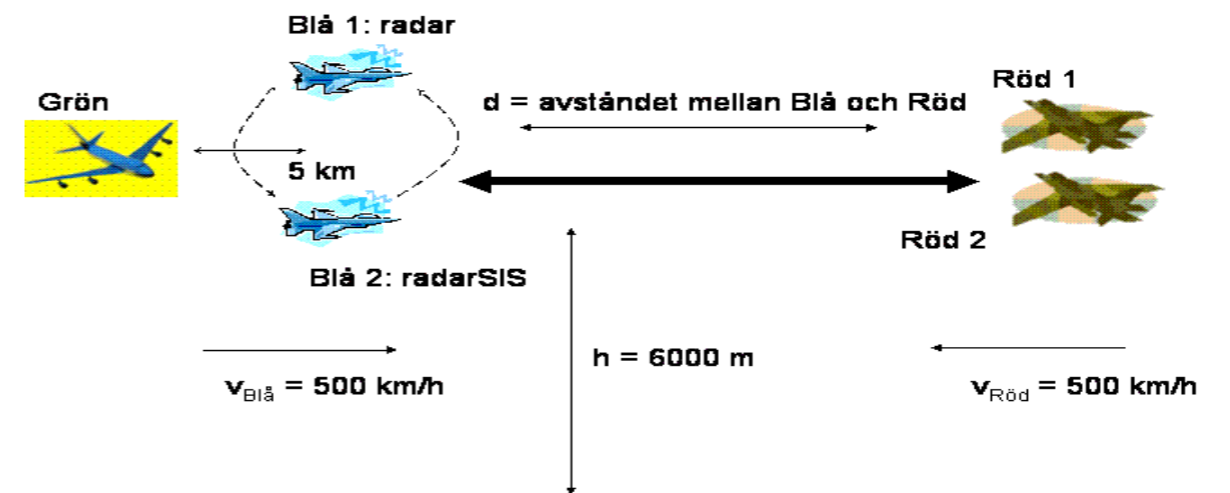


FREDRIK LANTZ, MARIA ANDERSSON, ANDRIS LAUBERTS,
DAN STRÖMBERG, MARTIN FOLKESSON



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

Fredrik Lantz, Maria Andersson,
Andris Lauberts, Dan Strömberg,
Martin Folkesson

Sensorsamverkan för störundertryckning

| | | |
|---|---|---------------------------------------|
| Utgivare FOI - Totalförsvarets forskningsinstitut Ledningssystem Box 1165 581 11 Linköping | Rapportnummer, ISRN FOI-R--2330--SE | Klassificering Metodrapport |
| | Forskningsområde 7. Ledning | |
| | Månad, år September 2007 | Projektnummer E7098 |
| | Delområde 72 MSI | |
| | Delområde 2 | |
| Författare/redaktör Fredrik Lantz Maria Andersson Andris Lauberts Dan Strömberg Martin Folkesson | Projektledare Fredrik Lantz | |
| | Godkänd av | |
| | Uppdragsgivare/kundbeteckning Försvarsmakten (FM) | |
| | Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig Författarna | |
| Rapportens titel Sensorsamverkan för störundertryckning | | |
| Sammanfattning <p>Rapporten beskriver ett koncept för störundertryckning som innebär användning av signalspaning, plattform/sensorsamverkan och datafusion för undertryckning av störning mot radar. Målsättningen är att i tillräcklig tid kunna avgöra vilka av ett antal objekt som är de riktiga och vilka som är introducerade av störning mot radar, dvs. att i viss mening kunna klassificera objekten. I första hand är jaktflygtillämpningar i fokus, men huvuddelen av konceptet kan användas lika väl för andra tillämpningar. Konceptet presenteras i två scenarier för nätverksbaserad störundertryckning i en internationell insats. Syftet med scenarierna är att beskriva hur konceptet kan användas ur en taktisk synvinkel. De i konceptet ingående huvudkomponenterna, dvs. störare, signalspaningssensor, radar och datafusionsmodul beskrivs. Kompletterande metoder för positionering, TDOA och FDOA, analyseras för att dess bidrag till konceptet ska kunna bedömas. Rapporten beskriver också grundläggande frågor som måste besvaras för att kunna avgöra om konceptet kan realiseras eller inte.</p> | | |
| Nyckelord sensorsamverkan, plattformssamverkan, störundertryckning, datafusion, ECCM | | |
| Övriga bibliografiska uppgifter | Språk Svenska | |
| ISSN 1650-1942 | Antal sidor: 37 s. | |
| Distribution enligt missiv | Pris: Enligt prislista | |

| | | |
|---|--|-------------------------------------|
| Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Command and Control Systems P.O. Box 1165 SE-581 11 Linköping | Report number, ISRN FOI-R--2330--SE | Report type Method report |
| | Programme Areas 7. Command and Control | |
| | Month year September 2007 | Project no. E7098 |
| | Subcategories 72 MSI | |
| | Subcategories 2 | |
| Author/s (editor/s) Fredrik Lantz Maria Andersson Andris Lauberts Dan Strömberg Martin Folkesson | Project manager Fredrik Lantz | |
| | Approved by | |
| | Sponsoring agency Swedish Armed Forces | |
| | Scientifically and technically responsible The authors | |
| Report title (In translation) Sensor cooperation for radar jamming suppression | | |
| Abstract <p>The report describes a concept for jamming suppression that uses electronic support measures, platform/sensor co-operation and data fusion for suppression of jamming against radars. The goal is to be able to determine, in sufficient time, which of a number of objects that are the real objects and which objects that are introduced by jamming, .e. to classify the objects. Fighter aircraft is in focus, but the main parts of the concept can be used equally well in other applications. The concept is introduced in two scenarios for network-based jamming suppression in an international mission for the Swedish Armed Forces. The purpose of the scenarios is to describe how the concept can be used from a tactical perspective. The main components, i.e. jammer, ESM, radar and data fusion module, are described. Complementary methods for positioning, TDOA and FDOA, are analyzed to determine their possible contribution to the concept. The report also describes a number of important questions that remain to be answered to determine if the concept can be realized or not.</p> | | |
| Keywords Sensor cooperation, platform cooperation, data fusion, ECCM, jamming suppression | | |
| Further bibliographic information | Language Swedish | |
| ISSN 1650-1942 | Pages 37 p. | |
| | Price acc. to pricelist | |

Innehåll

| | |
|--|-----------|
| 1 Bakgrund | 6 |
| 1.1 Inledning | 6 |
| 1.2 Störhotet | 6 |
| 1.3 Samverkan mellan ESM och radar | 7 |
| 2 Problembeskrivning | 8 |
| 2.1 Scenario | 8 |
| 2.2 Samverkan mellan två JAS-flygplan | 8 |
| 2.3 Samverkan mellan ett JAS-flygplan och en korvett | 10 |
| 3 Konceptet | 13 |
| 3.1 Konceptbeskrivning | 13 |
| 3.1.1 Systemkomponenter | 13 |
| 3.1.2 Gränssättande faktorer | 13 |
| 3.1.3 Avgörande frågor | 14 |
| 4 Teknisk bakgrund | 15 |
| 4.1 Störning | 15 |
| 4.1.1 Störformer | 15 |
| 4.1.2 DRFM – Digitalt RadioFrekvent Minne | 16 |
| 4.1.3 Störtaktik | 17 |
| 4.2 Signalspaningssensorer och dess räckvidd | 17 |
| 4.2.1 ESM-egenskaper | 18 |
| 4.2.2 Räckvidd för signalspaning | 19 |
| 4.2.3 Krav för upptäckt av signal | 20 |
| 4.2.4 Skattning av räckvidden vid signalspaning | 21 |
| 4.3 Radar | 22 |
| 5 Datafusion | 23 |
| 5.1 Positionering | 23 |
| 5.2 Klassificering | 23 |
| 6 Mätmöjligheter | 25 |
| 6.1 Riktningmätning: AOA | 25 |
| 6.2 Avståndsmätning: TDOA | 26 |
| 6.3 Frekvensskillnadsmätning: FDOA | 27 |
| 6.4 TDOA - AOA | 28 |
| 6.5 FDOA - AOA: metod 1 | 28 |
| 6.6 FDOA - AOA: metod 2 | 28 |
| 6.7 FDOA - AOA: metod 3 | 29 |
| 6.8 TDOA - FDOA | 29 |
| 6.9 FDOA - FDOA och TDOA - TDOA | 30 |
| 6.10 AOA - TDOA - FDOA | 30 |
| 7 Kommunikation | 31 |

8 Slutsatser33

9 Förslag till fortsatt arbete34

10 Bilaga A - Minsta mätbas för separation av två främmande plattformar35

Referenser.....36

1 Bakgrund

1.1 Inledning

Projektet ”Systemtilltro, Synkroniserade System” (SSS) har under senare år haft verksamhet i samverkan med FLSC, FMV, industrin och FOIs institutioner för Telekrigsystem och Telekrigvärdering för att utveckla och utvärdera metoder syftande till förbättrad situationsmedvetenhet för flygförare. Speciellt har det funnits fokus på samverkan mellan passiva sensorer på olika plattformar och på datafusionsmetoder för målföljning. Avsikten med denna verksamhet under 2007 är att analysera vilka möjligheter det finns att använda fusion och sensorsamverkan för att motverka radarstörning mot jaktflygplansförband. Vi förutsätter att våra motståndare också är flygförband med jakt- eller attackuppdrag, samt att själva scenariot är en internationell insats där vi måste agera utan stöd från någon STRIL. Det finns alltså bara flygplanets egna sensorer och samverkande plattformars sensorer att lita på. I detta fall har vi valt att fokusera på samverkan mellan radar- och signalspaningssensorer (ESM, *Electronic Support Measures* används i denna rapport som ett samlingsnamn på olika typer av signalspaningssensorer) på olika plattformar. Vi bedömer att sådan sensorsamverkan inte har analyserats eller beskrivits adekvat, om ens alls, på FOI, FMV eller FM tidigare.

I första hand har vi fokuserat på metoder som motverkar repeterstörning med DRFM-teknik, dvs. störning som resulterar i att en radar förutom riktiga mål också uppfattar en mängd falska mål. Målsättningen med metoderna är att i tillräcklig tid kunna avgöra vilka av målen som är de riktiga och vilka som är de falska, dvs. att i viss mening kunna klassificera målen. Exakt vad som är ”i tillräcklig tid” är naturligtvis beroende av den aktuella situationen, men i denna rapport har vi definierat detta som att korrekt klassificering måste kunna ske innan våra motståndare har kommit så nära sina mål att de kan avlossa en robot mot dessa.

I och med att detta problem inte har analyserats adekvat tidigare, finns tyvärr inga möjligheter att i detta projekt slutgiltigt bedöma om störundertryckning kan ske med dessa sensorer och vilka metoder som i så fall är de bästa för ändamålet. Syftet med denna rapport är istället att beskriva ett koncept för störundertryckning, dvs. att beskriva de viktigaste komponenterna i ett system för störundertryckning och deras huvudsakliga funktion i denna tillämpning. Dessutom är syftet att identifiera de viktigaste hindren mot störundertryckning och därmed också identifiera var framtida forskningsinsatser bör ske.

1.2 Störhotet

Störhotet har spelat en avgörande roll i många militära konflikter. Det har varit en aktiv vapenkomponent i de flesta konflikter det senaste seklet. I boken [Gerdle P., 2004] ges en översikt av en rad militära konflikter där störhotet påverkat den efterföljande striden och utgången på helt avgörande sätt. I många av dessa fall är störaren flygburen. Exempel på tillfällen då störning mot flygburen radar kan uppträda är vid spaningsinsatser (mot mark, sjö, luft), eskortskydd och attackinsatser.

Ett hot kan vara förväntat eller oväntat; om det är förväntat har man sannolikt förberett taktiska åtgärder såsom motmedelsinsatser. Sådana insatser kan dock medföra att hotet fortfarande är stort, kräva snabba beslut och involvera resursförbrukning av icke reproducerbara materiel eller svåra manövrar. Om det är av oväntat slag blir besluten mera oförutsägbara och latent vanskliga eller farliga. Effektivitet, säkerhet och uthållighet ökar väsentligt om man som komplement till motmedel har en väl utvecklad förmåga till störundertryckning.

Erfarenheterna säger att störhotet är fortsatt stort för insatsstyrkor i internationella operationer. Störutrustningarna har blivit lätta och billiga, och kan installeras på enkla plattformar såsom lätta flygplan och markfordon. De finns på en öppen marknad där enskilda krigsherrar har möjlighet att göra inköp. Den potentiella störförmåga som följer av att inneha sådan utrustning kan inte

underskattas i assymetrisk krigföring: En liten armés innehav och användning av störutrustning kan ominstetgöra en mångdubbelt starkare aktörs försök att skaffa luft, sjö eller markherravälde. Konsekvensen blir att störutrustningen blir ett eftertraktat och begärligt vapen i händerna på gerillakrigsförare och privatarmeer. Den mera slagfältsmässiga typen av tillämpningar finns givetvis också kvar hos dessa utrustningar.

Flygstridskrafterna i en internationell operation har ofta i uppdrag att skydda och bistå marktrupperna. Om inte det luftburna skyddet fungerar minskar drastiskt förutsättningarna till insatser på marken. Säkerheten hos insatsstyrkan påverkas negativt. Avsaknaden av STRIL-system, dvs. ett stridsledningssystem med förmåga till datainsamling, beslutsfattande och plattformsstyrning, i internationella operationer gör störhotet än tydligare: Utan STRIL är varje plattform mera beroende av sin egen radar än den hade varit med ett STRIL-system.

1.3 Samverkan mellan ESM och radar

Samverkan mellan sensorer ger möjlighet att öka förmågan till informationsinsamling på flera sätt; bland mycket annat ökad rumslig täckningsförmåga, ökad sannolikhet att upptäcka relevanta mål, ökad noggrannhet, etc. Förutom att man utnyttjar den uppenbara fördelen att sensorerna blir flera, sker detta genom att man kan utnyttja olika sensorers skilda egenskaper, använda sensorerna på olika sätt och, i de fall sensorerna finns placerade på olika plattformar, utnyttja skilda geometrier gentemot spaningsområdet. Genom att utnyttja just ESM och radarns skilda egenskaper och det faktum att de finns på skilda plattformar kan samverkan mellan dessa sensorer användas också för att minska störhotet.

För att uppnå störundertryckning genom de samverkande sensorerna krävs att flera, nya processer genomförs på ett korrekt sätt. Den första processen är att informationen måste överföras från den ena plattformen till den andra, dvs. kommunikation. Dessutom måste den information som överförs behandlas till en sensorgemensam lägesbild genom datafusion och sensorerna styras på ett sätt som leder till att de används korrekt (i rätt tid, mot rätt mål, etc.), dvs. sensorstyrning.

Förutom de fall då ESM och radar mäter var för sig, finns vissa mätmetoder då sensorplattformarnas skilda lokalisering kan användas. Dessa är framför allt TDOA (Time Difference Of Arrival) och FDOA (Frequency Difference Of Arrival). TDOA är en mätmetod som används för positionsbestämning av störare givet mätning i minst tre markbaserade ESM. FDOA mäter skillnad i doppler mellan två inmätare. Omvänt kan dessa metoder användas för att lokalisera en markfast störare från flygande plattformar. Problemet är naturligtvis svårare då både störare och inmätare rör på sig. Dessa metoder är, om inte direkt användbara för huvudproblemet i denna undersökning, av visst intresse då de skulle kunna användas för att förbättra positions- och hastighetsskattningen av målen.

På FOI finns tidigare utfört olika studier angående samverkan mellan radar på olika plattformar, se t. ex. [Andersson M., 2005] och [Andersson M., 2006]. Studier av samverkan mellan ESM på olika plattformar finns också genomförda, se t. ex. [Strömberg D., 2005]. Samverkan mellan ESM och radar på olika, flygande plattformar är inte väl utrett, även om tankar därom funnits en längre tid [Andersson B., 2002, sid. 29]. FOI har tidigare analyserat möjligheterna att utveckla metodik för signalspaning genom samordnad radar och signalspaning på fasta plattformar, se [Andersson B., 2004].

2 Problembeskrivning

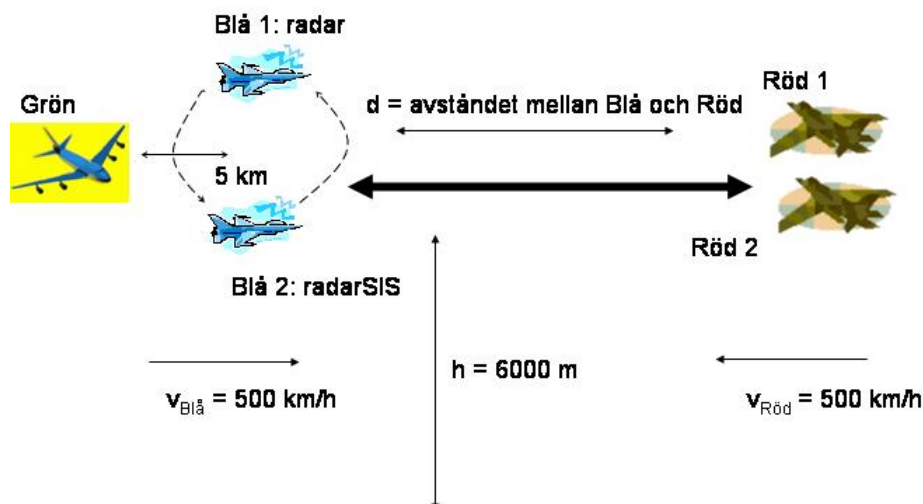
2.1 Scenario

Nedan presenteras två scenarier för nätverksbaserad störundertryckning. Syftet med scenarierna är att beskriva metoden för störundertryckning i några olika situationer för att försöka få en insikt i hur metoden kan ha sin plats ur taktisk synvinkel. Scenarier har tagits fram i diskussioner med olika personer inom FOI specialiserade på signalspaning och störning, se [Diskussioner, 2007]. Scenarierna har däremot *inte* verifierats med genom medverkan av FM, men avsikten är att dessa scenarier ska kunna ligga till grund för en fördjupad diskussion med experter på FM. Syftet är också att scenarierna ska kunna ligga till grund för framtida beräkningar och simuleringar för att utvärdera metodens prestanda och taktiska användning. För en fullständig konceptbeskrivning se kapitel 3.

Vi antar att vi har en svensk styrka i en internationell, fredsbevarande FN-insats med uppgift att bevaka ett visst större område i land A. Konflikten är i grunden mellan land A och land B. Land B är aggressivt mot land A och ser negativt på FN-insatsen (Röd sida i nedan beskrivna situationer). Vi förutsätter att Röd inte vill engagera FN-styrkorna, då Röd är tekniskt underlägsna, men är villiga att angripa Grön även då de står under FN-styrkornas beskydd. Land B har dock viss tillgång till stridsflyg med avancerad störutrustning, dvs. en repeterstörningsutrustning, FML eller DRFM (Digitalt RadioFrekvent Minne) ombord. Dessutom har de tillgång till egen STRIL. I den svenska styrkan ingår minst två JAS, vilka är utrustade med nosradar, som också kan arbeta passivt, samt sensorer för signalspaning. Egen STRIL saknas, vilket gör att plattformssamverkan ökar i betydelse.

2.2 Samverkan mellan två JAS-flygplan

I det första scenariet eskorteras ett civilt flygplan (Grön) av två jaktflygplan, dvs. två JAS (Blå), se Figur 1. Det finns ett känt hot mot Grön. Nedan följer en beskrivning av scenariot i flera steg.

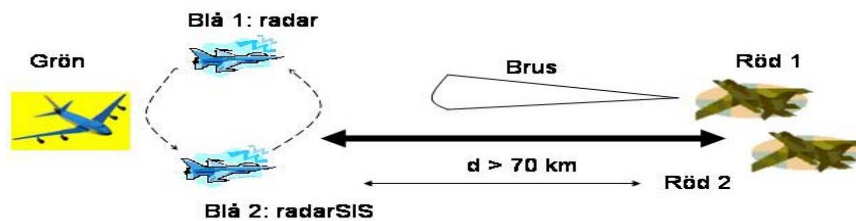


Figur 1. Nätverksbaserad störundertryckning med två JAS-flygplan (Blå 1 och Blå 2). Syftet är att eskortera det civila flygplanet (Grön). Hotet utgörs av Röd 1 och Röd 2.

1. Enligt underrättelser vet man att det finns en förhöjd hotbild mot Grön och att två jaktflygplan (Röd) har lyft från en viss flygplats. Man vet ungefär när Röd kommer att

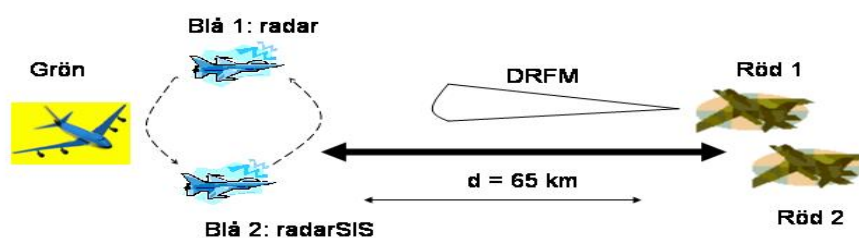
möta Blå inklusive Grön, baserat på avståndet till flygplatsen och Röds skattade fart. Man vet också i vilken sektor Röd sannolikt kommer. Röd flygplanstyp, beväpning och radar/roboträckvidd antas känd. Röd jakt får information om Blå och Grön via sin STRIL.

2. Blå spanar efter Röd. Blå radar arbetar i detta läge i HDP-mode, vilket inte ger entydighet i avstånd. Antag att Blå, Grön och Röd flyger på samma höjd, ca 6000 m samt att Grön flyger ca 5 km bakom Blå. Blå sida uppträder med stort avstånd mellan plattformar för att få en större pejlbas.
3. Röd försöker att i det längsta gå tyst. Röd har för avsikt att så småningom avfyra en robot mot Grön. Roboten skickas iväg med stöd av Röd radar. Röd har därför behov av att använda sin radar i ett visst läge, som då åtminstone motsvaras av robotens räckvidd. I detta fall antas en räckvidd på 60 km. Röd har viss kännedom om Blå radar och kommer därför att kunna anpassa sin störsändning efter den mod som Blå radar arbetar i. Röd startar med brusstörning i ett tidigare skede än 60 km i syfte att försöka hinna maskera sitt eget flygplan innan de behöver starta sin radar.



Figur 2. I ett tidigt skede startar Röd brusstörning mot Blå i syfte att hindra Blå från att detektera Röd.

4. Efter en tid nås genombrottsavståndet, dvs. Röd kan inte längre dölja sig i bruset. Antag att detta sker då $d = 65 \text{ km}$. (Genombrottsavståndet beror av effekten hos Röd störare, effekten hos Blå radar samt målarean hos Röd, vilka inte har definierats i detta scenario).
5. Då $d = 65 \text{ km}$ antas Blå alltså kunna detektera Röd genom brusstörningen. Blå kan nu börja försöka låsa på Röd. Blå radar skickar därför ut ett antal på varandra följande PRF-er, i syfte att resolvera avståndet till Röd.
6. Då Blå byter mode för att försöka låsa på upptäcks detta av Röd och DRFM-störning startas automatiskt i syfte att försvåra för Blå att få entydighet i avstånd. Signalbehandlingen hos Blå får nu både verkliga signaler och ett stort antal falska signaler att analysera. Om inte de falska målen kan undertryckas så kommer processen för att få entydighet att pågå för lång tid.
7. Det är nu viktigt för Blå att på så kort tid som möjligt störundertrycka. Det är fördelaktigt om entydighet i avstånd har uppnåtts innan $d = 60 \text{ km}$. Blå 1 skickar information om sin radarsignal till Blå 2, som ska söka efter de falska målen som skickas mot Blå 1. Kommunikationen diskuteras i kapitel 7. Störundertryckning i nätverk görs baserat på vinkel- och fartinformation. Då $d = 65 \text{ km}$ antas störkonen, dvs. det område inom vilket falska mål kommer att uppträda mot Blå, vara relativt smal. Det är förmodligen svårt för Röd att lyckas störa Blå effektivt på detta avstånd.



Figur 3. Då avståndet mellan Blå och Röd är 65 km kan inte brusstörning längre dölja Röd. Röd startar istället DRFM-baserad störning i syfte att hindra Blå från att få entydighet i avstånd.

8. I värsta fall kan Röd tänkas angripa Blå, även om det är Grön som är målet. Blå måste anta att Röd är ett hot även emot dem. Hur lång tid tar det att genomföra störundertryckning? Vilka är de begränsande faktorerna? Det tar t. ex. 18 s för Blå och Röd att närma sig varandra 5 km enligt ekvationen nedan, om man antar att Blå och Röd har hastigheterna 500 km/h (se ekvationen nedan). Detta motsvarar ett fall när de rör sig direkt mot varandra, vilket kan anses som ett värsta fall. Det tar 3,6 s för Röd och Blå att närma sig 1 km. Kan störundertryckningen under denna tid hinna ge en tillräckligt god lägesbild så att entydighet i avstånd kan fås? Störundertryckning bör kunna ske relativt snabbt [Andersson M., 2006]. Det är troligt att tiden för att skapa en god lägesuppfattning i detta fall kortare än 18 s.

$$t = \frac{s}{v} = \frac{s}{v_{Blå} + v_{Röd}} = \frac{5[km]}{500 + 500[km/h]} = 0,005[h] \rightarrow 0,005 \times 3600[s] = 18[s]$$

$$t = \frac{s}{v} = \frac{s}{v_{Blå} + v_{Röd}} = \frac{1[km]}{500 + 500[km/h]} = 0,001[h] \rightarrow 0,001 \times 3600[s] = 3,6[s]$$

9. Antag att strax innan $d = 60$ km så låser Blå 1 på Röd. Avståndet till Grön är fortfarande större än robotens räckvidd. Röd väljer nu att vända om, eftersom Röd fortfarande inte kan hota Grön och själv är hotad.

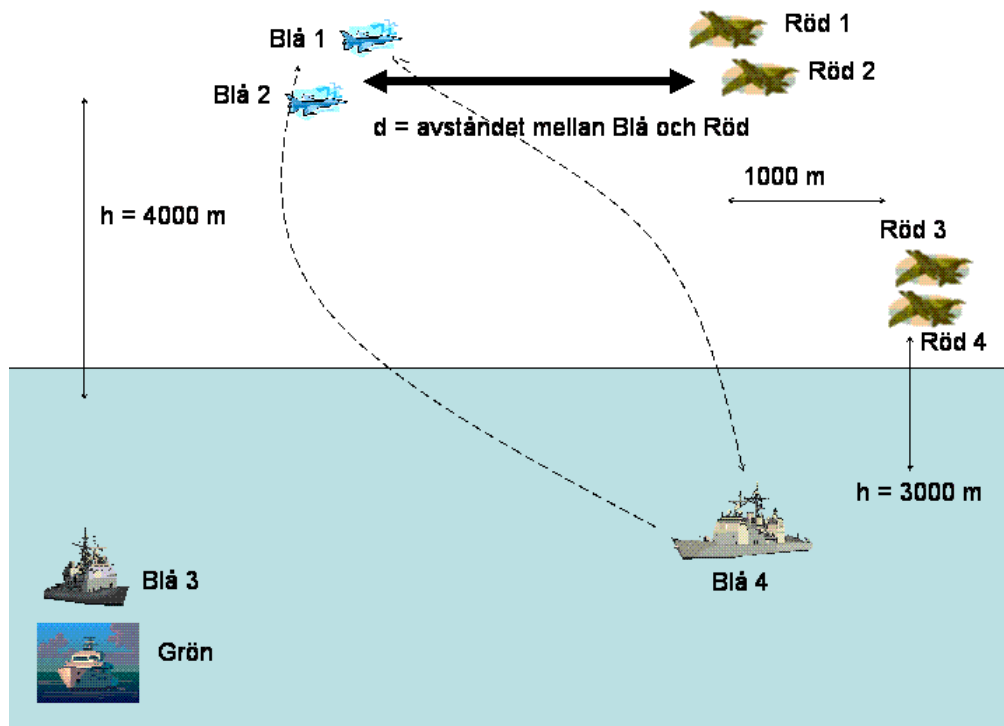
Det är möjligt att störningen kan ske på ett större avstånd än i detta scenario under förutsättning att förhållandena är gynnsamma, exempelvis en störsändare som ger en relativt stor störsektor. I ett sådant fall kommer tidsperioden för störundertryckning att vara längre, vilket skulle vara fördelaktigt för Blå. Även om, som i detta scenario, avståndet till Röd är i samma storleksordning som Röd robots räckvidd så kommer det att vara en stor fördel för Blå att kunna göra denna störundertryckning. Det ger Blå en chans att ta tillbaka ett informationsöverläge.

2.3 Samverkan mellan ett JAS-flygplan och en korvett

I detta scenario skyddas ett civilt fartyg (Grönt) av två militära flygplan och två korvetter. Hotet är två attackplan (Röd 3 och Röd 4). Med attackflygplanen följer också två jaktflygplan (Röd 1 och Röd 2), vilka har uppgiften att utföra störning mot Blå flygplan och Blå fartyg. Syftet med denna störning är att skydda både Röd jakt och attack. Nu görs störundertryckning mellan Blå 1 och Blå 4 och/eller Blå 2, där Blå 1 har radar och Blå 4 och Blå 2 har signalspaningsutrustning, se Figur 4.

Blå 1 skickar information till Blå 4/Blå 2 om den radarsignal man sänder ut, så att Blå 4/Blå 2 kan rikta in sin signalspaning mot rätt signaler för störundertryckning. Kommunikationen diskuteras i kapitel 7. För en fullständig konceptbeskrivning se kapitel 3.

Fartygets signalspaningsutrustning är noggrannare i sin bestämning av bäring än flygplanets radarvarnare. Det innebär att förutsättningarna förbättras för att kunna se de falska målen med fartygets signalspaningsutrustning, jämfört med det första scenariot där flygplanets signalspaningsutrustning (alternativt passiv radar) används. Blå 1 och Blå 4 borde kunna ge förutsättningar för bättre störundertryckning än Blå 1 och Blå 2 om signalen kan uppfattas av Blå 4.



Figur 4. Nätverksbaserad störundertryckning mellan ett JAS (Blå 1) och en korvett (Blå 4). Syftet är att skydda det civila fartyget (Grön).

1. På samma sätt som i det första scenariet vet man att det finns en förhöjd hotbild mot Grön. Man vet att två Röda attackflygplan och två Röda jaktflygplan har gett sig av från en viss flygplats. På samma sätt som tidigare vet man ungefär när Röd kommer att närma sig Blå och Grön, samt i vilken sektor Röd kommer. Röd får information om Blå och Grön via sin STRIL.
2. Attackflygplanen flyger på betydligt lägre höjd än i Scenario 1. Här antas en flyghöjd på 3000 m. Antag att Röd jakt flyger på höjden 4000 m, och 1000 m framför Röd attack. Antag att Blå jakt också befinner sig på höjden 4000 m.
3. Blå jakt befinner sig initialt i närheten av Blå 4. Blå 3 befinner sig i närheten av Grönt fartyg. Blå jakt befinner sig för tillfället 150 – 200 km framför Grönt fartyg.
4. Röd attack försöker att i det längsta gå tyst. Röd har för avsikt att så småningom avfira robot mot Grön. Liksom i det tidigare scenariot startar Röd jakt brusstörning i ett tidigt skede för att förhindra att Blå ska kunna detektera Röd. I denna fas är syftet för Röd att med hjälp av störning skydda både Röd jakt och attack.

5. När genombrottsavståndet nås ($d = 65 \text{ km}$ mellan Blå jakt och Röd attack) inleder Röd DRFM-störning för att försvåra för Blå radar att få entydighet i avstånd.
6. Blå startar störundertryckning, i detta fall genom samverkan mellan Blå 1 (radar) och Blå 2 (ESM) och/eller Blå 4 (ESM). Geometrin kan vara sådan att det är svårt för Blå 4 att upptäcka störningen, speciellt om den enbart uppfattar störningen i sidloben. I detta fall kan enbart Blå 2 samverka med Blå 1.
7. På samma sätt som i det första scenariet så kan man med hjälp av störundertryckningen reducera antalet falska mål och Blå 1 kan under rimlig tid få entydighet i avstånd för Röd attack. Eftersom det i detta fall är större avstånd från Röd till Grön så är det mindre tidskritiskt för störundertryckningen. För Blå jakt är det dock fortfarande viktigt att hinna störundertrycka i tid för att minska riskerna för sin egen del.
8. Då Blå låser på väljer Röd att vända om, eftersom Röd fortfarande inte kan hota Grön och själv är hotad.

Det är viktigt att Blå har hunnit låsa på innan avståndet mellan Grön och Röd motsvarar räckvidden på Röds robot. Annars finns risk för att Grön kan beskjutas. Det är också fördelaktigt om Blå har hunnit få entydighet innan avståndet mellan Blå och Röd motsvarar robotens räckvidd. Även om avståndet mellan Blå 3/Grön och Röd är kortare än robotens räckvidd så finns förmodligen fortfarande goda möjligheter för Blå att hinna störundertrycka och låsa på.

I ett fortsatt arbete behöver också scenarierna vidareutvecklas för att kunna utgöra en bra grund för simuleringar. Frågor behöver utredas angående bland annat möjlig prestanda på störutrustning samt möjliga genombrottsavstånd i förhållande till möjlig räckvidd hos robot. Svaren på dessa frågor ger delvis kraven på den nätverksbaserade störundertryckningen.

3 Konceptet

3.1 Konceptbeskrivning

Konceptet innebär användning av signalspaning, plattforms/sensorsamverkan och datafusion för undertryckning av störning mot radar. I första hand är jaktflygtillämpningar i fokus, men huvuddelen av konceptet kan användas lika väl för andra tillämpningar, där andra plattformar ingår som t. ex. i scenario 2. Grundproblemet är att nosradarn på egen farkost (Blå) störs av fientlig plattform (Röd) om vilken är känt att den och eventuell följeslagare flyger mot oss och de objekt (Grön) vi har till uppgift att skydda från ett större avstånd. När Röd märker att Blå försöker mäta in Röd sätter Röd in störning, först döljande brus, senare ren vilseledning i takt med att Blå försöker låsa sin radar på Röd. Vilseledningen innebär i detta fall att Blå får en stor mängd falska målsår att hantera tillsammans med det eller de äkta målsåren. Målsättningen är i första hand att genom sensorsamverkan klassificera de målsår som radarn sätter igång som riktiga flygande mål eller som ”falska” störmål och att göra detta innan Röd kan avlossa en robot mot de farkoster Blå har till uppgift att skydda. Blå måste därmed ha förmåga till entydig positionering av Röd senast på ca. 60 km avstånd. En sekundär målsättning är att målfölja mer noggrant genom att utnyttja kompletterande information från andra Blå plattformar.

Lösningen går ut på att sensorer på en till radarplattformen ackompanjerande plattform används för att stödja radarplattformen så att inverkan av störningen elimineras, se figur 5. DRFM-störning från Röd mot Blå 1, samt eventuellt de verkliga radarekona från Röd kan uppfattas i ESM-utrustning hos Blå 2 genom att Blå 2 har kännedom om den utsända radarsignalen från Blå 1. Detta förutsätter att Blå 2 är i störsektorn och att relevanta data kommuniceras från Blå 1 till Blå 2. Kommunikationen diskuteras i kapitel 7. Det förutsätter också att ESM kan styras till att spana smalbandigt mot den relevanta signalen, samt troligen att radarantennen i Blå 2 används som mottagare. I konceptet utnyttjas enbart vinkelinformation från störplattform och verkliga mål i Blå 2, till skillnad från i [Andersson M., 2005] och i [Andersson M., 2006] där alla samverkande sensorer har avståndsinformation tillgänglig. DRFM-störningen kommer i Blå 2 att sammanfalla i vinkel med enbart de äkta radarmålen. Radarekon som inte finns på en position som motsvaras av någon vinkelmätning från ESM är störmål.

Beroende på osäkerheten i mätningarna hos både radar och ESM kan inte klassificering ske omedelbart, utan det krävs metoder för att följa målen under en viss tid och för att korrekt hantera denna osäkerhet, dvs. metoder för datafusion. De geometriska förhållandena påverkar också möjligheten att korrekt klassificera målen. Konceptet kan kompletteras med beräkning av skillnad i frekvens (FDOA) eller tid (TDOA) mellan inmätning i Blå 1 och Blå 2, se avsnitt 6. Dessa skall då stämma överens för de riktiga målen.

3.1.1 Systemkomponenter

De i konceptet ingående systemkomponenterna är:

- Nosradar hos Blå 1
- Störutrustning hos Röd
- ESM hos Blå 2
- Nosradar hos Blå 2
- Datafusionsmodul hos Blå 1
- Jaktlänk mellan Blå.

3.1.2 Gränssättande faktorer

Situationen kan variera med avseende på flera parametrar, som påverkar möjligheterna till störundertryckning.

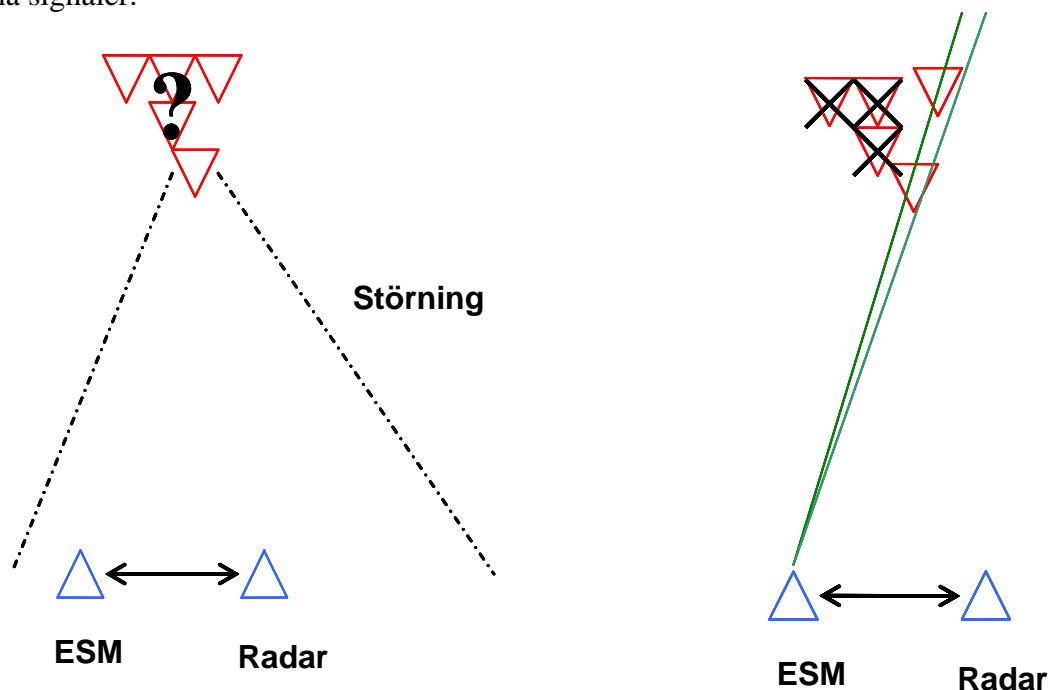
1. Tidpunkt för (eller avstånd till Blå vid) initiering av störning,
2. tidpunkt/avstånd för genombrott för Blås upptäckt av Röd,
3. tidpunkt/avstånd då Röd har möjlighet att avfyra robot,
4. den geometriska configurationen av radar, störare och stödsensor, dvs. avståndet från Röd till Blå och avståndet Blås plattformar emellan,
5. datalänkens egenskaper eller egenskaperna hos annan, vald metod för kommunikation,
6. radaregenskaper, t. ex. dess noggrannhet,
7. egenskaper för ESM, i första hand dess känslighet (mottagen effekt) och den noggrannhet varmed man kan mäta in störsändaren, men även dess förmåga att identifiera de olika DRFM-pulserna som just olika pulser eller som en enda signal, samt att möjligheten att känna igen störsignalen då dess PRI och pulslängd kan skilja sig från radarsignalen,
8. egenskaper för störsändare, i första hand dess uteffekt.

3.1.3 Avgörande frågor

För att kunna bedöma om konceptet kan realiseras måste systemkomponenterna, samt samverkan dem emellan, analyseras. Avgörande frågor är framför allt:

- Vad krävs för att Blå 2 ska uppfatta radareko och störning mot Blå 1 från Röd? Dvs.:
 - På vilket avstånd kan Blå 2 uppfatta störsignalen?
 - Måste Blå 2 använda sin radarantenn för att få tillräcklig känslighet och hur kan i så fall denna kombineras med radarvarnarens/ESMens signalbehandling?
 - Var ska Blå 2 positionera sig för att få optimalt resultat?
 - Vilken noggrannhet i bärningsbestämningen kan uppnås i ESM?
 - Kan Blå 2 särskilja de olika repetersändningarna från varandra?
- Hur kan Blå 2 få tillräcklig kännedom om radarsignalen från Blå 1? Dvs.:
 - Vad måste Blå 2 veta om signalen för att signalen ska kunna upptäckas i tid?
 - Vilket sätt att kommunicera signalen är det bästa?
 - Vilka krav ställer detta på kommunikationsutrustningen, t. ex. jaktlänken?
 - Hur påverkar det om radarsignalen bara är delvis känd?
- Om radarantennen måste användas: Hur kan motagningen av störning och radareko från Röd koordineras med andra uppgifter som måste utföras?

Först när dessa frågor fått ett nöjaktigt svar lönar det sig att gå vidare med en förfinad analys av mottagna signaler.



Figur 5. Konceptbeskrivning.

4 Teknisk bakgrund

4.1 Störning

4.1.1 Störformer

Syftet med att störa en motståndare är att reducera dess prestanda så mycket att inte dess vapensystem får avsedd verkan. Det är viktigt att störningen sätts in så tidigt som möjligt i händelsekedjan, så att inte motståndaren kan skicka iväg sin robot. Ju tidigare störning kan sättas in desto enklare är det att förneka motståndaren informationsöverläge.

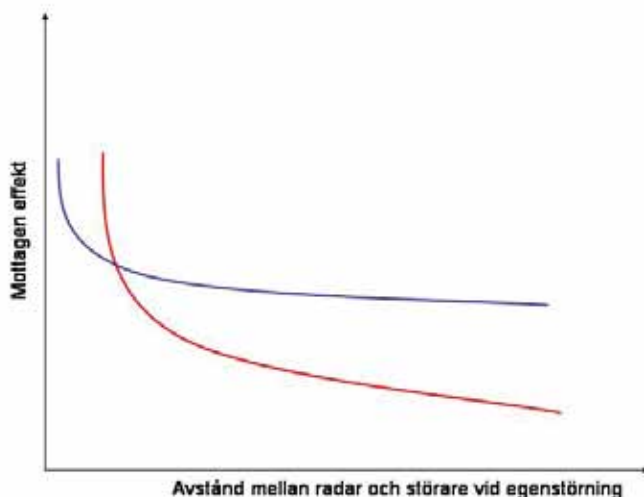
Vid störning av en radarsensor är det olika faktorer som påverkar hur resultatet blir. Dessa är t ex radarns effekt (P_r), radarns antennförstärkning (G_r), störarens effekt (P_j), störarens antennförstärkning (G_j) samt avståndet (R_m) till målet. Störningens påverkan kommer därför att vara olika vid olika fall. Vid egenstörning, som innebär att störsändaren är placerad på målet, gäller för stör-signalförhållandet J/S följande ekvation:

$$(1) \quad \frac{J}{S} = \frac{P_j \cdot G_j \cdot 4\pi \cdot (R_m)^2 \cdot \frac{B_{mf}}{B_j}}{P_r \cdot G_r \cdot \sigma}$$

Där:

- P_r = Radarns effekt
- G_r = Radarns antennförstärkning
- σ = Målarea
- B_j = Störsändarens bandbredd
- P_j = Störsändarens effekt
- G_j = störsändarens antennförstärkning
- B_{mf} = Radarns MF-bandbredd
- R_m = Målavstånd

Figur 6 visar den mottagna effekten från störsignal (blå linje) respektive måleko (röd linje) som funktion av avståndet mellan radar och störsändaren vid egenstörning.



Figur 6. Mottagen effekt från måleko (röd) och störsignal (blå) i förhållande till avståndet mellan störare och radar vid egenstörning. Genombrottsavståndet beskrivs av den punkt där kurvorna skär varandra. I den punkten är de båda signalerna lika starka.

Den punkt där de båda kurvorna skär varandra beskriver det s. k. genombrottsavståndet. I den punkten är signalen för mottagen effekt från måleko (S) lika stark som signalen för mottagen

effekt från störsignalen (J), dvs. $J/S = 1$ (ekvation 1). Till vänster om denna punkt är mottagen effekt från målekt större än mottagen effekt från störsändaren, vilket betyder att det verkliga målet tydligt kommer att synas på radarskärmen och störningen kommer inte längre att ha samma verkan. Detta genombrottsavstånd kan också ses som ett mått på radarns räckvidd vid störning.

Störning kan vara till exempel maskerande (t. ex. brus), vilseledande (t. ex. avståndsavhakning) eller mättande (t. ex. många falska mål).

Maskerande störning

Den enklaste formen av maskerande störning är brus. Vid brusstörsändning genereras en förhöjd brusnivå på radarmottagarens ingång. Detta påverkar effektförhållandet enligt ekvation 1. Vid tillräckligt hög brusnivå överröstar brussignalen ekosignalen, och det verkliga målet kan inte detekteras.

Mättande störning

Mättande störning fås genom att generera ett stort antal falska mål. På så sätt blir det svårt eller omöjligt att upptäcka det verkliga målet. Mättande störning kan också orsaka signalbehandlingsmättning. Ett stort antal falska mål leder till att signalbehandlingen kan ta avsevärt mycket längre tid, vilket ger motståndaren ett tidsmässigt försprång. Det är detta som är tänkt att Röd utnyttjar på Blå i scenarierna 1 och 2. Mättande störning åstadkoms med DRFM-teknik. DRFM skapar signallika falska mål, vilka är svåra att skilja från verkliga mål, både för radarsystemet och för operatören.

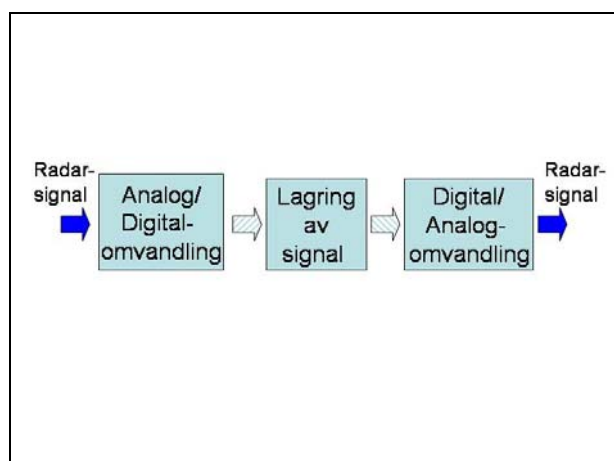
Vilseledande störning

Vid vilseledande störning skapar man falska mål som uppträder likt verkliga mål även i form av rörelse. Man kan t ex efterlikna ett flygföretag som rör sig i en viss riktning. Vilseledande störning kan också var avhakning i de dimensioner som radarn skall mäta. Vilseledande störning kan också åstadkommas med DRFM-teknik.

4.1.2 DRFM – Digitalt RadioFrekvent Minne

Ett DRFM kan spela in och lagra en radarpuls godtyckligt länge utan att den degraderas eller påverkas av lagringstiden på något negativt sätt. Ett DRFM återskapar en kopia av ursprungssignalen. Även komplexa radarpulser med modulation på pulsen kan hanteras med denna teknik, då pulsen i dess helhet med modulation lagras och återskapas.

Ett DRFM är uppbyggt i stora drag som Figur 7 visar. Den analoga RF-signalen, radarpulsen, digitaliseras av en A/D-omvandlare. Den digitala signalen lagras sedan i ett minne. Vid utläsning av den lagrade signalen från minnet, omvandlas den digitala signalen till en analog signal i en D/A-omvandlare..



Figur 7. Principiell bild av uppbyggnaden av ett DRFM.

4.1.3 Störtaktik

Störaktiviteten kan, utifrån den taktiska situationen, karakteriseras med följande störtaktiker:

- Egenstörning - störutrustningen placerad på den plattform som ska skyddas
- Medstörning - den störande plattformen befinner sig i närheten av den plattform som ska skyddas
- Bakgrundsstörning – den störande plattformen befinner sig på ett större avstånd från den plattform som ska skyddas
- Förgrundsstörning - störsändaren placerad nära den radar som ska störas

I de två scenarierna som beskrivs i rapporten antas att motståndaren använder egenstörning och medstörning.

4.2 Signalspaningssensorer och dess räckvidd

I detta avsnitt ges en allmän och översiktlig beskrivning av signalspaningssensorers egenskaper och, framför allt, hur räckvidden kan skattas vid signalspaning [Bergdahl H., 1994]. Avsnittet beskriver de grundläggande faktorerna som påverkar räckvidden.

De signaler som tas emot i ESM kan ha flera källor. Direkt inkommande radarsignaler och störsignaler, radarsignaler som reflekteras från störplattform eller andra plattformar och andra ytor, samt störsignaler som reflekteras. Den spaning som ESM kan göra delas upp i tre delmoment: detektion, separation och analys. Detektionsmöjligheten beror på effekttäthet vid ESM. Separation handlar om sensorns förmåga att kunna separera olika inkommande signaler. Analysen handlar om att analysera och känna igen olika signaler samt eventuellt vidta lämpliga motåtgärder. De analysmetoder som står till buds är:

- Analys i tidsdomänen, vilket ger en avståndsuppskattning.
- Analys i dopplerdomänen, vilket ger en hastighetsuppskattning.
- Analys i vinkeldomänen.

Störningen kan också analyseras med avseende på modulationen hos den inkommande signalen. För denna analys hänvisas till [Andersson B., 2004].

Den signal som mottas av ESM sänds av radarn i flera pulståg, se kap. 4.3. I varje pulståg finns normalt 100-500 enskilda pulser. Parametrarna bärfrekvens, PRF, bäring, pulslängd, pulskompression och amplitud konstituerar en vågform hos ett pulståg. Själva mättpunkten tillkommer dessutom som parameter. Alla parametrar utom bäring (och mätpunkt) kallas signalparametrar. Vågformen hos två pulståg som emitteras från samma emitter varierar över tiden.

I den tillämpning som diskuteras i rapporten finns en faktor som påverkar analysen. Den intressanta signalen kommer inte direkt från sändarsystemet, utan utgörs av ett eko. Signalen går därmed dubbelt så långt som vid konventionell signalspaning. Det leder till att styrkan hos signalen kommer att vara svagare än om den hade gått direkt från sändare till mottagare. Utifrån det eko, som representerar störsändaren, genereras falska mål i en DRFM-störsändare med liknande eller större signalstyrka som ekot. Störsignalen får inte ha en alltför stor signalstyrka i förhållande till det verkliga ekots, eftersom detta kan avslöja signalen som störning. Även andra mål som döljer sig bland de falska målen har i så fall ungefär samma storleksordning på signalstyrkan som de falska målen och ekot från störplattformen.

För att detektera dessa mål kan eventuellt radarantennens mottagardel användas, s. k. passiv radar. Då används radarvarnarens signalbehandling och dess förmåga till detaljerad frekvensanalys kombinerat med radarns större antenn.

4.2.1 ESM-egenskaper

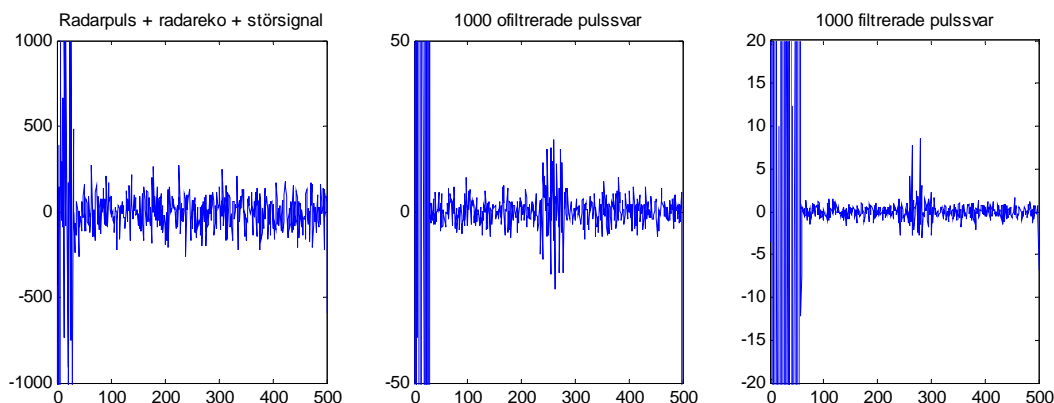
Signalspaning går ut på att fånga upp signaler med okänd frekvens inom ett brett intervall av frekvenser. Även mycket svaga signaler (t. o. m. under brusnivå) kan fångas upp. För detta krävs signalbehandling som med en snabb A/D omvandlare tar hand om en från början analog antensignal och gör om den till digital information. Sedan utvinns sändningarnas frekvens, start- och sluttider, vilket är nödvändigt för att fånga upp frekvenshoppande radaremittrar.

Jämfört med signaler från en radaremitter är det betydligt svårare för ESMen att detektera den mycket svagare signalen från en störsändare eller det svaga radarekot från störsändarplattformen. ESMens detektionsförmåga beror på signalens effekttäthet vid ESMen. Radarns effekt i huvudloben är flera magnituder större än störarens. Även sidolobeffekten från radarn har högre signalstyrka än störaren; hos en nosradar av storleksordningen 30–40 dB. Signalstyrkan hos radarekot minskar dock med R4 (R2 fram, R2 åter) men från störaren bara med R2.

ESMen kan nå samma signalbehandlingsvinst som radarn om vågformen är känd. När störaren repeterar störningen kan ESMen använda radarsignalen för att skapa ett så kallat matchat filter som förbättrar möjligheterna att detektera störsignalen och det riktiga ekot förutsatt att signalerna återkommer med samma fördröjning och frekvensinnehåll. I annat fall krävs en betydligt mer tidskrävande korrelationsmetod. Filterkärnan centreras på första bästa radarpuls RP1 (direkt från radarns sidolob; radarekot från störplattformen vore för svagt) varefter filtreringen sker på successivt kommande pulssvar PS med Matlabs filterfunktion enligt ekv. (2)

$$(2) \quad PS1 = \text{filter}(RP1,1,PS).$$

Figur 8 visar i vänster bild direkt radarpuls (element 1-30 med konstant, normalfördelad modulation och medelamplitud 1000), radareko (element 235-264, medelamplitud 10), lika stark repeterad störsignal (element 250-279 med endast 15 element tidsseparation till radarekot) och normalfördelat brus (medelamplitud 100). Mittbilden visar 2 dB förhöjd nivå av radareko och störsignal över bruset efter enbart integration av 1000 pulssvar. Den högra bilden visar 10 dB nivåhöjning efter både matchat filter och integration. Notera att endast det matchade filtret ger två tydliga signaltoppar, åtskilda med 15 enheter.



Figur 8. Alla bilder: direkt radarpuls (vänster bildkant), radareko (vänster del av signalpaket i mitten), störsignal (höger del av signalpaket mitten) samt gaussiskt brus med resp. amplituder 1000, 10, 10 och 100. Vänster bild: ett pulssvar. Mittbild: medelvärde av 1000 pulssvar. Höger bild: medelvärde av 1000 filtrerade pulssvar. Observera att bilderna har olika skalor.

4.2.2 Räckvidd för signalspaning

Generellt gäller att räckvidden vid signalspaning är en samverkan mellan det egna signalspaningssystemet, den aktuella motståndarens sändarsystem, vågutbredningen samt omgivande signalmiljö.

Sändarsystemet motsvaras i denna tillämpning av först och främst av radarsystemet hos den egna plattformen samt motståndarens störningssystem. Resultatet av motståndarens störning, vilket är det intressanta i denna tillämpning, beror delvis av den egna plattformens radaranvändning. Dessa två sändarsystem är därför de viktigaste i detta fall. Utgångspunkten i denna tillämpning är istället att motståndaren endast använder sin störutrustning, samtidigt som en av de egna plattformarna använder sin radar.

Sändarsystemet

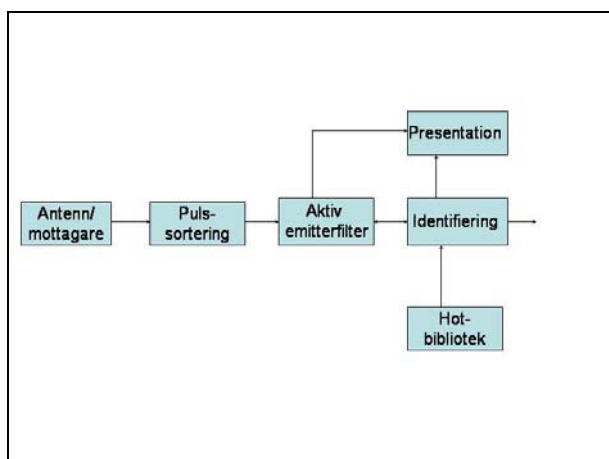
Huvudkomponenterna hos sändarsystemet är sändaren och sändarantennen. En viktig egenskap hos sändaren är dess uteffekt, P_s . Den mest intressanta egenskapen hos sändarantennen är dess sätt att fördela utsänd effekt i olika riktningar. En viktig egenskap hos denna strålningsfunktion är antennvinsten G_s .

Produkten av den effekt som tillförs antennen och dess vinst i en viss riktning benämns ERP (Effective Radiated Power), dvs.

$$(3) \quad ERP = P_s \times G_s .$$

Signalspaningssystemet

Signalspaningssystemet består av ett antal olika steg från och med antennen till och med identifiering av mål. I mottagaren mäts olika parametrar hos radarpulsen. Mätvärdena sammanställs till en s. k. pulsdeskriptor. Pulsdeskriptorerna lagras i tidsordning. I nästa steg sker en pulssortering. Där sorteras pulsdeskriptorerna efter de emitterar som observeras. Resultatet av pulssorteringen är en aktiv emitterfil. Den aktiva emitterfilen utgör grunden för den fortsatta signalbehandlingen, t ex klassificering med hjälp av hotbiblioteket. Proceduren vid automatisk radarsignalspaning beskrivs i Figur 9.



Figur 9. Principen för automatisk radarsignalspaning och radarvarning.

Signalspaningssystemet karakteriseras av sin systemkänslighet S_s , vilken är den effekttäthet som krävs för att aktuellt känslighetskriterium ska uppfyllas. Systemkänsligheten beräknas med följande formel:

$$(4) \quad S_s = \frac{S_m}{G_m} [\text{mW/m}^2]$$

där

S_m = ESM-mottagarens känslighet

G_m = ESM-antennens antennvinst i en viss riktning

G_m beskriver strålningsfunktionen hos antennen, dvs. antennens sätt att omvandla elektromagnetiska vågor från olika riktningar till signaler för mottagaren. S_m beskriver hur stor signal som krävs på mottagaringången för att aktuellt känslighetskriterium (t ex minsta signal/brus-förhållande, S/N) ska uppfyllas. S_m beskrivs med följande ekvation:

$$(5) \quad S_m = P_N \times F \times \frac{S}{N},$$

där

P_N = termisk bruseffekt

F = brusfaktor

S/N = signal/brusförhållande (SNR)

För att uppskatta räckvidden för signalspaningssystemet så kan ERP hos sändarsystemet, utbredningsdämpningen (på grund av vågutbredningen) och signalspaningssystemets systemkänslighet utnyttjas. En beräkningsmetodik för detta beskrivs i avsnitt 4.2.5.

4.2.3 Krav för upptäckt av signal

Två förutsättningar för upptäckt av ett mål är om målet ligger i sökområdet i vinkel och frekvens och den mottagna effekttätheten överstiger mottagarens signaltröskel. Dessa två krav är till sin natur motstridiga så till vida att ett större momentant sökområde ställer större krav på mottagarens känslighet i varje del av sökområdet. Tröskelnivån bestäms som en kompromiss som ger tillräcklig hög sannolikhet för detektion utan att öka falsklarmsrisken onödigt mycket. I princip räcker det med en enstaka puls för att upptäcka ett mål, men det krävs flera pulser för att känna igen och klassificera signalen. För konceptet i denna rapport räcker det dock troligen inte med enstaka pulser; upp emot tusen samhörande pulser behöva adderas för att på så sätt höja en integrerad signal över brusnivån.

Signalbrusförhållandet (SNR) måste räcka till för upptäckt, separation och klassificering av olika signaler i respektive radar- och ESM-sensorer. Mottagen signalstyrka är en funktion av radarns uteffekt och störplattformens radarmålarea, eftersom störarens uteffekt måste vara lika den verkliga signalens effekt för att kunna vilseleda radarn. Beträffande störsignalen räknar man med att J/S är stor på längre avstånd, för att på kortare avstånd, vid vilseledning, anpassa sin signal till den egna radarsignaturen i syfte att maximalt förvilla Blå, se sektion 4.1 och Figur 6. Det är mycket svårt att få tag på absoluta effekttal och känsligheter i öppen litteratur, varför dessa måste fastställas i en fortsatt studie. Därmed återstår endast ungefärliga upptäckts- och genombrottsavstånd, diskuterade i scenarierna. Mycket är vunnet om både störsignalen och radarsignalens reflektion i störplattformen är observerbar av ESM. Tillgång till endast två inmätande plattformar i scenario 1 undantar användningen av bra metoder för positionering som kräver minst tre inmätare. Möjligheterna ökar i scenario 2, givet att flera av plattformarna kan uppfatta signalen.

En stor svårighet ligger i att detektera, särskilja och klassificera svaga signaler. Vanliga metoder går ut på att integrera och korrelera tusentals pulser i takt med radarns PRF, med eller utan matchat filter, se kapitel 4.2.1, för att därigenom lyfta upp intressanta signaler som annars är dränkta i bakgrundsbrus. För att få rimlig respons måste ett stort antal pulser integreras och korreleras inom ett givet tidsintervall.

SNR påverkar det avstånd på vilket det är möjligt att upptäcka signalen och därmed den tid datafusionsmodulen har på sig att klassificera och lägesbestämma de riktiga målen. Något om SNR inverkan på lägesbestämning av en markbaserad emitter med en passiv, frekvensmätande

sensor på en manövrerande plattform beskrivs i [Andersson B., 2001]. Rapportens undersöker bl. a. medelfelet i avstånd som en funktion av SNR för olika egenmanövrer i en testbänk. I vårt fall rör sig både emitter och egen plattform. Klart är dock att medelavståndsfelet lätt kan ändra sig med en faktor 10 vid rakbana om SNR ändrar sig med 20 dB, vilket ändrat upptäcktsavstånd från 200 till 60 km.

Dessutom påverkar de geometriska förhållandena mellan de aktuella plattformarna. I första hand är det avståndet mellan Röd och Blå som påverkar, men även avståndet Blå rote emellan. Ju närmare Blå 2 är Blå 1, desto högre mottagen effekt mottas av Blå 2, eftersom störningen är riktad mot Blå 1 och effekten avtar med vinkeln från störare till mottagare. Då möjligheten att avgöra vilket av de mottagna ekona som motsvarar de riktiga målen tvärtom ökar med ökat avstånd mellan plattformarna, innebär detta att det går att hitta ett optimalt avstånd mellan Blå för att utföra störundertryckning. Slutligen ökar upptäcktsavståndet också med ökad flyghöjd.

En SIS får mycket svårt att detektera relevanta signaler och ännu svårare att analysera deras innehåll på de avstånd som är aktuella i dessa scenarier. Enligt diskussioner med experter på telekrig inom FOI är det troligt att nosradarantennen på Blå 2 måste användas för att få tillräcklig känslighet för att uppfatta störare och radarekon. Denna antenn måste kombineras med SISens elektronik för signalanalys. Standardantennerna för SIS är tillräckliga för att mäta i en radarsignal som har gått från motståndarens radar till egen SIS, men inte signaler som har gått dubbla den sträckan. Utan närmare uppgifter om radareffekt och antennkänsligheter kan det dock inte göras helt klart vilken antenn som krävs. Detta måste analyseras och bedömas i fortsatta studier.

I scenario 2 finns en situation där störningen också är till för att dölja en annan plattform, med uppdrag att utföra en attack mot ett fartyg Blå ska skydda. Möjligheterna till att kunna positionera och målfölja ett medföljande flygplan måste då också undersökas. Detta kräver att ESM kan hitta ekot också från denna plattform. En sensor som kan detektera signalen från störaren kan eventuellt också hitta detta eko eftersom störarens i repetermode utsända effekt inte bör vara väsentligt större än den som borde reflekteras för störplattformen. Om signalen är alltför hög kan detta avslöja signalen som störning. Vi förutsätter då att störningen är till för att dölja både egen och medföljande plattformar. Ännu svagare signaler kan bara uppfattas av en s. k. passiv radar, i detta fall nosradarns antenn i kombination med SISens signalutrustning, förutsatt att antennloben är väl inriktad.

Förutom att effekter och avstånd måste vara gynnsamma, så är det en fördel om ESM känner till så mycket om den utsända radarsignalen som möjligt om signalen ska kunna upptäckas och analyseras snabbt. Det är också fördelaktigt om ESM-sensorn vet ungefär när radarekot bör nå sensorn. Detta gäller speciellt om radarantennen hos Blå 2 måste användas. I scenario 1 och 2 används inte radar hos Blå 2 mot Röd. I det fall denna radar används till någon annan uppgift, t. ex. att söka efter nya mål i en annan riktning, måste tiden delas mellan denna uppgift och att fungera som en antenn för ESM. Radarantennen hos Blå 2 måste användas till ESM under hela den tid som det är möjligt att de äkta radarekona mottas.

4.2.4 Skattning av räckvidden vid signalspaning

Skattning av räckvidden kan göras t. ex. enligt följande procedur [Bergdahl H. del 1, 1999]:

Sändarsidan

1. Beräkna sändarsidans, ERP-värde (ekvation 3)
2. Beräkna aktuell utbredningsdämpning, enligt någon modell [Bergdahl H. del 2, 1999]
3. Beräkna effekttätheten vid mottagningsplatsen (beräknas som skillnaden mellan utbredningsdämpningen och ERP-värdet)

Mottagarsidan

1. Beräkna mottagarsidans känslighet, S_m
2. Beräkna ESMens systemkänslighet, S_s

Skattning av räckvidd

Effekttätheten på mottagningsplatsen jämförs med S_s . Om effekttätheten $> S_s \rightarrow$ signalen detekteras i signalspaningssystemet. Om effekttätheten $< S_s \rightarrow$ signalen kan inte detekteras i signalspaningssystemet.

Metoden kan användas för att skatta hur väl ESM-utrustningen kan observera de falska målen, vilka ligger till grund för störundertryckningen.

4.3 Radar

Egna plattformar förutsätts besitta en multifunktions-, fasstyrd siktesradar (nosradar). Denna radar kännetecknas av låga sidolober, lobbredd ca 3° och bärfrekvens 9-10 GHz, med möjlighet att arbeta i olika pulsfrekvensmoder. Systemet skall uppfylla krav på förmåga att både detektera, mäta in och följa snabba, manövrerande mål. Avsökningen i bäring sker mekaniskt i form av sektorsökning på olika nivåer i elevation. Räckvidden mot andra jaktplan är 100-150 km beroende på mod. Radarmoden antas vara endera av ett flertal olika slag med olika funktioner och som används i olika uppdragsfaser. T. ex. finns

- HPRF-mod också kallad velocity-search-mod
- TWS (Track While Scan) också kallad FUS (Följning Under Sökning); här finns många undermoder såsom long-distance search, self protect search,
- PRIF (Prioriterad Följning)

Varje mod kännetecknas av en lobstrategi, vilken motsvarar en speciell sekvens av växlingar av loblägen. Varje sådant lobläge kännetecknas av emission och mottagning av pulser i ett eller flera pulståg. Ett pulståg utgörs vanligen av 100-500 pulser, men kan i vissa fall bara bestå av en enstaka puls. Varje pulståg karaktäriseras av konstanta värden på ett antal radarparametrar såsom bärfrekvens, PRF (pulsrepetitionsfrekvens), lobriktning, pulslängd, pulskompression och amplitud. Två på varandra följande pulståg inom samma lobläge skiljer sig vanligen åt åtminstone beträffande PRF; denna variation motiveras av behovet att göra avståndsupplösning av mål. Vanligen används samma sekvens av pulståg i alla lobriktningar inom modens arbetsområde. Hur parametervärdena varierar i sådana pulstågssekvenser finns inga möjligheter att på förväg känna till för en utomstående betraktare; enda sättet att få kunskap om dem är att lyssna och spara information om de individuella parametrarna i dem för framtida bruk. Om två lyssnare har samma information om en pulstågssekvens, så är sannolikheten stor för att de härrör från samma källa. Strategier med flera pulståg används dock bara i vissa situationer.

För att tillåta olika plattformar i samma förband att samtidigt använda sin radar kan olika strategier tillämpas för att förhindra att de stör varandra. En sådan strategi är att inför varje flyguppdag tilldela varje radar ett antal fördefinierade arbetsmoder, inklusive bärfrekvenser, som den kan växla mellan. Dessa frekvenser kan blandas för olika radar i förbandet.

5 Datafusion

I aktuella scenarier saknas tillräcklig information från *en* sensor för att säkerställa måltyp eller läge. Utvunna särdrag och positioner avslöjar en begränsad del av situationsbilden. Informationen är också förvanskad; om allt skedde utan störning vore saken enkel. Idealt borde mätdata vara försedda med konfidensmått som talade om tillståndet hos sensor och omgivning (naturlig eller artificiell störning i form av klotter eller vilseledning). Endast då kunde man någorlunda säkert dra vidare slutsatser om osäkerhet i data och, slutligen, uppskatta sannolikheten för att ha sett rätt mål på rätt plats. I praktiken måste vi förlita oss på en viss redundansverkan hos flera oberoende sensorer. Nödvändig kompletterande information måste till slut sökas hos befintliga andra sensorer. Sammanlagringen av denna information via sensordata kallas *datafusion*.

5.1 Positionering

Ett problem är att både störplattform och egna plattformar rör sig. Detta gör att mätningar från olika plattformar som skiljer sig åt i tiden, praktiskt taget aldrig är från exakt samma målposition. Lösningen på detta är att använda fusionsmetoder hämtade från målföljningsområdet. Genom sådana metoder kan man sammanställa osäker, partiell information om ett måls position från flera sensorer och från olika tidpunkter. Området innehåller många kända metoder som på ett korrekt sätt kan hantera både osäkerheter i sensordata och osäkerheter i egna och andras rörelser. Genom att kombinera flera mätningar i en tidsserie blir resultatet också mer robust mot t. ex. vilseledande störning (svårt att vilseleda på samma sätt i längden).

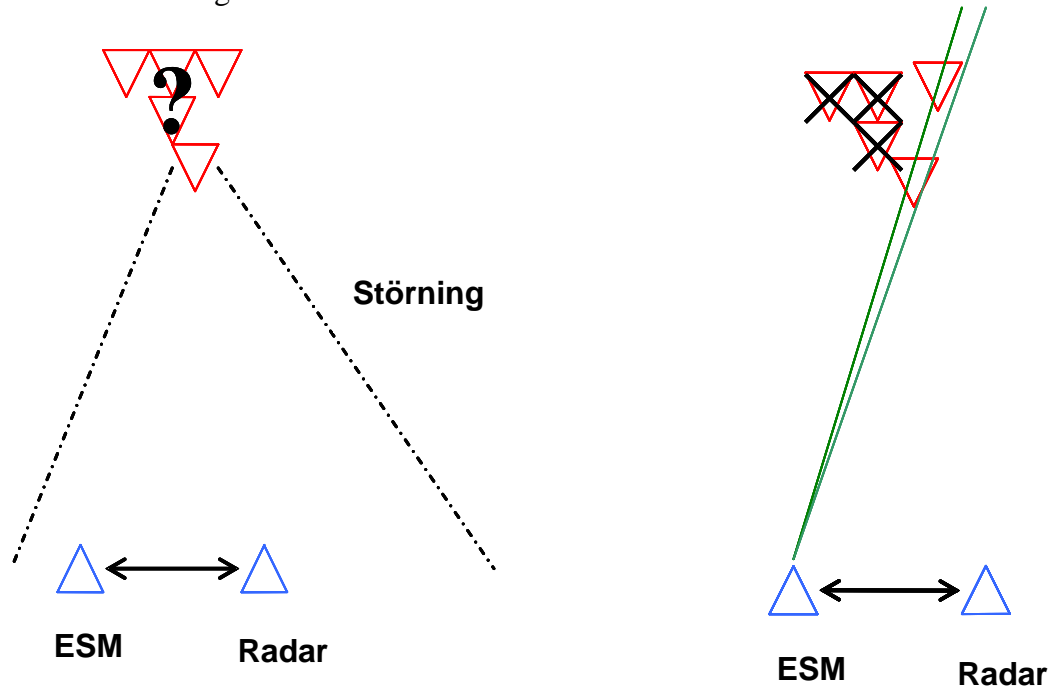
En vanlig metod för att göra målföljning är att använda ett s. k. Kalman filter. Denna metod är optimal givet att datas osäkerheter är normalfördelade omkring målets position. I de fall då osäkerheten om målets position ser radikalt annorlunda ut måste metoden kompletteras eller bytas ut. Ett sätt att komplettera metoden är genom att beskriva den totala osäkerheten genom en viktad kombination av flera, parallella Kalman Filter som representerar olika hypoteser om målets position. På detta sätt kan ett mer generellt antagande om osäkerheten representeras, se t. ex. [Strömberg D., 2005]. En mer generell fusionsmetod för att representera osäkerhet i målposition är att använda ett s.k. Partikel Filter [Doucet A., 2001]. Detta är lämpligt att använda då osäkerheterna är mycket dåligt approximerade av en normalfördelning. En undersökning av denna metod i en liknande tillämpning har skett i t. ex. [Mikhalev A., 2007] där en jämförelse med en metod baserad på Houghtransformen är gjord. Metoden baserad på Houghtransformen beskrivs också i [Mikhalev A., 2006]. Alla de metoder som räknas upp här kan användas för att lösa problem med olika mättidpunkter för sensorer på olika plattformar, för att ta hänsyn till information som bara är partiell (man känner bara en vinkel, men vill ha positionen). Metoderna är dessutom generella på så sätt att annan typ av osäker information relativt lätt kan tas om hand utan att grundmetoden måste ändras.

I kapitel 6 om mätmöjligheter räknas upp ett antal olika metoder som syftar till rikttningsbestämning (AOA) och positionering (TDOA, FDOA) inom mer eller mindre vida gränser. Bortsett från rikttningsbestämning med enskild radar, förutsätter de flesta metoderna samverkan mellan sensorer på olika plattformar, dvs. datafusion. För att smala in osäkerhetsgränserna måste dessutom resultatet från enskilda metoder fusioneras, t. ex. TDOA och FDOA. Återstående mångtydighet i position kan sedan avgöras genom en rikttningsmätning, AOA. Lämpliga metoder för att hantera kombinationer av AOA, FDOA och TDOA är de fusionsmetoder som nämns ovan.

5.2 Klassificering

För att utföra klassificering av målen som ”falska” mål (störmål) eller ”verkliga” mål kan flera metoder användas. Klassificeringen bygger i första hand på att de falska målen hos radarplattformen inte motsvaras av någon bäringsmätning från ESM-plattformen. Den enklaste metoden för att klassificera målen är att utnyttja detta faktum direkt och ha en regel som klassificerar de mål som har en för stor vinkelseparation mellan sig och en ESM-mätning, sedd

från ESM-plattformen, som falska. Detta kan avgöras i en associationsprocess, som är ännu en känd datafusionsmetod. Då data är osäkra och det dessutom kan vara långt till målen inträffar dock fel i associationsprocessen. Vissa falska mål kan associeras med en ESM-mätning samtidigt som inte alla äkta mål blir associerade med en ESM-mätning. Man måste därför vänta ett visst tidsintervall och sedan enbart klassificera de mål som inte har associerats med någon ESM-mätning under hela tidsintervallet som falska. Enkla simuleringar som utförts tyder på att en sådan metod kan vara tillräcklig.



Figur 10. Genom att fusionera bäringsinformation från signalspaningsutrustning med radarns målspar kan vissa falska målspar uteslutas. Efter en viss tid kan alla falska mål uteslutas.

Den metod som beskrivs ovan kan modifieras och förbättras i det fall den visar sig otillräcklig. Det är t. ex. troligt att valet av ett optimalt tidsintervall påverkas av den aktuella geometrin. Det är dessutom inte klart hur metoden fungerar om man använder vinkelinformationen i ESM-mätningarna för att uppdatera målsparerna och därmed få en bättre positionsuppskattning. Metoden ovan kan enkelt formuleras i en sannolikheteoretisk (Bayesiansk) modell. För att detta ska ge något mervärde måste man med viss noggrannhet veta sannolikheten att en ESM-mätning associeras eller inte associeras med ett mål, givet att det är falskt och givet att det är verkligt. Dessa sannolikheter bör bero på vinkelavståndet mellan målet och ESM-observationerna. En sannolikheteoretisk baserad metod har större potential än en regelbaserad, då den ger möjlighet till inlärning av sannolikheter genom experiment.

6 Mätmöjligheter

Utgående från geometri, rörelsemönster och sensoregenskaper föreligger ett antal mätmetoder med olika potential till lägesbestämning. Genom en lämplig kombination av dessa metoder önskar man bestämma målets position med minsta möjliga fel, i förlängningen ledande till en fullständig målföljning. Eftersom alla plattformar rör sig, även störsändaren, är en ledande princip att mäta under korta tidsintervall för att minimera inverkan av lägesförändringar. Frekvensskillnadsmätning (FDOA) kvarstår som eget problem då den bl. a. är en funktion av just hastighetsskillnaden. I detta kapitel behandlas frågeställningar av allmän karaktär, som inte nödvändigtvis är knutna till det koncept som presenteras i rapporten. Kombinationer av dessa mätmetoder för positionering är relevant i första hand för spaning mot aktiv radar, men kan eventuellt ge bidrag även för konceptet i denna rapport.

6.1 Riktningmätning: AOA

Riktningmätning (AOA = Angle Of Arrival) baseras på vinkelmätningar (bäring, elevation) mot en referens. Radarns förmåga att mäta bäring till målet beror på vilken typ av störning som föreligger. Noggrannheten vid dessa mätningar, diskuteras i [Henriksson D., 2005, ekv. 6]. Grovt räknat används tre olika metoder för riktningbestämning [Andersson B., 2002, sektion 6.1]:

1. *Lobmaxpejling*. Vanlig hos spaningsradar. Kräver rörlig lob med riktverkan. Säkerställer via sidolobsmätning att huvudloben används. Avsökningen tar tid för att få vinkeltäckning. Vinkelnoggrannhet 1-5° med 1° hos nosradar som dessutom har snabbast inmätningstid.
2. *Amplitudmonopuls*. Vanlig hos flygburna radarvarnare. Hos en SIS används normalt 4 antenner med de ca 90° breda huvudloberna. Infallsriktningen erhålls genom inbördes jämförelse av signalstyrkan. Relativt låg vinkelnoggrannhet, ca. 10°, men inmätningen sker momentant.
3. *Interferometri* (fasmonopuls). Bygger på att den resulterande fasskillnaden mellan två antenner beror på infallsriktningen. Potential till mycket hög vinkelnoggrannhet momentant, bättre än 1°. För entydighet krävs att antennavståndet mellan två antenner understiger halva våglängden för den högst tänkbara frekvensen samt att åtminstone tre antenner deltar för att få en 2-D riktningmätning. Till exempel har ett JAS-plan varnarantennerna på vingspetsarna med 8,4 m inbördes avstånd.

Metod 3 kräver en gynnsam geometri för bästa vinkelnoggrannhet, samt speciellt anpassade antenner. Metod 2 bygger på att ESMen har tillräcklig känslighet för ett troligen lågt SNR. Då endast metod 1, lobmaxpejling, kan användas i samband med att nosradarantennen används är denna metod den enda möjliga för vårt scenario.

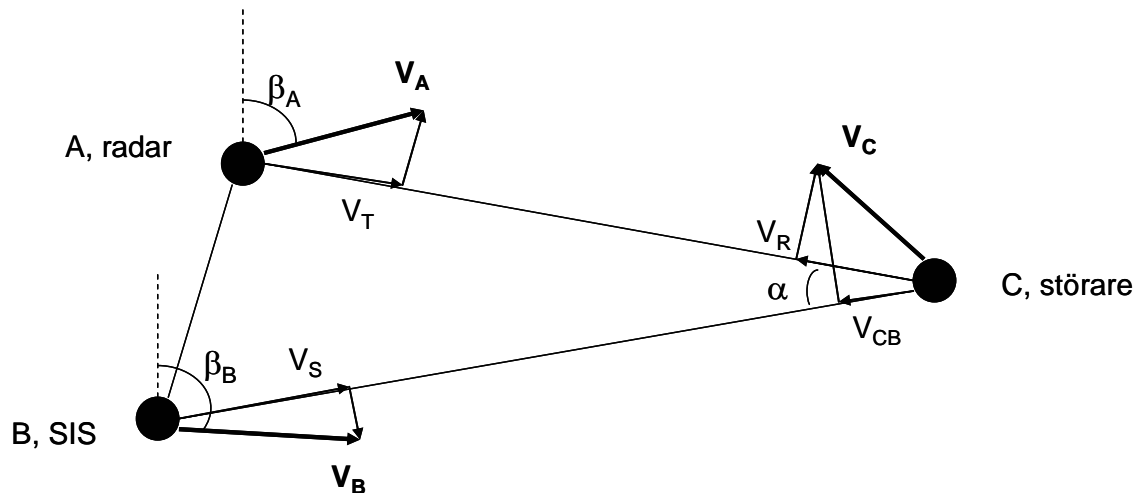
Om bäringsmätning är möjlig ges positionen genom krysspejling, se Figur 11. Låt β_A och β_B vara (de uppmätta) bäringarna från A respektive B till målet C. Bäringsen är vinkeln mellan Norr och riktningen till målet. Låt vidare radarns och SISens (alternativt passiv radar) rektangulära koordinater vid mättillfället vara (x_A, y_A) resp (x_B, y_B) . Synvinkelskillnaden α mot C blir då

$$(6) \quad \alpha = |\beta_A - \beta_B|.$$

Koordinaterna (x_C, y_C) för störaren beräknas ur

$$(7) \quad x_C = (y_B - y_A + x_A / \tan \beta_A - x_B / \tan \beta_B) / (\cot \beta_A - \cot \beta_B),$$

$$(8) \quad y_C = y_A - (x_C - x_A) / \tan \beta_A.$$



Figur 11. Geometri och rörelsekomponenter för egna plattformar (A, B) och störare (C).

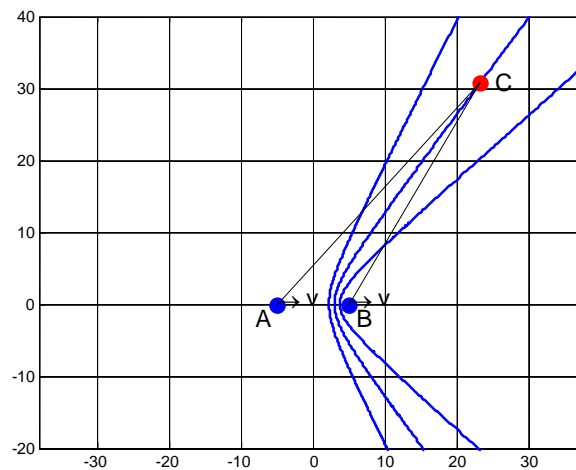
Noggrannheten vid denna triangulering (AOA - AOA) beror på linjebredd och skärningsvinklar, vilka i sin tur beror på geometrin [Henriksson D., 2005, sektion 5.1] och noggrannheten i vinkelmätningen.

6.2 Avståndsmätning: TDOA

Tidsskillnadsmätning (TDOA = Time Difference Of Arrival) används av radarsignalspaning för lägesbestämning av främst luftmål från markfasta system då detta inte ställer krav på samtidiga mätningar. Då mätplattformen är rörlig måste målen mätas in praktiskt taget samtidigt från olika plattformar för att minimera inverkan av lägesförändring. Lägesbestämning som baseras på enbart TDOA behöver minst tre separerade inmätningseenheter. Ett sätt att erhålla tidsskillnad är att mäta den absoluta ankomsttiden av pulsens framkant vid respektive plattform. Detta kan dock vara svårt om signalen har en hög PRF. Ett annat sätt är att direkt mäta skillnaden i ankomsttid genom att t. ex. korrelera mottagna pulståg.

Det som kan mätas av *en* ESM är skillnaden i gångtid mellan rundturen ACB och direktvägen AB, $ACBA = AC + CB - AB$, se Figur 11. En inmätt tidsskillnad mellan *två* inmätare, A och B, för en signal utsänd från C ger möjliga lägen på en av två hyperbelgrenar. Signalen ifråga kan t. ex. vara ett eko via C från en radarpuls sänd från A. Tidsförskjutning p. g. a. repeterstörning från C riskerar orsaka förskjutna hyperbelgrenar. Detta sker om den direkta signalen associeras med en av störpulserna istället för ekot från flygplanet. Om alla pulserna kan associeras korrekt – störpuls för störpuls och eko med eko – ger alla tidsskillnader samma hyperbel, vilket då kan stärka positionsskattningen. Figur 12 visar exempel på förskjutning i fallet där A och B går med samma hastighet v längs en linje genom A och B. Om avståndet AB är litet i förhållande till AC, närmar sig hyperbelns båda grenar till sina asymptoter, två räta linjer genom mätbasens mittpunkt, dvs. vi får en riktningmätning.

Noggrann lägesbestämning kan vara en förutsättning för att kunna avgöra om avståndsavhakning sker. I situationer där både störsignalen och radarsignalens eko i störplattformen är observerbar av ESMen kan avståndsavhakningen identifieras genom att studera de två signalernas inbördes läge.



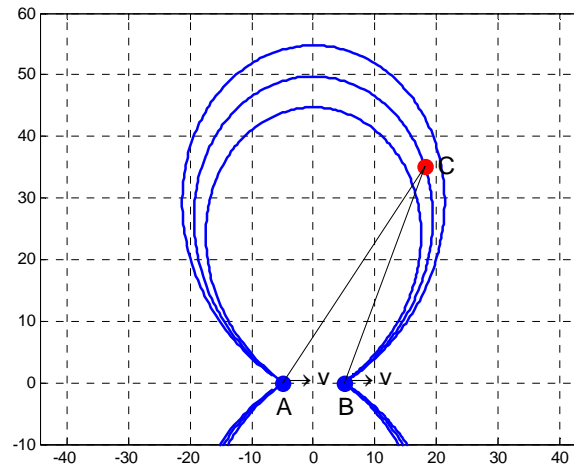
Figur 12. Mätning av ankomsttidsskillnad - TDOA - mellan två plattformar (A, B) till ett mål C ger upphov till möjliga lägeslinjer i form av hyperbelgrenar. De mellersta linjerna svarar mot en tidsskillnad 20 ns ($=20 \times 10^{-9}$ s), medan omgivande linjer motsvarar tidsskillnader 15 resp. 25 ns.

Frågan om klassificering av störaren via insignalens form är troligen inte aktuell då signalen antingen härrör från radarn, dess eko, eller är en repeterad kopia från störsändaren. Möjligen finns där en liten artefakt från signalgeneratorns bristfälliga återgivning av radarsignalen som kan användas.

6.3 Frekvensskillnadsmätning: FDOA

Frekvensskillnadsmätning (FDOA = Frequency Difference of Arrival) baseras på den s. k. dopplereffekten: en utsänd frekvens upplevs högre från en annalkande signalkälla och vice versa. Av detta följer att minst en av inmätarna rör sig relativt emittern (situationen kompliceras dock om alla rör sig). Dopplermätningen kan förvanskas genom att den signal som returneras till ESMen på B bara delvis mäter radialhastigheten mellan radar och störare. Om radarsignalspaningen har noggranna positioner och hastigheter för radar och störare kan frekvensskillnader mellan radar- och störsignal, som inte bara kan förklaras av aktuell geometri och rörelse, vara en avsiktlig doppleravhakning av störaren. Om både störsignalen och radarsignalens eko i störplattformen är observerbar kan en eventuell skillnad i frekvens tyda på ett av störaren pålagt frekvensskift för att orsaka hastighetsavhakning. Detta förutsätter att störsignalen inte är brusstörning och att dess frekvens kan skattas tillförlitligt. Noggrannheten i frekvensbestämning är beroende av SNR.

Antag först att två rörliga inmätare A och B mäter signalfrekvensen hos en markfast emitter C. Antag vidare att inmätarna rör sig med *samma* hastighet v längs en linje genom A och B. Skillnaden mellan uppmätta frekvenser kommer då att ha ett konstant värde på en komplex formad lägeslinje vars utseende beror på inmätarnas hastighet och geometrin, se Figur 13. På grund av oundvikliga mätfel breddas lägeslinjen, se [Henriksson D., 2005, ekv. 9]. Om emittern rör sig flyttas lägeslinjen mer eller mindre beroende på emitterns okända hastighet eller förskjuten radarekofrekvens. Ett sätt att estimeras emitterns hastighet är att försöka skatta den på samma sätt som positionen skattas. Det kräver flera inmätande enheter eftersom det är fler okända parametrar att skatta, se [Andersson B., 2004, sid. 21].



Figur 13. Principbild som visar exempel på så kallade isodopplerskillnadslinjer vid FDOA. Den mellersta linjen sammanbinder alla emitterlägen (C) som resulterar i en uppmätt frekvensskillnad på 2 kHz mellan plattformarna A och B och antagen emitterfrekvens 10 GHz. Omgivande linjer fås om emitterfrekvensen avviker med ± 1 GHz.

Låt i det allmänna fallet, då även emittern rör sig,

\mathbf{V}_A , \mathbf{V}_B , och \mathbf{V}_C = hastighetsvektorer för resp. A, B och C, se Figur 11.

V_T = fart (hastighetskomponent) varmed A närmar sig C,

V_R = fart varmed C närmar sig A,

V_{CB} = fart varmed C närmar sig B,

V_S = fart varmed B närmar sig C,

λ = bär våglängd, t. ex. 3 cm, motsvarande bärfrekvens 10 GHz.

I det *ostörda* fallet blir dopplerfrekvensen i punkt A [Skolnik M., 1962, ekv. 13.7]

$$(9) \quad f_{dA} = 2(V_T + V_R) / \lambda,$$

medan dopplerfrekvensen i punkt B blir [Kingsley S., 1992, ekv. 13.9]

$$(10) \quad f_{dB} = (V_T + V_R + V_S + V_{CB}) / \lambda.$$

6.4 TDOA - AOA

Kombinationen av lägeslinjer skapade med TDOA och AOA är mindre lyckad eftersom osäkerheten hos de båda metoderna ser liknande ut, se [Henriksson D., 2005, sektion 5.2]. Därmed kompletterar inte metoderna varandra på ett bra sätt.

6.5 FDOA - AOA: metod 1

För kombinationen FDOA-AOA gäller allmänt att båda inmätarna medverkar i FDOA-skattningen medan AOA endast genomförs från den ena inmätaren. I [Henriksson D., 2005, sektion 5.3] visas ett fall där noggrannheten vid positionsbestämning, givet en markfast emitter, är något bättre än i fallet TDOA-AOA. För en rörlig emitter krävs ytterligare information, t. ex. direkta avstånd från radarn, för att kompensera osäkerheten i dopplerfrekvens hos emittern.

6.6 FDOA - AOA: metod 2

Ett sätt är att jämföra $\alpha = \alpha_{\text{vinkel}}$ enligt ekv. (6) med $\alpha = \alpha_{\text{doppler}}$ beräknad ur något samband mellan dopplerfrekvenser. Dopplerförvanskning föreligger om $|\alpha_{\text{doppler}} - \alpha_{\text{vinkel}}| > \Delta\alpha$, där $\Delta\alpha$ är ett fördefinierat värde på maximalt acceptabel vinkelskillnad utan dopplerförvanskning.

Låt i ett tänkt specialfall Blås plattformar ha *samma* hastighet $\mathbf{V}_A = \mathbf{V}_B$, med \mathbf{V}_A riktad rakt mot C, under det att störarens hastighet \mathbf{V}_C är riktad rakt mot radarn i A, så att $V_T = |\mathbf{V}_A|$ och $V_R = |\mathbf{V}_C|$

och all rörelse ligger i samma plan. Därmed fås $V_S = V_T \cos \alpha$ och $V_{CB} = V_R \cos \alpha$, vilket insatt i ekv. (10) ger

$$(11) \quad f_{dB} = (V_T + V_R)(1 + \cos \alpha) / \lambda,$$

som kombinerad med ekv. (9) ger

$$(12) \quad f_{dB} / f_{dA} = (1 + \cos \alpha) / 2,$$

och implicit det sökta värdet för α_{doppler} .

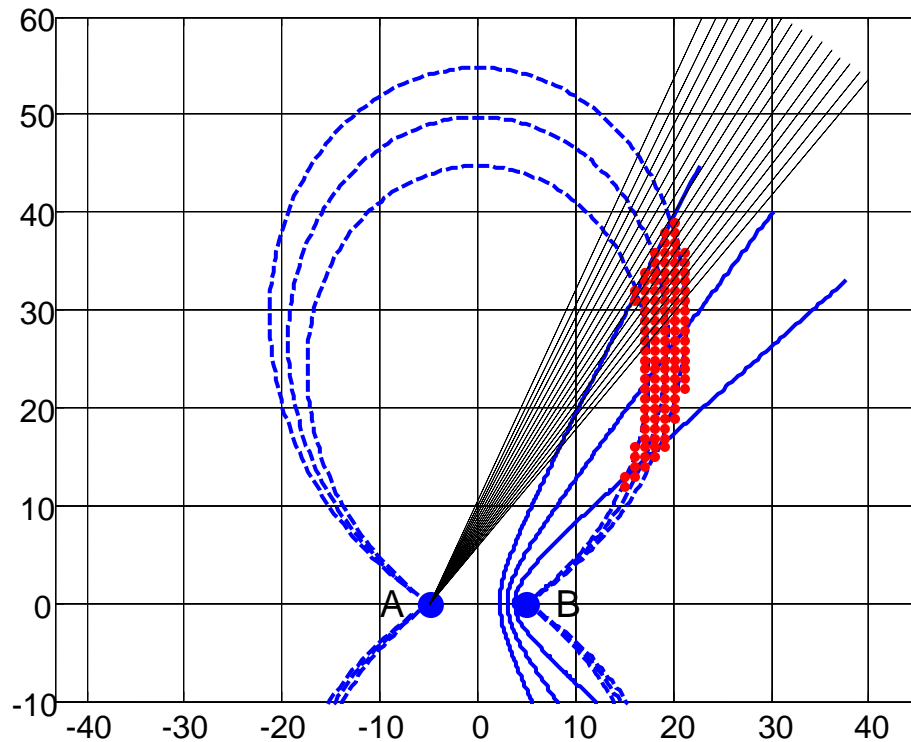
Under antagande om plan geometri och vetskap om komponenterna V_{CB} och V_R samt vinkeln α kan man beräkna \mathbf{V}_C ur ekvationssystemet $V_C = V_R / \cos \gamma = V_{CB} / \cos(\gamma + \alpha)$, där γ är vinkeln mellan \mathbf{V}_C och CA. Efter extraktion av γ fås både magnitud och riktning av \mathbf{V}_C och därmed nyttig information om vart C är på väg.

6.7 FDOA - AOA: metod 3

Ett alternativt sätt vore att undersöka om falska dopplerfrekvenser mätts upp i A och B genom att jämföra den ur dopplermätningar beräknade positionen av störaren C med den position som erhållits genom krysspejling av C enligt ekv. (7) och (8). Lägesbestämning ur dopplermätningar av C har i [Andersson B., 2002] utretts för specialfallet att A och B är parallellt flygande sensorplattformar med samma hastighet mot ett stillastående mål C. Mot en markfast emitter är det t. o. m. möjligt att klara sig med endast en målsökare där egenrörelsen utgör en mätbas [Andersson B., 2001]. Att skapa en geometrisk mätbas utifrån egenrörelse tar dyrbar tid. För FDOA är dock hastighetsskillnad viktigare och detta kan skapas relativt snabbt genom att manövrera. Hur pass bra lägesbestämning av stillastående mål kan bli med hjälp av radarsignalspaning diskuteras i [Henriksson D., 2005].

6.8 TDOA - FDOA

I princip lovar kombinationen TDOA-FDOA mycket goda prestanda. Breddningen av lägeslinjerna i de båda metoderna ökar inte så kraftigt med ökande avstånd som AOA gör. Dessutom skär lägeslinjerna varandra i mer gynnsamma vinklar jämfört med t. ex. TDOA-AOA, se Figur 13. Noggrannheten vid positionsbestämning av en markfast emitter diskuteras i [Henriksson D., 2005, sektion 5.4]. För en rörlig emitter gäller återigen att extrainformation - t. ex. (störd) bäring från radarn - måste till för att ytterligare begränsa osäkerheten i emitterns tidsfördröjning och dopplerfrekvens, se Figur 14.



Figur 14. Kombination av TDOA och FDOA ger ytterligare begränsning av möjliga positioner för emitterlägen C, jämfört med effekten av enbart TDOA (Figur 12) eller enbart FDOA (Figur 13). Punkterna i rött markerar de möjliga fallen, vilka måste avgöras genom ytterligare information. Exempel på detta visas av AOA metoden lobmaxpejling, se sektion 6.1, som påverkad av vinkelstörning utökas till en 15 grader bred osäkerhetssektor från plattformen A pekande mot ett troligt emitterläge.

6.9 FDOA - FDOA och TDOA - TDOA

Både FDOA-FDOA och TDOA-TDOA kräver minst tre inmätare för att avgränsa emitterpositionen till en sluten, lokal yta. Då i vårt fall endast finns två inmätare kan dessa metoder inte utan vidare användas.

6.10 AOA - TDOA - FDOA

Problemet kompliceras om – som i vårt fall – även störplattformen rör sig. Planer om fortsatt arbete avseende rörliga emitterrar ventileras i en FOI lägesrapport [Andersson B., 2003] och något mer konkret i [Andersson B., 2004]. Normalt utökas det sökta läges- eller frekvensområdet om målet har en okänd hastighet. Lösningen kan vara fler samverkande målsökande plattformar, metoder (AOA, TDOA, FDOA, se Figur 14) eller andra sensorer med kompletterande egenskaper. Även tidpunkterna är viktiga; ju mindre tidsskillnad mellan olika inmätare ju mindre risk för lägesfel. Osäkerheten i själva tidsmätningen måste minimeras genom noggrann synkronisering av klockor på olika plattformar.

Oavsett geometri och plattformshastighet är det värdefullt om signalspaningen kan skilja på frekvenskomponenter från både den i störaren reflekterade radarsignalen och själva störsignalen. En signifikant skillnad i dessa dopplerskift skulle här tyda på ett försök till hastighetsavhakning.

7 Kommunikation

Det en fördel om ESM känner till så mycket om den utsända radarsignalen som möjligt om signalen ska kunna upptäckas tidigt. Eftersom den aktuella signalen troligen är svag, kan detta till och med vara en förutsättning för att signalen ska kunna upptäckas. Om den intressanta vågformen (bärfrekvens, PRF, bäring, pulslängd, pulskompression och amplitud) är känd – och om sensorn kan styras adekvat – kan sensorn öka integrationstiden för denna vågform och därigenom öka upptäcktsavståndet. Annars måste sensorn söka efter den intressanta vågformen, vilket minskar den tid som sensorn annars kan ägna åt att integrera signalen. Om ESM-sensorn ska kunna bidra till denna tillämpning måste den åtminstone få information om signalens vågform.

Eftersom Blå i detta läge inte vet exakt vilka av de olika radarekona som motsvarar det riktiga målet, så måste ESM-sensorn alltid söka i ett visst vinkelintervall för att hitta den intressanta signalen. Information om riktning till störaren möjliggör att ESM kan rikta in sin antenn för bästa känslighet (huvudlob) mot störaren. Blå 1 bör alltså kommunicera det område där målen befinner sig i till Blå 2 för att kunna få maximal integrationstid och därmed få maximalt upptäcktsavstånd och maximal noggrannhet i inmätningen.

I det fall ESM-sensorn inte vet något om vilken signal som är den intressanta för störundertryckning måste Blå 2 dessutom kommunicera alla emottagna signaler till Blå 1, vilket kan öka belastningen på länken avsevärt. Om ESM känner till signalen kan signalbehandlingen av den utsända radarsignalens vågform göras avsevärt enklare och snabbare. Detta förutsätter att ESM-sensorn kan styras adekvat, så att signaler som inkommer till sensorn inte matchas mot alla signaturer i dess databas för att känna igen den aktuella emittern.

Det finns huvudsakligen tre olika sätt för Blå 2 att få kännedom om vilken signal som Blå 1 använder för tillfället. För det första kan Blå 2 få information om signalen genom den direkta radarsignalen från Blå 1 till Blå 2. Den direkta signalen från Blå 1 radar kan användas till att omedelbart efteråt känna igen den reflekterade signalen och eventuella störsignaler. Detta kräver då att Blå 2 har någon antenn riktad mot Blå 1 under hela uppdraget och att analysen av denna signal kan ske mycket snabbt. Alternativt märks den direkta signalen i nosradarantennens sidlobber. Den direkta signalen från radarn kan därmed också ställa till problem. Frågan är hur man kan urskilja signalen från störaren från den direkta signalen från radarn. Detta kan vara mycket svårt eftersom signalerna riskerar att överlagras på varandra, speciellt då moder med höga PRF används. Förutsatt att signalerna inte överlagras kan signal som representerar störare och signal som representerar skrovet urskiljas genom att dessa signaler skiljer i bäring.

Det andra sättet för Blå 2 att få information om den intressanta signalen är om den kommuniceras via jaktlänken vid varje tillfälle som radarn byter vågform. Detta kan ge en hög belastning på länken, men är annars det sätt att lösa kommunikationen på som betyder att minst antal andra system eller processer är inblandade i lösningen. Då avståndet mellan plattformarna är relativt liten kan kommunikationen ske med låg signalnivå och därmed med liten röjningsrisk.

Den tredje lösningen innebär att roten känner till varandras vågformer i förväg. Då de radar som används på Blå 1 och 2 inte ska störa varandra måste man innan uppdraget komma överens om de signalparametrar (moder) som respektive plattform ska använda. En möjlighet för att minimera kommunikation mellan plattformarna är att varje plattform bär med sig detaljerad information om de moder som roten använder. I detta fall räcker det med att Blå 1 sänder över en identifierare på vilken mod som används, varefter Blå 2 snabbt kan leta upp denna mod i en databas.

Frågan är om kommunikationen är en begränsande faktor även i denna tillämpning? Svaret beror på de tillgängliga kommunikationskanalerna, men även på hur ofta signalen ändrar sig. I vårt scenario ändrar radarn PRF ofta just i inmätningssfasen, samtidigt som störmålen introduceras,

varför man just i denna fas måste kommunicera oftare. Om kommunikationen är en begränsande faktor eller inte, samt det bästa sättet att lösa kommunikationen har inte kunna fastställas i denna studie. Detta måste undersökas i en fortsatt studie.

Scenariot har vissa paralleller till bistatisk radar. För bistatisk radar är synkronisering mellan aktiv och passiv komponent en begränsande faktor. I vårt fall är det dock inte nödvändigt att Blå 2 vet när Blå 1 sänder sin signal med lika hög noggrannhet som det gäller för bistatisk radar. Det viktiga är att ESM-sensorn är uppmärksam på den aktuella signalen under rätt tidsintervall. Möjligen kan den direkta radarsignalen från Blå 1 användas för att initiera sökningen efter reflekterad signal. Den direkta signalen bör enkelt gå att hitta bland andra signaler då man vet dess bäring och genom att energinivån är väsentligt högre än för andra signaler.

8 Slutsatser

- 1) Det koncept som har beskrivits i denna rapport har inte, till författarnas kännedom, studerats tidigare.
- 2) Om konceptet är realiserbart stärker det möjligheterna för svenska flygstyrkor att agera framgångsrikt i internationella uppdrag.
- 3) Oklarheter återstår vad gäller upptäcktsavståndet av störningen i ESM-sensorn och vilken sensorlösning som krävs. Diskussioner med experter inom området indikerar att upptäckt skulle kunna ske i tid för att konceptet ska vara realiserbart, men vidare forskning för att verifiera detta krävs.
- 4) Det är oklart hur kommunikation mellan Blå enheter ska hanteras. Ju bättre Blå 2 känner till radarsignalen från Blå 1, desto tidigare kan Röd upptäckas. Om konceptet kräver att hela vågformen är känd liknar detta koncept bistatisk radar, utan de krav på exakt tidssynkronisering som finns i detta fall. Några olika alternativ till kommunikation har identifierats.
- 5) En vanlig ESM har svårt att uppfatta störning på de avstånd som är aktuella i denna tillämpning. Troligen krävs istället att nosradarantennen används i kombination med ESMens signalbehandling. Detta gör också lobmaxpejling till den enda möjliga metoden för vinkelbestämning.
- 6) I de scenarier som presenteras i kapitel 2 används inte radar hos Blå 2. Om även Blå 2 skulle ha behov av att använda sin radar krävs noggrann planering och schemaläggning för att koordinera användningen av aktiv och passiv radar.
- 7) Eftersom störarens uteffekt kan vara ungefär densamma som det reflekterade radarekots, så kan ett system som kan uppfatta störning också i vissa fall uppfatta riktiga ekon från radarsignalen. Störsignalen får inte ha en alltför stor signalstyrka i förhållande till det verkliga ekots, eftersom detta kan avslöja signalen som störning. Med andra ord kan ett system utvecklat enligt detta koncept kanske till och med upptäcka andra plattformar som döljer sig bland de falska mål som introduceras genom DRFM-störning. Den bistatiska målarean spelar också stor roll i detta fall.
- 8) I det fall att Blå 2 inte vet exakt vilka radarsignalens parametrar från Blå 1 är, så måste Blå 2 söka efter den signalen. Detta medför att upptäcktsavståndet blir kortare och att tiden för att identifiera den intressanta signalen blir längre. Vilka möjligheter som finns att realisera konceptet då mindre än signalens fulla vågform (förutom bäring) är känd, är inte klarlagt i denna studie. Ju mindre detaljerat signalen måste vara känd, desto mindre kommunikation krävs.
- 9) Vissa enkla simuleringar har utförts för att preliminärt undersöka möjligheterna till att avgöra vilket av ett antal potentiella mål som är det riktiga. I princip möjliggörs positionering/klassificering av störemitter genom fusion av ESM och störd radar i en tidsserie från två samverkande plattformar.
- 10) Det finns troligen möjligheter att förbättra klassificering och positionering av mål genom att använda kompletterande mätmetoder. Mätmetoderna baseras på olika sensormoder, innefattande riktningar, tidsskillnader och frekvensskillnader för mottagna radarsignaler.

9 Förslag till fortsatt arbete

För att kunna avgöra om det presenterade konceptet är möjligt att använda, samt hur snabbt och bra den eftersträlvade klassificering kan utföras finns ett flertal frågor som måste besvaras i en fortsatt studie. De första av dessa frågor är:

- 1) På vilket avstånd kan den passiva Blå upptäcka radarsignalen? Bedömningar av detta måste ske givet olika förutsättningar; olika sensorsystem, geometrier, störare och olika kännedom om signalen hos Blå 2.
- 2) Kräver konceptet att radarantennen används eller kan ESM-antennen användas?
- 3) Vilken lösning på kommunikation är bäst och vilka krav ställer detta på länken?
- 4) Kan användningen av radarantennen passivt och aktivt koordineras om det visar sig att radarantennen måste användas? Hur sker det på bästa sätt i så fall?

Dessutom måste de scenarier som används verifieras (genom kontakter med användare) och möjligen modifieras eller kompletteras.

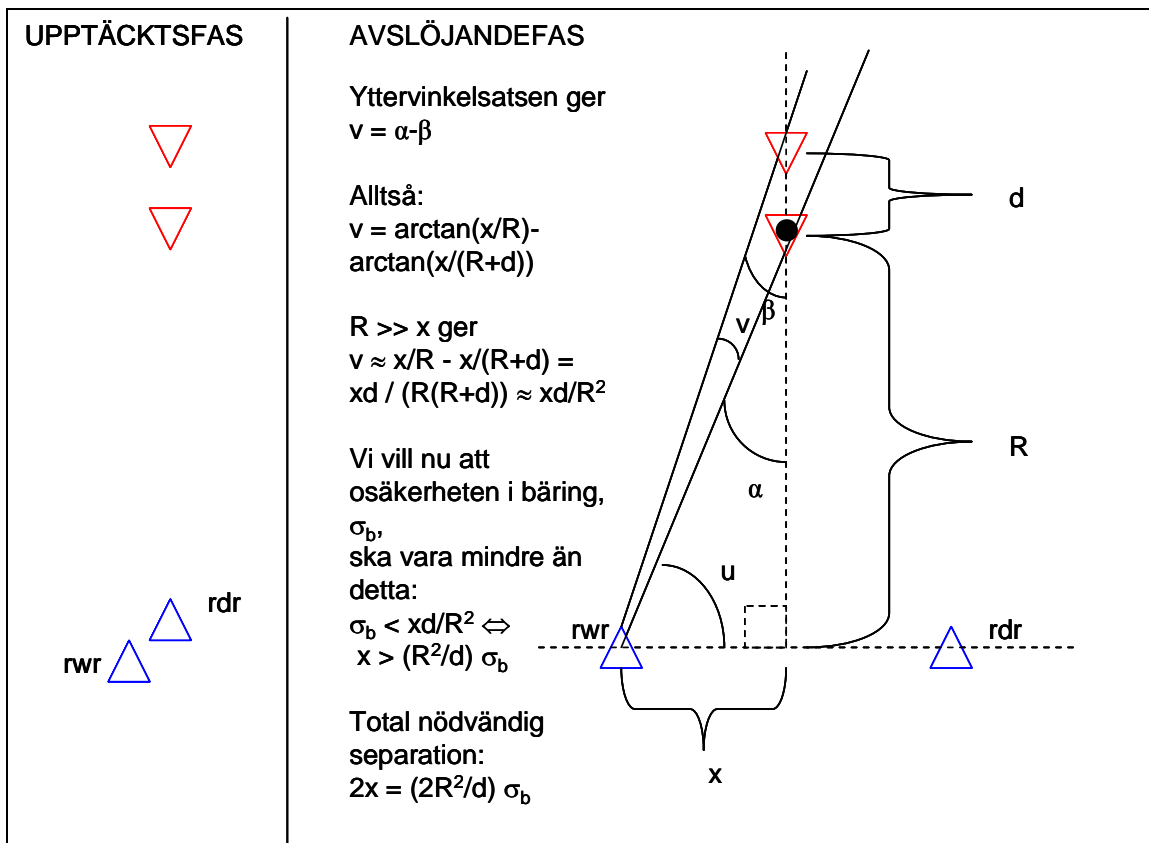
Givet att dessa frågor kan besvaras tillfredsställande och till konceptets fördel kan en metod för klassificering utvecklas. Denna bör sedan värderas genom simuleringar i den s. k. fusionsnoden [Strömberg D., 2000], [Karlsson E., 2000], som har utvecklats på FOI och som tidigare har använts i liknande tillämpningar, [Strömberg D., 2005]. Metoder för att fusionera kompletterande information i form av TDOA och FDOA kan utvecklas i samband med detta.

10 Bilaga A - Minsta mätbas för separation av två främmande plattformar

En geometrisk analys ger minsta möjliga mätbas mellan två egna inmätande flygplan mot två främmande plattformar. Om $2x$ är sensoravstånd mellan Blå 1 (rdr) och Blå 2 (rwr), R avstånd till störare, α och β bäringar till Röd 1 och Röd 2, σ_b osäkerheten i bäring, d osäkerheten i avstånd mellan Röd 1 och Röd 2, gäller vid små mätbaser ($R \gg x$), enligt 15, villkoret

$$(13) \quad x > R^2 \sigma_b / d .$$

Exempel: $R = 100$ km, $\sigma_b = 1^\circ$, $d = 10$ km ger $x > 10^4 \times 1 \times \pi / 180 / 10$ km = 17 km.



Figur 15. Geometri för upptäckts- och avslöjandefas.

Referenser

- [Andersson B., 2001] B. Andersson, D. Henriksson, B. Lindgren, *Flygburen passiv lägesbestämning baserad på noggrann frekvensmätning*, FOI-R--0329--SE, December 2001.
- [Andersson B., 2002] B. Andersson, H. Bergdal, D. Henriksson, B. Lindgren, C-L. Westerlund, *Precisionslägesbestämning med flygburna radarsis-sensorer*, FOI-R--0719--SE, December 2002.
- [Andersson B., 2003] B. Andersson, B. Lindgren, D. Henriksson, *Aktiviteter avseende radarsignalspaning och radarvarning inom projekt VMS NBF*, FOI Memo 03-2237, September 2003.
- [Andersson B., 2004] B. Andersson, D. Henriksson, B. Lindgren, C-L. Westerlund, M. Wikström, *Sensorsamverkan för radarvarning och taktisk radarsignalspaning*, FOI-R--1335--SE, September 2004.
- [Andersson M., 2005] M. Andersson, M. Nordin, M. Folkesson, R. Forsgren, P. Klum, A. Lauberts, A. Eneroth, *Samverkande sensorer i en telekrigstillämpning - undertryckning av falska mål med datafusion*, FOI-RH--0503--SE, December 2005.
- [Andersson M., 2006] M. Andersson, A. Lauberts, M. Folkesson, M. Nordin, *Nätverksbaserad störundertryckning – utvärdering med uppmätta radardata*, FOI-RH--0609--SE, December 2006.
- [Bergdahl H., del 1, 1999] H. Bergdahl, B. Andersson, R. Gustavsson, P. Nagy, F. Oscarsson, *Signalspaningsteknik del 1 Grunder samt radiosignalspaning*, FOA 75, Institutionen för Telekrigssystem, april 1999.
- [Bergdahl H., del 2, 1999] H. Bergdahl, B. Andersson, B. Lindgren, *Signalspaningsteknik del 2 Radarsignalspaning*, FOA 75, Institutionen för Telekrigssystem, april 1999.
- [Diskussioner, 2007] Intervjuer med P. Johansson, A. Eneroth, B. Andersson och C.-L. Westerlund, 2007.
- [Doucet A., 2001] A. Doucet, N. de Freitas, N. Gordon, ed., *Sequential Monte Carlo Methods in Practice*, Springer Verlag, 2001.
- [Henriksson D., 2005] D. Henriksson, B. Lindgren, M. Wikström, *Noggrannhet vid lägesbestämning med hjälp av radarsignalspaning*, FOI-R--1723--SE, September 2005.
- [Gerdle P., 2004] P. Gerdle, *Lärobok i telekrigföring för luftvärnet, radar och radartaktik*, Försvarsmakten, M7741-850101 Telekri Rr Tak Lv, 2004.
- [Karlsson E., 2000] E. Karlsson, *Decentralized tracking with feedback, adaptive sample rate and IMM*, FOA-R--00-01539-706-SE, Mars 2000.
- [Kingsley S., 1992] S. Kingsley, S. Quegan, *Understanding Radar Systems*, McGraw-Hill, London, 1992.
- [Mikhalev A., 2006] A. Mikhalev, R. Ormondroyd, *Fusion of Sensor Data for Source Localization using the Hough Transform*, Proc. of the 9th Int. Conf. on Information Fusion, Florence, July, 2006.
- [Mikhalev A., 2006] A. Mikhalev, R. Ormondroyd, *Comparison of Hough Transform and Particle Filter methods of emitter geolocalization using fusion of TDOA data*, Proc. of the 4th Workshop on Positioning, Navigation and Communication, March, 2007.
- [Skolnik M., 1962] M. I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*, McGraw-Hill, Inc., London, 1962.
- [Strömberg D., 2000] D. Strömberg, P. Hörling, F. Lantz, *En plattformsbaserad Datafusionsnod - Delrapport 1*, FOA-R--00-01716--SE, December 2000.

[Strömberg D., 2005] M. Andersson, M. Folkesson, R. Forsgren, F. Lantz, D. Strömberg (redaktör), *Fusion av VMS-data - Experiment i FLSC*, FOI-RH--0495--SE, December 2005.