd=10MHz, falsklarmrisk= 10^{-6} , integrationstid=50ms, sändeffekt=200W. Ytterligare parametrar som specificerar vågutbrednings- och målegenskaper anges liksom de koordinatpunkter mm som beskriver beräkningsgittret som vi placerar vårt mål i. Figur 5.1 på sidan 36 visar hur stationerna placerats ut i det här exemplet.

Resultatet av ovanstående scenario blev enligt figur 5.2 då vi använt vågutbredningsmodellen och visualiserat som en volymbild. Volymbilden betraktas snett ovanifrån så i praktiken ser vi i det här fallet upptäcktsannolikheten på hög höjd. I bakgrunden ser man ett rutnät som visar hur beräkningsgittret ser ut. I detta fall är storleken på en gittercell $2 \times 2 \times 1 \text{ km}^3$. I kanten på området kan man se färgskiftningar och en luddighet. Detta är en följd av att vågutbredningsfenomenen gör området med hög upptäcktsannolikhet flikigt vilken resulterar i en luddighet i den här visualiseringsformen.



Figur 5.1: Utplacering av AASR-stationer i ett väsentligen ekvidistant gitter med cirka 35 km mellan stationerna. Varje antenn är 50 m hög utom de längst ut i kustbandet som har en antennhöjd på 100 m.



Figur 5.2: Resultat från exemplet i figur 5.1 visualiserat som en volymbild. I detta exempel har vågutbredningsfenomen beaktats, se också figur 2.9 där vi har frirymdförhållanden.

6. Referenser

- [1] Alm, A., *Analys av bistatiska och multistatiska funktioner*, FOI memo 03-2238, 2003
- [2] Almström, H., *Synpunkter på utplaceringen av nätverksbaserat luftvärn*, FOI-R--0905--SE, Januari 2004
- [3] Chernyak, V.S., *Fundamentals of Multisite Radar Systems*, ISBN: 90-5699-165-5, Gordon and Breach Science Publishers, 1998.
- [4] Fors, K., *Krav på AASRs kommunikationssystem utifrån ett scenarioperspektiv*, FOI memo 03-2741, 2003
- [5] Grahn, P., Alm, A., *Simulator för multistatisk radar*, FOA C 30718-8.4 3.3, Augusti 1993
- [6] Gunnarsson, R., *Beräkning av radarmålärea för en cylinder*, FOI memo 03-2716, 2003
- [7] Gustafsson, N., Haapalahti, G., Herberthson, M., *Mätningar av bistatisk radarmålärea hos en cylinder*, FOI report FOI-R--0870--SE
- [8] Haapalahti G., *Bistatic radar measurements against an aircraft*, FOI Memo 876, April 2004
- [9] Haapalahti G., Herberthson M., *Simulations of direct target localization and clustering for AASR*, FOI report FOI-R--0679--SE, 2002
- [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] Herberthson, M., *On determining multiple positions and velocities from bistatic measurements -- fast bistatic association in AASR*, FOI report FOI-R--0815--SE, 2003
- [19] Herberthson, M., *Om falskmål i AASR*, FOI Memo 814, Mars 2004
- [20] Herberthson M., Murdin D., *En modell för positionering av flygmål i EVA via AASR-mätningar*, FOI Memo 821, Mars 2004
- [21] Kaijser, T., *Simulations of an exclusion principle for target positioning in AASR*, FOI report FOI-R--0690--SE, 2002
- [22] Larsson, B., *Radarsystemteknik för bredbandsradar -- slutrapport 2003*, FOI-R--1088--SE
- [23] Pettersson, M., Halvårsrapport juli 2003 i projektet ``Avancerade målsökarsystem och koordinatstyrning'', FOI memo 03-1833, 2003
- [24] Willis, N., *Bistatic Radar*, ISBN 0-89006-427-X, Artech House, Inc., 1991
- [25] Josefsson, L., *Något om bistatisk radarmålarea*, EMW/FX/T-02:008 Usv, 2002
- [26] Lanne, M., *Lågfrekvensstudie. Störundertryckning hos enskild station*, EMW/FX/U-02:029 Usv, 2002
- [27] Voigt, L., *Lågfrekvensradarstudie - Bistatisk detektering*, EMW/FT/R-03:075 Usv, 2003
- [28] Törby, A., *Radarupptäckt av flygplan med hjälp av basstationssändare eller TV-sändare*, MR-RA2001-14