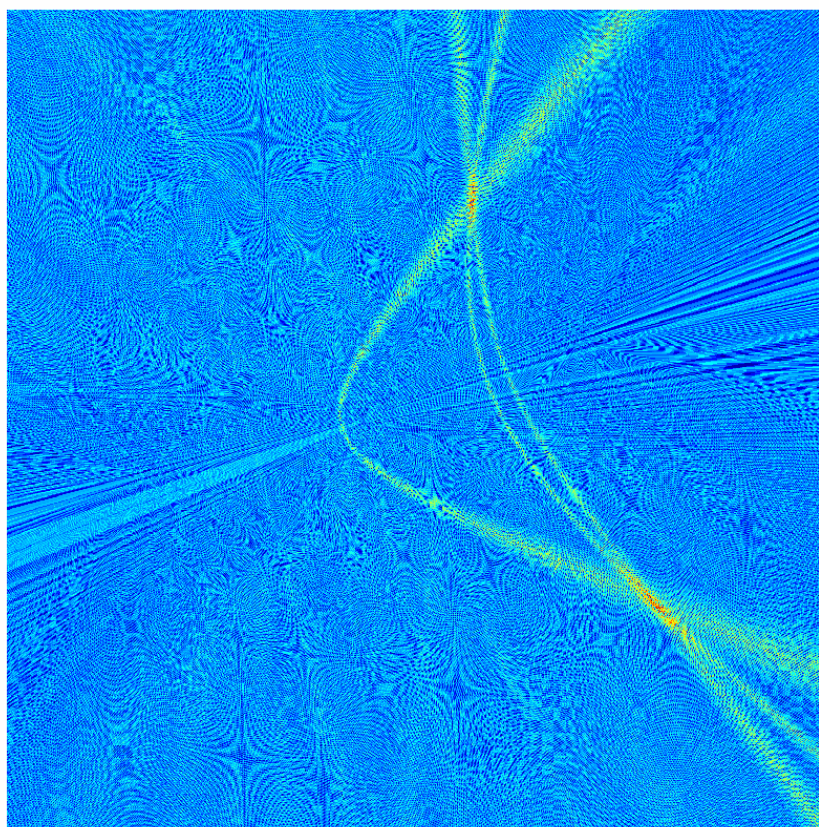


B Andersson, D Henriksson, B Lindgren, C-L Westerlund, M Wikström

Sensorsamverkan för radarvarning och taktisk radarsignalspaning



TOTALFÖRSVARETS FORSKNING SINSTITUT

Ledningssystem

Box 1165

581 11 Linköping

FOI-R--1335--SE

September 2004

ISSN 1650-1942

Användarrapport

B Andersson, D Henriksson, B Lindgren, C-L Westerlund, M Wikström

Sensorsamverkan för radarvarning och taktisk radarsignalspaning

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Ledningssystem Box 1165 581 11 Linköping	Rapportnummer, ISRN FOI-R--1335--SE	Klassificering Användarrapport
	Forskningsområde 6. Telekrig och vilseledning	
	Månad, år September 2004	Projektnummer E70652
	Delområde 61 Telekrigföring med EM-vapen och skydd	
	Delområde 2	
Författare/redaktör Börje Andersson Daniel Henriksson Björn Lindgren Carl-Lennart Westerlund Maria Wikström	Projektledare Gustaf Olsson	
	Godkänd av Martin Rantzer	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning Försvarsmakten	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig Börje Andersson	
Rapportens titel Sensorsamverkan för radarvarning och taktisk radarsignalspaning		
Sammanfattning Från och med 2003 bedrivs en del av FOI:s forskning inom VMS-området i projektet VMS i NBF. Projektinnehållet är anpassat för att möta Försvarsmaktens behov av kunskap om hur VMS-funktionen ska hanteras i ett försvar som i ökad grad är nätverksbaserat. En delmängd av projektet studerar vilken betydelse samverkan har vid användning av system för radarsignalspaning och radarvarning. Ur ett användarperspektiv har dessa system uppgifterna att upptäcka, lägesbestämma samt identifiera eller klassificera signaler från olika typer av radarsystem. Rapporten visar att samverkan kan ge förbättringar inom alla dessa uppgifter. Upptäcktsförmågan utökas genom att området där upptäckt kan ske blir större och genom att möjligheterna att upptäcka svaga signaler förbättras. Lägesbestämningen kan ske snabbare och med bättre noggrannhet därför att flera i rummet separerade inmätare momentant ger minst en mätbas och genom att andra metoder än vid enskilt uppträdande kan användas. Samverkan kan även ge förbättrade identifieringsegenskaper men samtidigt ställs krav på att systemen är överens om att inmätningarna avser en och samma emitter. Av rapporten framgår även att gemensam lägesbestämning ställer krav på stödfunktioner som ger gemensamma referenser för tid, frekvens och egen position. Dessutom är länkförbindelsernas egenskaper, exempelvis överföringskapacitet, avgörande för vilka prestanda som kan nås.		
Nyckelord Telekrig, signalspaning, radarvarning, lägesbestämning, VMS, FDOA, TDOA, NBF, SEAD		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 47 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--1335--SE	Report type User report
	Programme Areas 6. Electronic Warfare and Deceptive Measures	
	Month year September 2004	Project no. E70652
	Subcategories 61 EW including EM Weapons and Protection	
	Subcategories 2	
Author/s (editor/s) Börje Andersson Daniel Henriksson Björn Lindgren Carl-Lennart Westerlund Maria Wikström	Project manager Gustaf Olsson	
	Approved by Martin Rantzer	
	Sponsoring agency Swedish Armed Forces	
	Scientifically and technically responsible Börje Andersson	
Report title (In translation) Radar Warning Systems and ESM Systems from a Network Centric Defence perspective		
Abstract Since the beginning of 2003 a significant part of ESM research at the Swedish Defence Research Agency has been conducted within a research project called "VMS i NBF". The focus has been on acquiring knowledge about the implementation of ESM in a network environment. One research area is to analyse ESM- and radar warning systems from cooperation aspects. The main tasks of these systems are – from a user's point-of-view – to detect, geolocate and identify or classify signals originating from different types of radar systems. This report shows that cooperation improves performance in all of these areas. Larger geographical areas are covered with separated units and the ability to detect low power signals is improved. Emitter locations are estimated faster and more accurately since separated sensors allow the use of methods not available to single systems. Cooperation also offers improved ability to identify emitters but also makes it important to secure that the same emitter is measured from all system positions. Demands on support systems are emphasised in the report since cooperation requires common references for time and frequency as well as for own position. In addition the features of a communication link, e.g. data rate, which are crucial for the performance achieved are presented.		
Keywords Electronic Warfare, ESM, RWR, Emitter Location, Network Centric Defence, SEAD		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 47 p.	
	Price acc. to pricelist	

Innehållsförteckning

1.	Inledning	7
1.1	Tidigare arbete – VMS Flyg	7
1.2	Pågående projekt – VMS i NBF	7
1.3	Avgränsningar	8
1.4	Rapportens syfte och innehåll	8
2.	Uppgifter för radarvarning och radarsignalspaning	9
2.1	Upptäckt	9
2.2	Klassificering och identifiering	10
2.3	Lägesbestämning	11
3.	Samverkan för upptäckt	13
3.1	Gemensam yttäckning	13
3.2	Gemensam detektion	15
4.	Klassificering och identifiering vid samverkan	17
4.1	Svårigheter vid samverkan	17
4.2	Nya möjligheter vid samverkan	17
5.	Lägesbestämning genom samverkan	18
5.1	Lägesbestämningsprinciper vid samverkan	18
5.2	Lägesbestämningsprocessen vid samverkan	22
5.3	Yttäckning vid samverkande lägesbestämning	29
5.4	Noggrannhet och snabbhet vid samverkande lägesbestämning	30
5.5	Entydighet vid samverkande lägesbestämning	33
6.	Länkförbindelser för samverkan	37
6.1	Kommunikationsbehov vid signalspaning i förbandssamverkan	37
6.2	Kommunikationslänkens egenskaper	37
6.3	Olika länktekniker och exempel på befintliga länksystem	41
7.	Krav på angränsande system	44
8.	Avslutande diskussion	45
9.	Referenser	47

1. Inledning

1.1 Tidigare arbete – VMS Flyg

Under perioden 1997-2002 studerades användning av radarsignalspaningssystem och radarvarnare i VMS-tillämpningar inom ett av delprojekten i FoT-projekt VMS Flyg. Verksamheten var framförallt inriktad på metoder för att med ett enskilt flygplan lägesbestämma en markfast emitter snabbt och noggrant.

Fram till och med 2001 gjordes den dominerande insatsen inom lägesbestämningsmetoden DDOA¹ och i december detta år sammanställdes en rapport som behandlade metoden inklusive den noggranna frekvensmätning som är en förutsättning för att nå noggrann lägesbestämning, Andersson m.fl. [1].

Det avslutande året studerades parallellt en metod som benämns långbasinterferometri och nyttan av att kombinera metoderna analyserades. Verksamheten inom radarsignalspaning i projekt VMS Flyg sammanfattades avslutningsvis i en rapport om precisionslägesbestämning med flygburna sensorer för radarsignalspaning, Andersson m.fl. [2].

1.2 Pågående projekt – VMS i NBF

Från och med 2003 bedrivs en stor del av FOI:s forskning inom VMS-området i projektet VMS i NBF. Projektinnehållet är anpassat för att möta FM behov av kunskap om hur VMS-funktionen ska hanteras i ett försvar som i ökad grad är nätverksbaserat.

En av delaktiviteterna inom projektet är inriktad mot problematik som är aktuell vid användning av radarvarnare och radarsignalspaningssystem i nätverk. Den kanske största fördelen vid samverkan över nätverk är de påtagligt bättre möjligheterna att åstadkomma en snabb och noggrann lägesbestämning av emitterar.

Kraven på denna typ av lägesbestämning dikteras bland annat av behoven för att framgångsrikt kunna genomföra undertryckning av motsidans LV-radarsystem, så kallad SEAD². Vid SEAD är snabbheten nödvändig för att hinna fastställa radarns position även vid korta sändningstider. Noggrannheten är önskvärd för att kunna verka med precisionsvapen även när radarn har slutat sända. Modern SEAD kan sägas komplettera de enskilda flygplanens VMS-kapacitet med en utökad VMS-förmåga skapad genom att använda nätverk och förbandssamverkan.

Arbetet inom VMS i NBF bygger till stor del på den kompetens som skapades genom projektet VMS Flyg. Under det första året var fokus framförallt på metoder som utnyttjar samverkan för att nå en snabb, noggrann och robust lägesbestämning av mikrovågsemitterar. Innevarande år har detta arbete fortsatt men i ökad grad har även samverkansaspekter av systemuppgifterna upptäckt samt klassificering och identifiering studerats.

Även den övergripande problematik som är unik vid samverkan mellan radarvarnare eller system för radarsignalspaning har bearbetats.

VMS i NBF avslutas 2005 då bland annat den samlade verksamheten ska sammanfattas i en slutrapport.

¹ Doppler Difference Of Arrival

² Suppression of Enemy Air Defences

1.3 *Avgränsningar*

Verksamhetens omfattning har inte givit utrymme för att studera samverkan mellan radarsignalspaningssystem och andra typer av sensorsystem, exempelvis radar eller elektrooptiska sensorer.

1.4 *Rapportens syfte och innehåll*

Huvudsyftet med rapporten är att belysa vilken betydelse samverkan har vid användning av system för radarsignalspaning eller radarvarning. Ambitionen är att ge läsaren en förståelse av hur prestanda kan förbättras relativt enskilt uppträdande, men även att peka på vilka svårigheter som tillkommer. Målsättningen är att rapporten ska vara läsbar utan stora förkunskaper inom området. Samtidigt är förhoppningen att också personer med tidigare insikt i radarsignalspaningsproblematik ska ha behållning av innehållet. Det tekniska djupet och omfattningen har dock avsiktligt begränsats för att behålla karaktären av användarrapport. Läsare som vill tränga djupare in i området ges vägledning genom referenser till bland annat projektgruppens tidigare produktion inom noggrann lägesbestämning.

Efter den här inledningen följer ett kapitel där radarsignalspaningens grundläggande uppgifter; upptäckt, klassificering/identifiering samt riktnings- och lägesbestämning kortfattat beskrivs för att ge en bas för fortsättningen. I de följande tre kapitlen sker därefter en genomlysning av hur samverkan inverkar på respektive uppgift. Beskrivningen förs på en principiell nivå och prestandaresonemangen är endast kvalitativa.

I kapitel 6 behandlas olika aspekter på de länkförbindelser som behövs mellan de samverkande systemen. Kapitlet berör både de kommunikationsbehov som samverkan kräver och de egenskaper som kommunikationslänkar erbjuder. Kapitlet avslutas med en genomgång av olika länktekniker samt några exempel på befintliga länksystem.

Kapitel 7 ger en översikt av på vilket sätt samverkande radarsignalspaning är beroende av stödjande information från angränsande system, exempelvis navigeringssystem som tillhandahåller positioner, hastigheter och attityder hos de samverkande radarsignalspaningssystemen.

En sammanfattande diskussion återfinns i kapitel 8 varefter rapporten avslutas med en referenslista i kapitel 9.

2. Uppgifter för radarvarning och radarsignalspaning

Traditionellt har den defensiva funktionen *radarvarning* varit inriktad mot skydd av enbart den egna plattformen. För att snarast kunna vidta motåtgärder när exempelvis en hotande robot närmar sig är naturligtvis kort reaktionstid väsentlig. Radarvarnare är därför ofta varken avsökande i frekvens eller vinkel och arbetar självständigt utan samverkan med radarvarnare på andra plattformar.

För *taktisk radarsignalspaning* finns större möjligheter att öka systemkänslighet och inmätningssnoggrannhet genom att använda lägre momentan bandbredd och antenner med riktverkan. Det finns även möjlighet att utnyttja operatörer för att inrikta spaningen och på olika sätt förbättra den automatiska bearbetningen med manuella analyser. Den taktiska radarsignalspaningen arbetar i tidsperspektivet minuter vilket medger att samverkan sker med andra enheter för att exempelvis lägesbestämma en emitter.

Teknikutvecklingen är och har varit sådan att gränsytan mellan varning och spaning blir alltmer otydlig. Radarvarnares egenskaper avseende känslighet och mätförmåga närmar sig vad som tidigare bara har erbjudits av taktiska system för radarsignalspaning samtidigt som varningsfunktionen stöds av den omvärldsuppfattning som dessa ger. Möjligheterna att samverka i själva varningsfunktionen har också ökat.

Det är bortom ambitionen för den här rapporten att på en detaljerad nivå beskriva hur radarvarnare eller ett system för radarsignalspaning är uppbyggda. Den intresserade hänvisas i detta avseende till andra referenser, exempelvis Bergdal m.fl. [3] eller Vaccaro [4]. Istället fokuseras på de uppgifter systemen utför ur ett användarperspektiv. Dessa introduceras i det här kapitlet och i de följande tre kapitlen diskuteras hur samverkan påverkar respektive uppgift.

Ur användarens perspektiv är de primära uppgifterna för både radarvarnare och system för taktisk radarsignalspaning att:

- Upptäcka signaler från emitterande radarsystem
- Identifiera eller klassificera det radarsystem som sänder respektive signal
- Bestämma riktningarna till emitterande radarsystem eller helst deras position

2.1 Upptäckt

Upptäckt inkluderar de tre stegen; *intercept*, *detektering* respektive *medvetenhet*.

Med *intercept* avses i det här sammanhanget att flera grundvillkor som är nödvändiga för *detektering* är uppfyllda samtidigt. Signalspaningssystemet måste momentant bevaka den frekvens radarn utnyttjar för att radarsignalens ska kunna detekteras. Om signalspaningssystemet använder riktantenn och radarsignalen är svag måste även antennen samtidigt peka mot radarn. Sannolikheten för *intercept* av en viss radarsignal minskar därför om avsökning används i frekvens- eller vinkelled, och i ännu högre grad om avsökning sker i både frekvens- och vinkelled. Interceptegenskaperna påverkas således av hur den momentana täckningen ser ut i frekvensled respektive vinkelled i förhållande till de totala frekvens- respektive vinkelområden som systemet täcker.

Som tidigare har konstaterats medför kraven på kort reaktionstid att radarvarnare ofta momentant täcker hela det önskade frekvensområdet och att systemets antenner, utan avsökning, täcker en stor del av sfären (luftfallet) eller halvsfären (ytfallet). Intercept-sannolikheten för denna typ av radarvarnare anses därmed ofta vara i närheten av 100 %.

När villkoren för intercept är uppfyllda finns förutsättningar för att signalen från exempelvis en radar kan detekteras, vilket innebär att en vald tröskelnivå överskrids och händelsen genererar data som går vidare i systemet. Sannolikheten för att detektering sker kan förhållandevis enkelt beräknas för varje enskild mottagen puls och problematiken är i princip densamma som hos en radar. Parametrar som påverkar sannolikheten är den mottagna signaleffekten och bruseffekten i mottagaren samt vilka amplitudfördelningar dessa har. Detekteringssannolikheten avgörs även av den tröskelnivå som är vald i mottagaren. En sänkning ökar sannolikheten för att en mottagen puls ska detekteras men samtidigt ökar risken för att tröskeln överskrids när bara brus finns närvarande. Tröskelnivån är därför en kompromiss som ger tillräcklig god sannolikhet för detektion utan att falsklarmrisken är oacceptabelt hög.

Taktiska system för radarsignalspaning och radarvarnare presenterar eller rapporterar i princip aldrig upptäckt av enstaka pulser. För att upptäckt av en signal skall anses ha skett krävs normalt att flera pulser detekterats. Det krävs dessutom att de bedöms höra samman och inte är en samling pulser från olika radaremittrar. Medvetenhet – det avslutande steget i upptäcktsprocessen – kan inte lika enkelt som de tidigare stegen hanteras med matematiska verktyg. Möjligheterna att nå medvetenhet påverkas av det aktuella systemets uppbyggnad men även signalmiljön kan inverka genom att puls-sorteringen försvåras eller att bearbetningstiden ökar.

Eftersom möjligheterna att upptäcka en radarsignal beror av egenskaperna hos både signalspaningssystemet och radarsystemet samt påverkas av signalmiljön och vågutbredningen är det inte enkelt att beskriva vilken yttäckning man når med ett eller flera system för radarsignalspaning. I kapitel 3 förs dock ett principiellt resonemang om hur samverkan inverkar på yttäckningen för upptäcktsuppgiften.

2.2 Klassificering och identifiering

En viktig uppgift för taktiska system för radarsignalspaning och radarvarnare är att identifiera eller klassificera upptäckta signaler. Det blir därmed möjligt att presentera och rapportera vilken typ av radar systemet har upptäckt. Eftersom en radar använder olika vågformer beroende på mätuppgift är det även möjligt att avgöra den aktuella arbetsmoden. Informationen är betydelsefull för att exempelvis definiera hotnivån eller att välja lämpliga störmetoder.

Vid identifieringen är bland annat signalens bärfrekvens samt tidsavståndet mellan konsekutiva pulser, den så kallade pulsgivningen viktiga parametrar. Ytterligare information kan användas, exempelvis pulslängd, modulation på pulserna eller antennavsökningsmönster. Resultatet från parameterestimeringen jämförs med innehållet i systemets emitterbibliotek och i gynnsamma fall kan entydig identifiering göras. Olika radarsystem har dock ofta likartade vågformer vilket försvårar identifieringen. Vid framtagningen av emitterbibliotek är det därför väsentligt att undersöka vilka identifieringskonflikter som kan uppstå och om möjligt undvika dessa. En viktig delösning i detta arbete är att göra rätt urval av emittrar utifrån vad som bedöms kunna förekomma i aktuellt område. En omsorgsfull förberedande

underrättelseverksamhet i form av signalspaning är av detta skäl nödvändig men emitterbibliotek behöver även uppdateras under pågående operationer.

En viktig aspekt av identifiering är att signalspaningssystemet inte kan inriktas mot att bara hantera signaler från motsidans radarsystem. Den dominerande andelen signaler som tas emot härstammar från egna system eller från system som är neutrala eller civila. Dessa bidrar självfallet till omvärldsbilden men kan i vissa fall liknas vid klotter för en radar.

Om en inmätt signal inte kan matchas mot någon specifik emittertyp eller emittermod i biblioteket kan klassificering var den kvarstående möjligheten. Klassificering kan sägas vara en grövre identifiering som endast avgör radarklass, exempelvis fartygsbaserad spaningsradar.

På senare år har det även blivit aktuellt med identifiering med en noggrannhet som medger individbestämning av emitterar. På engelska används beteckningen *SEI – Specific Emitter Identification*. Utvecklingen har blivit möjlig genom att system för radarsignalspaning i ökad grad utnyttjar digital signalbehandling. Nyansskillnader i mottagna vågformer kan därmed upptäckas och användas för att särskilja olika exemplar av samma radartyp. Möjligheterna bromsas till viss del av att radarutvecklingen samtidigt resulterar i att skillnaden mellan radarindivider minskar.

Säker identifiering har vid internationella insatser visat sig vara mycket betydelsefull för att undvika vapeninsatser mot egna eller civila. Bristande identifiering omöjliggör därför vanligtvis vapeninsats. Identifieringsförmågan är en av de verkligt attraktiva egenskaperna hos radarvarnare och system för radarsignalspaning. Förmågan är genom den goda upplösningen överlägsen vad som kan åstadkommas med en radar och väderberoendet som elektrooptiska sensorer har saknas. Signalspaningssystemets förmåga att tränga under ytan och avslöja arbetsmoden hos aktuell emitter är också unik och avslöjar status och intentioner.

Uppgiften identifiering och klassificering är här beskriven före uppgiften lägesbestämning. Under vissa omständigheter kan förloppet eventuellt vara det omvända.

2.3 Lägesbestämning

Information om varifrån de emitterar som upptäcks sänder är självfallet eftertraktad kunskap. Lägesinformationen bidrar till den egna omvärldsuppfattningen och kan användas för att invisa vapensystem eller andra sensorsystem. I det senare fallet är emitterläget även en parameter som är lämplig för att lösa den associering som måste ske vid eventuell sensordatafusion.

Det är önskvärt att lägesbestämning sker snabbt, med stor noggrannhet och utan mångtydigheter. Dessutom är det önskvärt att lägesbestämning kan ske inom ett stort område utan att signalspaningssystemet flyttas, det vill säga att yt- eller volymtäckningen är stor. Helst bör lägesbestämningen ske i 3-dimensioner men ofta är 2-dimensioner tillräckligt, exempelvis om identifieringen visar att signalen kommer från en mark- eller ytbaserad emitter.

Det finns ett antal olika metoder för att lägesbestämma en emitter. Avståndet till emittern kan endast i undantagsfall mätas från en stationär inmätningssposition. Konsekvensen är att en enskild inmätare efter kort mättid generellt endast kan ge riktningen till sändaren, vilket principiellt kan betraktas som en grov lägesbestämning. I en radarvarnare är dock riktningsinformationen ofta tillräckligt för att initiera undanmanöver och invisa motmedel.

Lösningen för att kunna lägesbestämma emitterar är att använda mätningar från två eller flera geografiskt separerade inmättningspositioner. Antingen producerade av en rörlig inmätare eller med hjälp av flera inmätare som samverkar. I det senare fallet kan lägesbestämningen ofta ske både snabbt och med god noggrannhet, vilket är en av de stora vinsterna vid sensorsamverkan. Val av lämplig metod för lägesbestämningen påverkas av bland annat vilken vågform radarn använder. En korrekt identifiering kan därför vara viktig för att nå bästa prestanda i lägesbestämningen.

Olika aspekter av lägesbestämning, speciellt avseende samverkan, presenteras vidare i kapitel 5.

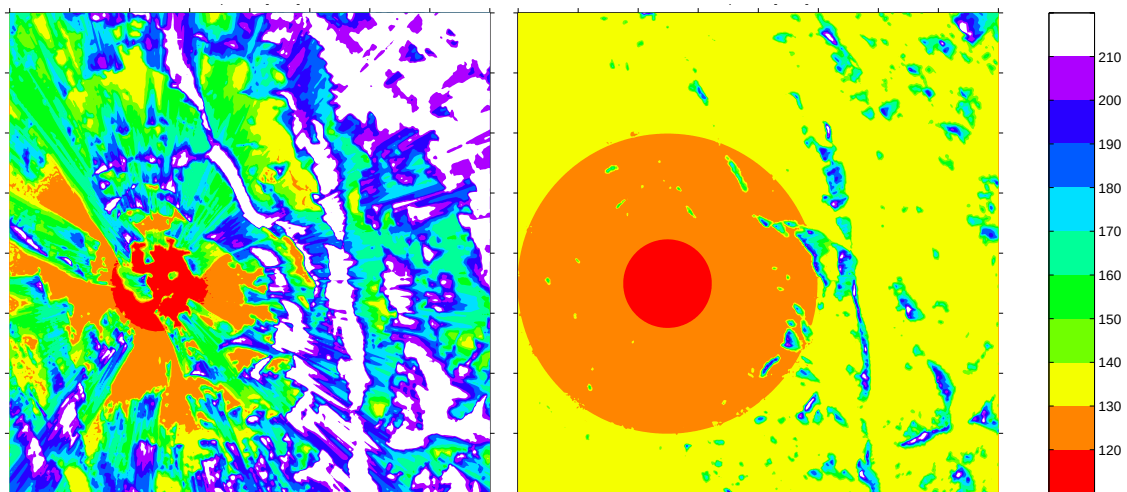
3. Samverkan för upptäckt

När flera system för radarsignalspaning samverkar kan de gemensamma upptäckts-egenskaperna förbättras relativt vid enskilt uppträdande. I sin enklaste form kan förbättringen vara ett resultat av att de enskilda inmätarna delger varandra sin omvärldsbild utan att uppträdandet samordnas. Denna typ av delgivning kan användas som invisning av de övriga enheterna för att öka möjligheterna till egen upptäckt. Vid mer integrerad samverkan är det möjligt att förbättra upptäcktsfunktionen genom att exempelvis avsökningsuppgifter i frekvens eller vinkel fördelas mellan de ingående systemen. Slutligen kan intim samverkan i vissa fall medge detektion och upptäckt av emitterar som inte kan upptäckas av något av de enskilda radarsignalspaningssystemen om dessa arbetar var för sig.

De förbättrade upptäcktsegenskaper som samverkan medför handlar exempelvis om att systemen tillsammans når bättre tids-, frekvens- eller yttäckning. I det följande belyses yttäckningsproblematiken närmare varefter möjligheterna med gemensam detektion uppmärksammas.

3.1 Gemensam yttäckning

En förutsättning för att ett system för radarsignalspaning eller radarvarning ska kunna upptäcka en emitter är att den utsända effekten genererar en effekttäthet vid signalspaningsutrustningens antenn som överskrider den aktuella systemkänsligheten. En faktor som påverkar om upptäckt kan ske är därför *utbredningsdämpningen* mellan emittorn och radarsignalspaningssystemet. Vid frirymdsutbredning ökar utbredningsdämpningen 4 gånger (6 dB) för varje dubbling av avståndet men ökningen är betydligt snabbare om vågutbredningen delvis sker genom vegetation eller om emittorn befinner sig bortom den så kallade radarhorisonten. Egen antennhöjd blir därmed en viktig egenskap för ett signalspaningssystem's möjligheter att upptäcka radar som är yt- eller markbaserade eller exempelvis flyger på låg höjd.

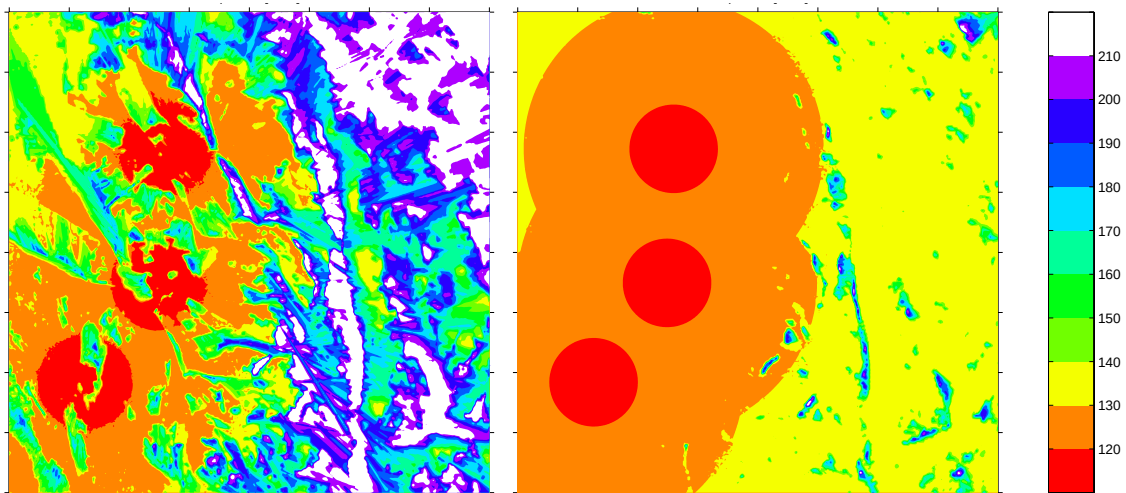


Figur 3.1 Av figuren framgår hur stor utbredningsdämpningen är mellan ett signalspaningssystem och alla tänkbara radarpositioner inom ett 40 x 40 km stort område. Signalspaningssystemets position motsvarar centrum på det röda området. Antennens höjd över marken är 15 m (mast) i den vänstra delfiguren och 1500 m (flygburen) i den högra. Radarns antennhöjd är i båda fallen 6 m. Utbredningsdämpningen är beräknad för 6 GHz och visas i dB enligt färgkoden till höger. Figurerna är hämtade från Eriksson [5].

En jämförelse av delfigurerna i figur 3.1 visar hur den beräknade utbredningsdämpningen minskar när höjden hos signalspaningssystemet ökas från 15 m till 1500 m i ett 40x40 km stort område med relativt kraftig kuperad terräng. Om såväl emitters utsända effekt i riktning mot signalspaningssystemet som dess systemkänslighet i riktning mot emittern är kända kan figurerna användas för att bedöma vilket täckningsområde som kan nås. En viss kombination kan exempelvis innebära att täckningsområdet ges av färgerna i intervallet från rött till grönt.

Av figuren framgår tydligt att ett enskilt flygande signalspaningssystem – jämfört med en markbaserad motsvarighet – har överlägset täckningsområde både genom en utökad bortre räckvidd och genom en ökad möjlighet att ”se” ner i exempelvis dalgångar.

Även när flera inmätare samverkar för att nå ett större gemensamt område där upptäckt är möjlig har naturligtvis spaningshöjden stor betydelse. I figur 3.2 visas minsta utbredningsdämpningen till någon av tre samverkande signalspaningssystem. Figuren kan därmed sägas illustrera vilken yttäckning som den gemensamma upptäcktsfunktionen har om det är tillräckligt att en av inmätarna upptäcker emittern.



Figur 3.2 Figuren visar den lägsta av de tre utbredningsdämpningarna mellan en radar och tre signalspaningspositioner. Förutsättningarna är för övrigt samma som i figur 3.1. Figuren är användbar för att bedöma hur stor yttäckningen är om det räcker att ett av signalspaningssystemen upptäcker emittern. Figuren är hämtade från Eriksson [5].

I det aktuella exemplet indikerar en jämförelse mellan högra delfiguren i figur 3.1 och vänstra delfiguren i figur 3.2 att en enskild inmätare på bra spaningshöjd kan ge en upptäcktsförmåga med bättre yttäckning än vad tre markbaserade system har tillsammans. Figuren inkluderar dock inte hela problematiken eftersom radar med få undantag använder riktlober. Om emittern är en sektoravsökande radar eller en pålöst eldledningsradar finns en uppenbar risk att endast lite effekt från en sidolob sänds i riktning mot en enskild inmätare. Denna risk är mindre om flera inmätare samverkar för att upptäcka.

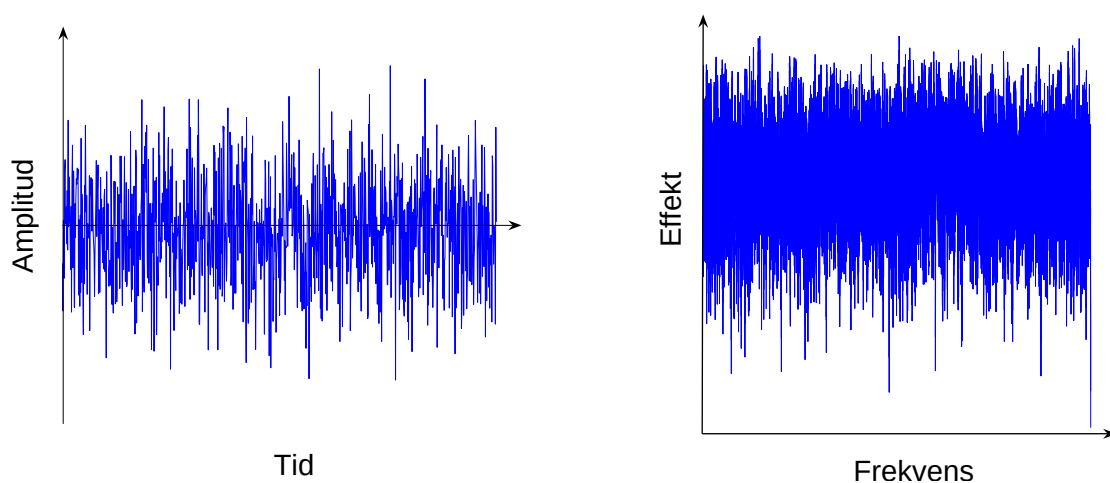
Av figur 3.2 framgår även att spaningshöjden sannolikt påverkar vilket avstånd som är lämpligt mellan samverkande inmätare om bästa möjliga gemensamma yttäckning för upptäckt ska nås. På högre höjd täcker varje enskild inmätare större område och grupperingen skulle kunna vara glesare. Det är dock viktigt att beakta att upptäcktsuppgiften i de flesta fall bara är ett första steg som senare följs av bland annat läges-

bestämning. Om lägesbestämning av en emitter ska ske genom samverkan gäller ofta att flera inmätare samtidigt måste kunna mäta signalen vilket förhindrar en alltför separerad gruppering. Denna kompletterande problematik beskrivs i avsnitt 5.3.

3.2 Gemensam detektion

Genom att korrelera, det vill säga mäta överensstämmelsen mellan två signaler inmätta från olika positioner kan signalinnehåll som är gemensamt upptäckas. Det kan i sin tur vara ett sätt att upptäcka en emitter trots att dess signal relativt sett är så svag att den inte skulle ha upptäckts av inmätarna var för sig.

Figur 3.3 visar en inmätt linjärt frekvensmodulerad signal som är dold i brus samt dess utseende i frekvensdomän. Bruset är så pass mycket starkare än signalen att den inte kan upptäckas, det vill säga signalen syns inte, varken i tidsdomän eller i frekvensdomän.

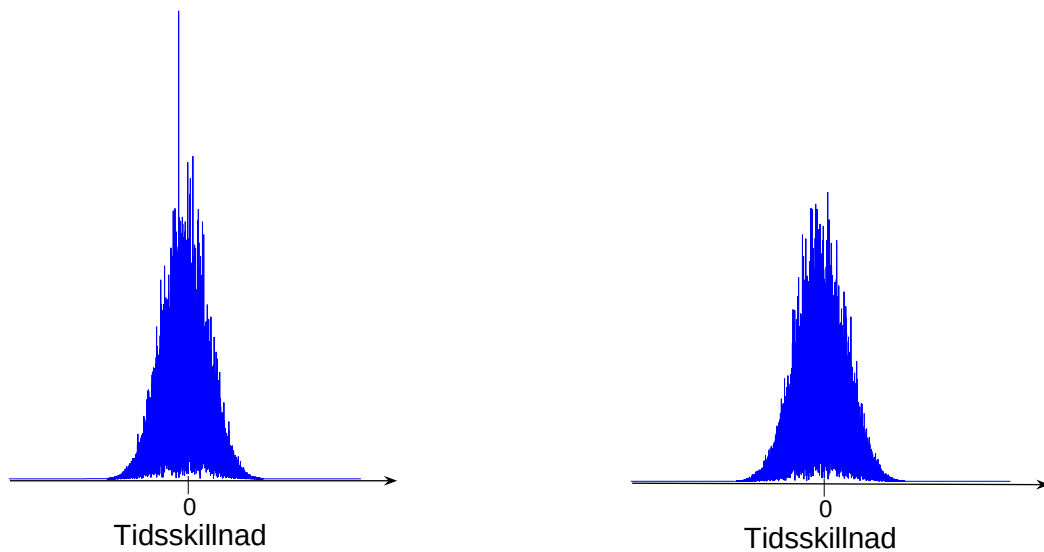


Figur 3.3 En linjärt FM-modulerad signal i tidsdomän (till vänster) och frekvensdomän. Signalen är dold i brus som har 10 gånger högre effekt än signalen vilket medför att en enskild inmätare inte kan upptäcka den.

Korskorrelationen mellan två signaler erhålls genom att multiplicera en av signalerna med en tidsförskjuten kopia av den andra samt summera dessa produkter över alla möjliga tidsskillnader.

Det signalinnehåll som är gemensamt för de båda mottagna signalerna ger upphov till en eller flera toppar i korskorrelationen. Det brus i den ena signalen som är oberoende av motsvarande brus i den andra signalen, som exempelvis mottagarbrus, kommer vid korrelationen att spridas över hela tidsskalan. Korskorrelationsmetoden finns presenterad i Houghton m.fl. [6].

Om den inmätta signalen som beskrevs tidigare korreleras med en signal inmätt vid en annan position men likväl utsatt för lika starkt brus kan den eftersökta linjära FM-modulerade signalen upptäckas. Korskorrelationen visas i figur 3.4.



Figur 3.4 Till vänster visas korskorrelationen mellan två inmätta signaler där ett gemensamt signalinnehåll existerar. Följden blir att den signal som tidigare inte kunde upptäckas med en enskild inmätare framträder som en topp i korrelationen. Till höger visas som jämförelse korskorrelationen för två inmätningar som endast består av brus.

Den tidsskillnad som toppen i korskorrelationen motsvarar är användbar för att lägesbestämma signalkällor med så kallad TDOA³. Denna metod beskrivs närmare i kapitel 5. Upptäckt och lägesbestämning med hjälp av korrelation har visat sig fungera speciellt väl på bredbandiga signaler eftersom höjden på korrelationstoppen är omvänt proportionell mot bandbredden hos signalen. Forskningsresultat inom detta återfinns bland annat i Elbornsson [7] samt Ahnström m.fl. [8].

Genom att korrelera över både tid och frekvens kan en tvådimensionell så kallad CAF⁴ bildas. I Andersson m.fl. [9] beskrivs hur både tids- och frekvensskillnader skattas ur en CAF för att sedan användas för lägesbestämning.

³ Time Difference Of Arrival

⁴ Cross Ambiguity Function

4. Klassificering och identifiering vid samverkan

Klassificering och identifiering är viktig uppgift för radarvarnare och system för radarsignalspaning, oavsett om systemen uppträder enskilt eller i samverkan. Det har dock inte varit en av projektgruppens huvuduppgifter att studera aspekter inom detta område. Följande kapitel är således endast en kortfattad genomgång av några svårigheter – som måste hanteras för att samverkan ska kunna ske – och några idéer om nya möjligheter som tillkommer vid samverkan.

4.1 Svårigheter vid samverkan

En komplikation när flera inmätare ska samverka är att säkerställa att data – från de olika inmätarna – som läggs samman (fusioneras) verkligen avser en och samma emitter. Problemet brukar inom området sensordatafusion benämnas associering men inom radarsignalspaning används även begreppet relativ identifiering. En korrekt relativ identifiering är en förutsättning för exempelvis samverkande lägesbestämning.

Genom att radarsignalspaning har en unik förmåga att identifiera emitterar med hjälp av karaktäristiken i den mottagna vågformen finns i de flesta fall goda möjligheter till robust relativ identifiering. Svårigheten tilltar om ambitioner finns att samverka med radarsignalspaningssystem av olika typ, bland annat på grund av att dessa uppfattar omgivningen på olika sätt.

Relativ identifiering förutsätter någon form av ensning av respektive systems emitterbibliotek, något som kan förväntas vara påtagligt svårare om olika typer av system för radarsignalspaning ska samverka. Även med hårdvarumässigt identiska system kan samverkan försvåras genom att biblioteksensning över nationsgränser normalt inte är möjlig på grund av sekretess. Samverkan bör ändå vara möjlig genom att basera den relativa identifieringen på mindre detaljerade beskrivningar.

4.2 Nya möjligheter vid samverkan

Vid samverkan kan eventuellt en inmätare som är bra på identifiering stödja en sämre som väljer mellan flera alternativ. Skillnaden i förmåga kan bero på att det är fråga om olika systemtyper eller på att exempelvis signal/brus-förhållandet i den aktuella situationen skiljer för de två.

I vissa fall bör även samverkande system kunna stödja varandra för att undvika att en emitter uppfattas som två eller vice versa. Detta kan exempelvis vara aktuellt genom att två emitterar är väl vinkelseparerade från en inmätningssposition medan de sammanfaller från en annan.

Flera separerade inmätare ger även större möjligheter att analysera en radars antennavsökning vilket ökar säkerheten i identifieringen. En enkel spaningsradars rotationsriktning kan bestämmas när samverkan sker men inte när signalspaningssystemen uppträder enskilt. Det kan även vara enklare att analysera radar som använder exempelvis sektoravsökning, vilket eventuellt kan förbättra möjligheterna att klassificera och identifiera.

I ett framtidsperspektiv kan man tänka sig att emitterbibliotek uppdateras under pågående uppdrag genom att inmätningar av en plattform läggs till grund för nya biblioteksposter som överförs till andra enheter i nätverket.

5. Lägesbestämning genom samverkan

5.1 Lägesbestämningsprinciper vid samverkan

Lägesbestämning av radaremittrar innebär i många fall att positionen måste fastställas i tre dimensioner. För att förenkla beskrivningen avgränsas det fortsatta resonemanget till en tvådimensionell betraktelse.

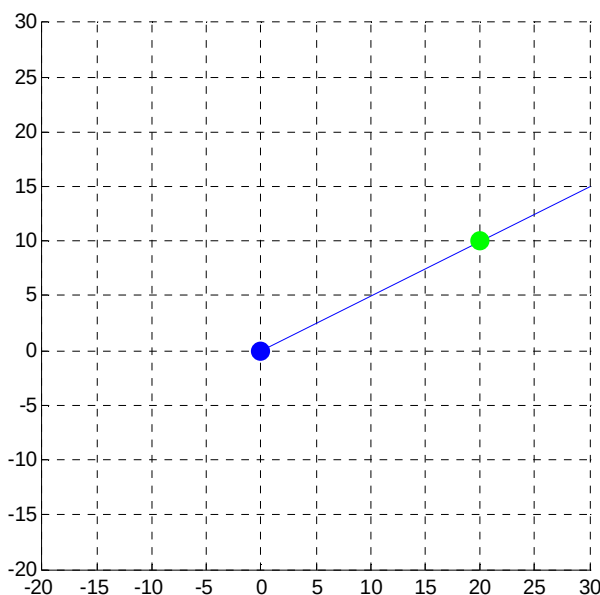
Vid lägesbestämning av en emitter med hjälp av radarsignalspaningssystem fås emitterpositionen normalt genom skärningar mellan två eller flera *lägeslinjer*. Lägeslinjer kan skapas med ett antal olika metoder och kan vara rätta linjer, hyperbelgrenar eller ha en mer komplex form. Metoder som har stor relevans vid samverkande lägesbestämning är:

- Riktningsbestämning
- Tidsskillnadsmätning – TDOA
- Frekvensskillnadsmätning – FDOA⁵

Utöver ovan nämnda metoder finns även möjlighet att skapa lägeslinjer genom att använda långbasinterferometri. Denna metod beskrivs dock här inte vidare eftersom fokus ligger på metoder som skapar användbara lägeslinjer momentant, vilket långbasinterferometri inte kan sägas göra.

Riktningsbestämning

Vid riktningsbestämning mäts en emittersignals infallsvinkel relativt en referensriktning. Lägeslinjen blir en rät linje som utgår från mätaren och idealt går genom emittern enligt figur 5.1. Någon bortre gräns för linjen finns inte i teorin, men eftersom en signals signal/brus-förhållande påverkas av avståndet mellan emitter och mätare, vilket i sin tur påverkar möjligheten att mäta in signalen, finns rent praktiskt en bortre gräns.



Figur 5.1 Riktningsbestämning ger upphov till en rät lägeslinje som utgår från det mätande signalspaningssystemet (blå cirkel) och passerar genom det verkliga emitterläget.

⁵ Frequency Difference Of Arrival

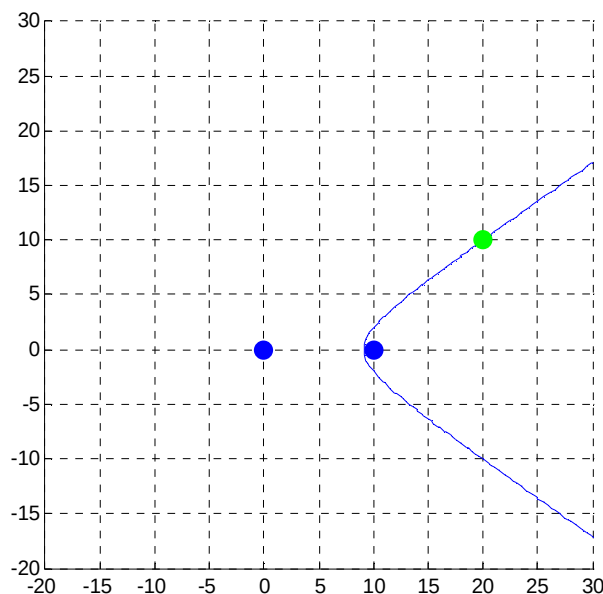
Mätning av infallsriktning kan ske på ett flertal sätt. Några exempel på metoder för riktningsbestämning är interferometri (som även kallas fasmonopuls), amplitudmonopuls och lobmaxpejling. En utförligare beskrivning av dessa återfinns i Andersson m.fl. [2].

Tidsskillnadsmätning - TDOA

Då en emittersignal kan mätas från två geografiskt separerade plattformar finns möjligheter att avgöra vilken skillnad i gångtid signalen har från emittern till respektive inmätare. Skillnaden är en direkt följd av att avståndet från emittern till respektive inmätare är olika, varför TDOA även kan sägas vara en mätning av gångvägsskillnad.

Ett sätt att erhålla tidsskillnaden är att mäta den absoluta ankomsttiden till respektive plattform varefter differensen i ankomsttid beräknas. Ett annat sätt är att direkt mäta skillnaden i ankomsttid genom exempelvis korrelation enligt beskrivningen i avsnitt 3.2.

En inmätt tidsskillnad mellan två inmätare ger upphov till en lägeslinje som utgörs av en hyperbelgren, se figur 5.2. Det kan dock vara värt att notera att om avståndet mellan inmätarna är litet i förhållande till avståndet till emittern kan hyperbelgrenen approximeras med två rätta linjer, hyperbelgrenarnas båda asymptoter utgående från mätbasens mittpunkt. TDOA kan i det fallet sägas vara en metod för riktningsmätning.



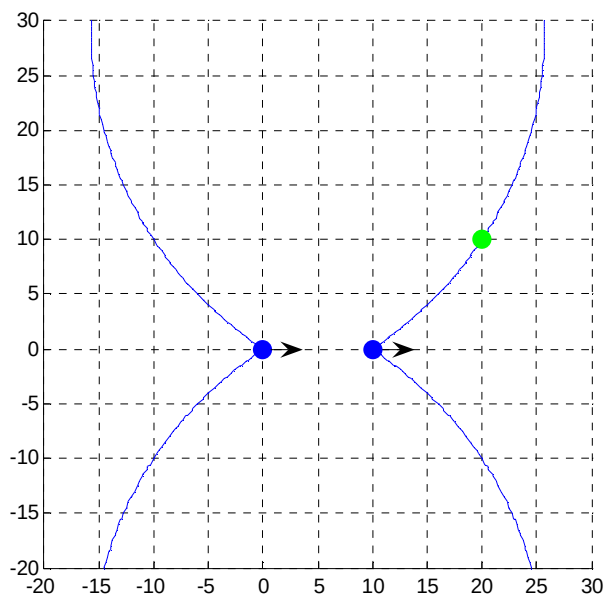
Figur 5.2 En mätning av ankomsttidsskillnad – TDOA – mellan två plattformar ger upphov till en lägeslinje i form av en hyperbelgren. Om avståndet mellan inmätarna är litet relativt avståndet till emittern kan lägeslinjen approximeras med två rätta linjer, hyperbelgrenarnas båda asymptoter utgående från mätbasens mittpunkt.

Frekvensskillnadsmätning - FDOA

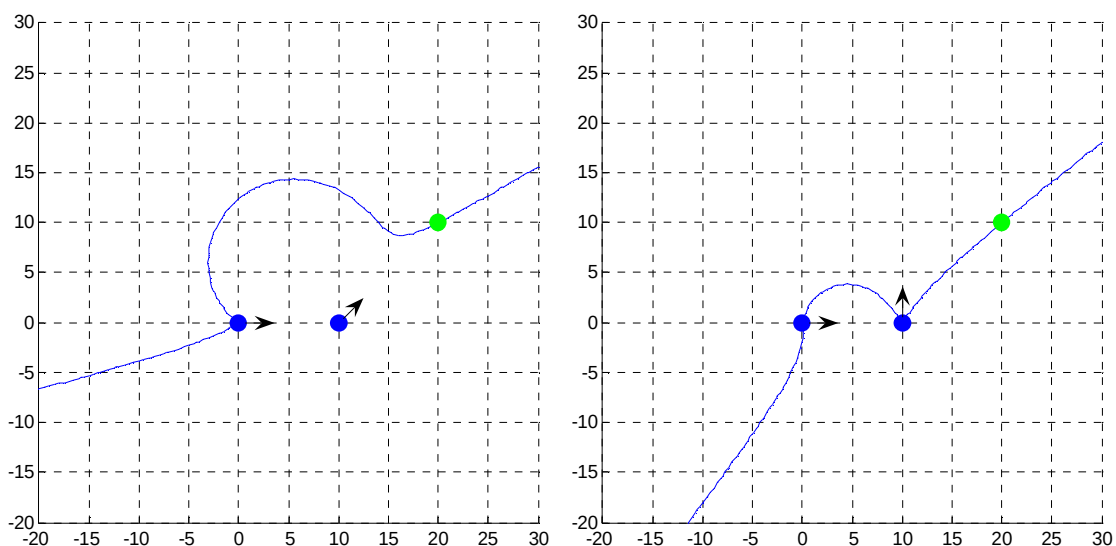
Emittersignalens bärfrekvens är en signalparameter som kan användas för att skapa en lägeslinje. En grundläggande förutsättning är då att geometrin är dynamisk, det vill säga att minst en av inmätarna rör sig relativt emittern. Rörelsen medför att den inmätta signalens frekvens är dopplerrörelsen relativt emitterns utsända bärfrekvens.

Dopplerskiftets storlek påverkas dels av emitterns bärfrekvens, dels av den radiella komponenten av hastigheten mellan emitter och aktuell inmätare. Det senare innebär att det finns information om emitterns läge dold i den inmätta momentana frekvensen.

Studeras skillnaden mellan två inmätta frekvenser kan en lägeslinje skapas. I figur 5.3 återfinns ett exempel på en lägeslinje skapad utifrån frekvensskillnaden mellan två inmätande plattformar. Emittenten var i det aktuella fallet stillastående medan de båda inmätarna förflyttade sig med samma hastighet längs x-axeln i den positiva riktningen.



Figur 5.3 Mätning av frekvensdifferens – FDOA – från två inmätare ger upphov till en komplex lägeslinje vars form dessutom beror av inmätarnas hastigheter. I det aktuella exemplet rör sig båda inmätarna med samma hastighet längs x-axeln i den positiva riktningen. En rörelse åt motsatt håll ger samma lägeslinje.



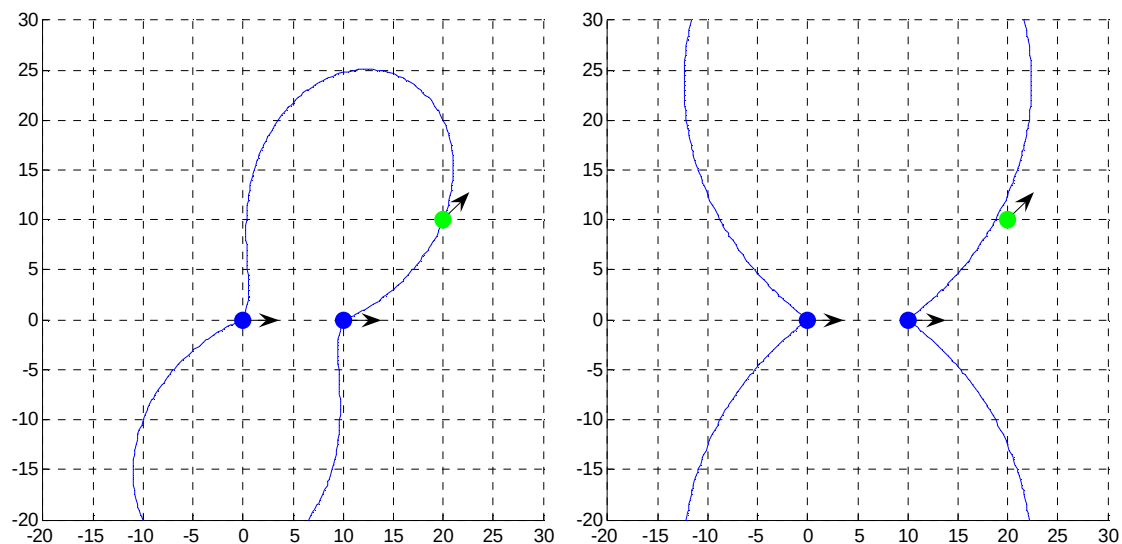
Figur 5.4 Lägeslinjen vid FDOA påverkas av inmätarnas hastigheter. I båda figurerna ovan har riktningen hos den högra inmätarens hastighet förändrats, vilket framgår av pilarna som anger hastighetsvektorns riktning.

Som tidigare nämnts påverkas den momentant uppmätta frekvensen och därmed frekvensskillnaden av den radiella hastigheten. Det får till följd att inmätarnas hastigheter påverkar utseendet hos lägeslinjen.

I figur 5.4 visas hur lägeslinjen ser ut för två olika alternativa hastigheter hos den högra plattformen. Det är naturligtvis fortfarande så att lägeslinjen går genom det verkliga emitterläget.

För att lägeslinjerna ska bli korrekta, det vill säga att det verkliga emitterläget återfinns i någon punkt på linjen, är det viktigt att samtliga hastigheter är kända till belopp och riktning. De inmätande enheternas hastighet utgör inget problem eftersom de kan mätas med exempelvis ett tröghetsnavigeringssystem. När det gäller emitterns hastighet är det betydligt svårare, eftersom det vanligen rör sig om en icke-kooperativ emitter. Ett sätt att få kunskap om emitterns hastighet är att försöka skatta den på samma sätt som positionen skattas. Det kräver fler inmätande enheter eftersom det är fler okända parametrar att skatta.

I figur 5.5 visas exempel på vilken konsekvens en felaktig uppfattning om emitterns rörelse får. I den vänstra delen antas hastigheten vara känd, vilket möjliggör skapandet av en korrekt lägeslinje som passerar det korrekta emitterläget. Om emittern i stället antas vara stillastående trots att den har en rörelse fås en felaktig lägeslinje enligt figurens högra del. Notera att det verkliga emitterläget inte återfinns på lägeslinjen.



Figur 5.5 En okänd rörelse hos emittern innebär en komplikation vid FDOA. I den vänstra delfiguren är emitterns hastighet känd, vilket leder till att en korrekt lägeslinje kan skapas. I den högra delen antas emittern vara stillastående, vilket är felaktigt. Följden blir att det sanna emitterläget inte återfinns på lägeslinjen.

Lägeslinjer blir emitterlägen

För att bestämma ett emitterläge måste minst två lägeslinjer kombineras. Om emittern är rörlig är det viktigt att lägeslinjerna representerar samma tidpunkt, i annat fall uppstår ett lägesfel. Hur många inmätare som krävs för att momentant generera två lägeslinjer beror på vilka metoder som ger respektive lägeslinje. Två inmätare räcker om flera metoder kombineras. Två inmätare räcker även om de båda ger lägeslinjer via riktningsmätning, en kombination som normalt brukar benämnas triangulering eller kryssspejling. Används enbart TDOA eller FDOA krävs tre inmätare eftersom ett inmätarpär endast ger en lägeslinje.

I praktiken görs ofta upprepade inmätningar vilket ger underlag för att skapa ett överskott av lägeslinjer. Dessa kommer på grund av mätfel normalt inte skära varandra i en punkt utan resultera i ett flertal skärningspunkter, vilket gör det opraktiskt att

beräkna emitterläget genom att direkt använda lägeslinjerna. Istället brukar någon form av lägesbestämningsalgoritm användas. Denna kan sägas genomföra en sammanvägning av inmätningarna och därefter beräkna det emitterläge som passar bäst med gjorda inmätningar.

När lägeslinjer skapade med samma eller olika metoder kombineras kan en ökad noggrannhet erhållas om lägeslinjerna skär varandra med stor vinkelskillnad.

Dessutom kan det vara intressant att kombinera metoder ur perspektivet att de kan ge olika bra prestanda mot olika typer av emittersignaler. Exempelvis kan TDOA fungera bra samtidigt som FDOA inte fungerar alls mot en viss signaltyp medan det omvända kan gälla för en annan signaltyp.

En intressant möjlighet med FDOA är att den kan användas för att skatta emitterns hastighet. En förutsättning som måste vara uppfylld är då att emitterns position är känd eller skattas genom användning av metoder som skapar lägeslinjer vars utseende inte påverkas av emitterns hastighet.

5.2 *Lägesbestämningsprocessen vid samverkan*

Vid samverkan mellan signalspaningssystem på separerade plattformar krävs att fördelningen av uppgifter sker på ett sätt som är väl anpassat till den taktiska situationen. De samverkande enheterna tilldelas olika roller i flödet från upptäckt till lägesbestämning och delgivning av det funna läget. Plattformarna kommer i den följande beskrivningen att delas in i två typer, bidragande och sammanställande plattformar. I beskrivningen antas den sammanställande plattformen ha uppgiften att dels styra över de bidragande plattformarna och dels slutgiltigt beräkna emitterläget med hjälp av information från de bidragande plattformarna. I ett verkligt fall behöver dock inte uppgiften att styra samverkan med nödvändighet var knuten till den sammanställande plattformen. En situation då detta är en mindre bra lösning är när den sammanställande plattformen inte befinner sig i samma framskjutna position som de bidragande plattformarna och därför inte har tillgång till samma signaler som dessa.

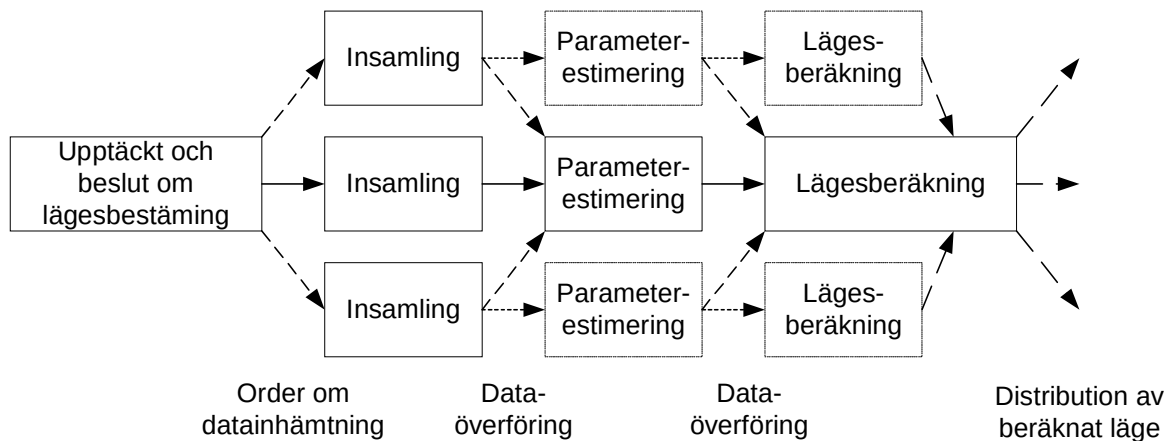
Informationen från de bidragande plattformarna kan vara av olika karaktär vilket beskrivs utförligare nedan. De bidragande plattformarna tar emot order från den sammanställande plattformen och genomför därefter inmätning och databearbetning. Slutligen förser de den sammanställande plattformen med efterfrågad information.

Rollfördelningen kan antingen vara statisk eller dynamisk. Om rollfördelningen är statisk innebär det att rollerna är låsta till respektive plattform och inte kan förändras från en inmätning till en annan. Konsekvensen av statisk rollfördelning är att den sammanställande plattformen alltid är styrande och ger order om hur de bidragande plattformarna ska söka efter emittrar och samla in data om dessa. En nackdel med ett denna rollfördelning är att den sammanställande plattformen får en nyckelfunktion, vilket kan öka systemets sårbarhet.

Vid dynamisk rollfördelning kan plattformarnas roller förändras så att en viss plattform i ett fall vara bidragande och i ett annat fall sammanställande. Följden blir att alla plattformar kan delta i upptäcktsuppgiften och låta den plattform som först upptäcker en intressant signal bli styrande för lägesbestämning av emittern. En förutsättning för att rollfördelning ska kunna förändras dynamiskt är att fler plattformar har möjlighet att bestämma läge och begära data från andra.

I figur 5.6 betraktas lägesbestämningsprocessen utifrån en, åtminstone för tillfället, låst rollfördelning. Den sammanställande plattformen har efterfrågat data från de bidragande

plattformarna. Dessa genomför sin insamling och därefter förädlas eventuellt informationen innan den förmedlas till den sammanställande plattformen. Slutligen genomför den sammanställande plattformen sin lägesbestämning. Resultatet blir ett emitterläge som eventuellt kan distribueras vidare.



Figur 5.6 En generell bild av lägesbestämningsprocessen ur ett tidsperspektiv. Tre plattformar samverkar för att bestämma ett läge, där en plattform har uppgiften som styrande. Den styrande plattformen begär information från de andra och samlar dessutom själv in data. Det efterföljande händelseförloppet beror på hur lägesbestämningen utförs.

Under förutsättning att de inledande delarna, ”Upptäckt och beslut om lägesbestämning” och ”Order om datainhämtning”, i figur 5.6 klarats av kan lägesbestämningsprocessen vid samverkan beskrivas enligt blockschemat i figur 5.7. Fokus ligger där på de olika funktioner som måste finnas på de samverkande plattformarna. En utförligare beskrivning av de ingående blockens funktion återfinns i de resterande delarna av det här avsnittet.

Data från angränsande system

Kunskap om position, attityd och eventuell hastighet är nödvändig för att kunna göra en lägesbestämning i samverkan med andra plattformar i ett globalt system. Relativa positioner mellan de inmätande enheterna kan vara tillräckligt, men då fås emitterläget i relation till dessa vilket kan göra det svårt att vidarebefordra data till andra delar i nätverket.

Tillgång till information om absolut tid och frekvens är viktig för vissa lägesbestämningsmetoder. Det kan vara tillräckligt om de samverkande plattformarna har samstämmig uppfattning om tid och frekvens.

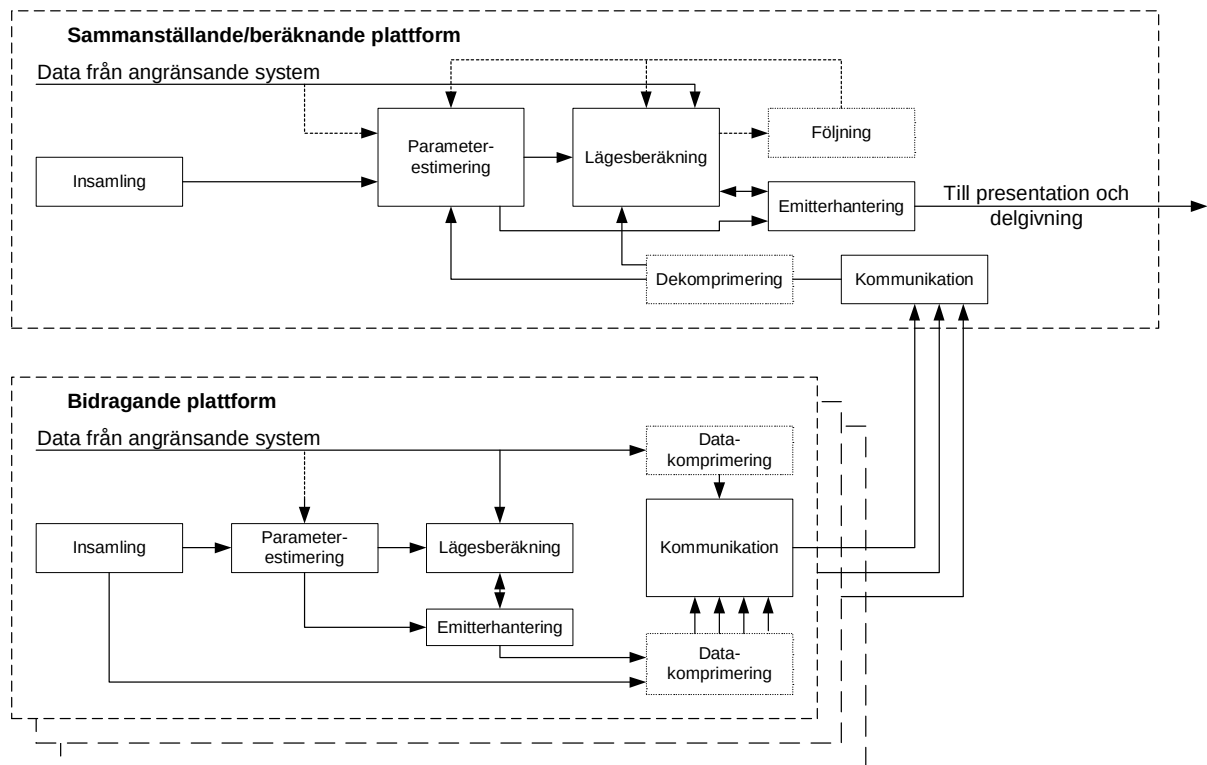
Frågeställningar rörande angränsande system berörs vidare i kapitel 7.

Insamling

Insamlingen vid samverkande lägesbestämning sker som en direkt följd av att ett beslut om inmätning tagits. Den sammanställande plattformen, som initierat processen, ger de bidragande plattformarna information så att de kan genomföra insamlingen på ett korrekt sätt. Exempelvis måste de förse med information om när i tiden samt inom vilken del av frekvensspektret som insamlingen ska göras.

Rent tekniskt kan insamlingen gå till på olika sätt. I ett modernt system digitaliseras ofta den mottagna signalen i ett tidigt skede varefter parameterestimeringen kan ske med digitala metoder. Det finns även system som genomför insamlingen i analog form. De

bidragande plattformarna vidarebefordrar då en del av det mottagna frekvensspektret transponerat till ett område som är lämpligt för överföringen.



Figur 5.7 En grupp av signalspaningssystem placerade på samverkande plattformar. Den sammanställande plattformen begär data från de bidragande plattformarna samt bestämmer ett läge med hjälp av informationen. De bidragande plattformarna levererar data med utgångspunkt från begäran och efter möjlig förmåga. Den sammanställande plattformen kan vara dynamiskt allokerad det vill säga tillsatt efter behov eller statiskt allokerad.

Parameterestimering, pulsdatabehandling och emitterhantering

Parameterestimeringen skattar ett antal grundläggande parametrar från den mottagna radarsignalen. För varje mottagen puls mäts normalt:

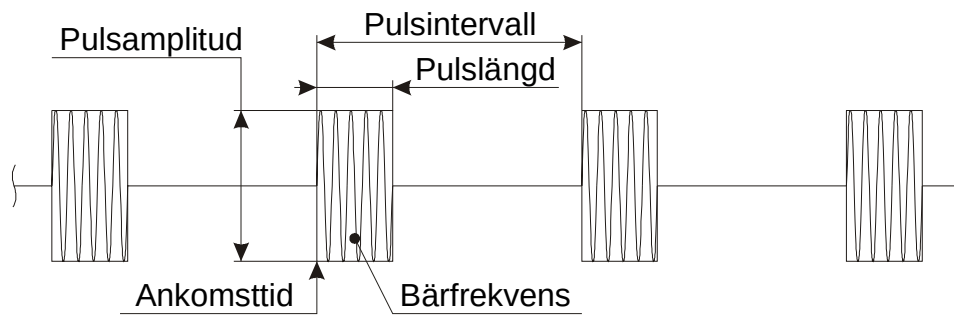
- Bärfrekvens
- Ankomstriktning
- Ankomsttid
- Pulslängd
- Pulsamplitud

Om systemet har möjlighet mäts också eventuell förekomst av *intrapulsmodulation*. Även polarisation kan mätas för varje puls men det är än så länge relativt ovanligt att taktiska system har denna mätförmåga.

Inmätta pulsdatabildar tillsammans en digital *pulsbeskrivning*. Eftersom en pulsbeskrivning skapas för varje mottagen puls kan parameterestimeringen i täta signalmiljöer leverera flera miljoner pulsbeskrivningar per sekund. För att bringa ordning i flödet och möjliggöra identifiering och lägesbestämning måste pulsbeskrivningar som avser en och samma radarsignal sammanföras till grupper, en process som brukar benämnas *pulssortering*.

Pulssorteringen sker normalt i ett första steg baserat på bärfrekvens, pulslängd och ankomstriktning. Eftersom en radar har möjlighet att variera bärfrekvensen och pulslängden från puls till puls är ankomstriktning en parameter som är speciellt betydelsefull för att hålla samman pulser som kommer från en och samma radar.

Radarstationers möjligheter att variera sin vågform i kombination med de begränsningar signalspaningssystemen har avseende mätnoggrannhet och mätupplösning medför ofta att den första sorteringen inte fullt ut separerar pulsbeskrivningar som kommer från olika emitterar. Det är därför nödvändigt med ett andra sorteringssteg där ankomsttiderna används för att analysera hur uppdelningen bör ske. Sorteringen är möjlig eftersom radarstationers tidsavstånd mellan utsända pulser – det så kallade *pulsintervallet* – oftast används i återkommande sekvenser, pulsintervallmönster. I sin enklaste form är pulsintervallet för en radarmod fast under en viss tid och då är det relevant att använda begreppet *pulsrepetitionsintervall* – PRI – och dess invers *pulsrepetitionsfrekvens* – PRF.



Figur 5.8 Några av de parametrar som kan mätas in från en pulsad signal. De som främst bär information om emitterns läge är bärfrekvensen och ankomsttiden. Pulsamplituden är också beroende av avståndet till emittern men den är mindre användbar för lägesbestämning. Utöver de i figuren markerade parametrarna skattas oftast även ankomstriktningen för varje puls, vilket kräver ett flerkanaligt riktningsmätande system.

När pulssortering är genomförd har idealt samtliga pulsbeskrivningar som representerar en radars sändning under en viss tidsperiod sammanförts utan inblandning av pulsbeskrivningar från andra mottagna radarsignaler. När grupperingen är genomförd brukar begreppen *pulsskurar* och *skurbeskrivningar* användas. En skurbeskrivning innehåller information från de pulsbeskrivningar som representerar den aktuella pulsskuren men inkluderar även sekvensen av pulsintervall.

Skurbeskrivningar samlas i en *aktiv emitterfil* som är en sammanställning av signaler som för tillfället tas emot – eller nyligen har tagits emot – av signalspaningsutrustningen. Den aktiva emitterfilen uppdateras, exempelvis avseende ankomstriktning, varje gång en ny skurbeskrivning från respektive radar finns tillgänglig. Skurbeskrivningarna i den aktiva emitterfilen jämförs med motsvarande data i ett eller flera bibliotek för att etablera en emitteridentitet och eventuellt en hotnivå som kan användas vid beslut om lägesbestämning.

Ett sätt att ytterligare förfinas informationen om emittern är att nyttja specifik emitteridentifiering. Då analyseras den mottagna vågformen ner till en detaljeringsgrad som syftar till att kunna särskilja signaler från olika individer av samma radartyp.

En mer uttömmande beskrivning av hanteringen av pulser och emitterar finns bland annat i Bergdal m.fl. [3]. Estimering av grundläggande parametrar beskrivs även i Wiley [10].

Fortsättningen på detta avsnitt behandlar de signalparametrar som bär information som är användbar vid gemensam lägesbestämning. De pulsparameterar som är aktuella är:

- Bärfrekvens
- Ankomstriktning
- Ankomsttid

Ytterligare en av de grundläggande pulsparametrarna – pulsamplituden – bär på information om emitterns läge. Amplituden påverkas av avståndet till emittern men även av många andra parametrar varför den är mindre användbar för lägesbestämning.

Med rörliga inmätare innehåller även pulsintervallet information om emitterläget eftersom det på samma sätt som bärfrekvensen påverkas av inmätarnas relativa rörelser i förhållande till emittern. Denna typ av dopplerbaserad lägesbestämning är speciellt användbar när radarns pulsgivning är mer stabil än bärfrekvensen, något som ofta är aktuellt hos äldre radarstationer som inte är konstruerade för att mäta hastighet. Lägesbestämningsprincipen skiljer sig inte från FDOA baserad på mätning av skillnad i bärfrekvens varför alternativet inte vidare särbehandlas.

Av ovanstående parametrar ger ankomstriktning enligt avsnitt 5.1 direkt en lägeslinje vilket är användbart såväl vid enskild som vid gemensam lägesbestämning. När signalspaningssystem samverkar kan jämförelser av ankomsttider respektive bärfrekvenser mellan inmätarna möjliggöra TDOA respektive FDOA genom att skillnader beräknas eller mäts. Det är viktigt att skillnaderna baseras på signal från samma emitter, det vill säga att den relativa identifieringen har lyckats.

För att undvika att generera falska lägeslinjer är det även väsentligt att tidsskillnaden mäts mellan ankomsttiderna för samhörande pulser och inte mellan pulser som lämnat radarn vid olika tidpunkter. Problematiken beskrivs i avsnitt 5.5, bland annat med hjälp av figur 5.15.

Skillnadsmätning mellan ankomsttider för enstaka pulser ger vid anständiga signal/brusförhållanden ofta potential för bra lägesnoggrannheter med TDOA. Noggrannheten i mätningen av ankomsttid avgörs bland annat av pulsens stigtid vilket i sin tur bestäms av signalens bandbredd. Högre bandbredd ger bättre noggrannhet. På motsvarande sätt ger för övrigt högre signalbandbredd även radarn möjlighet att mäta med bättre avståndsupplösning.

Mätning av bärfrekvensskillnaden mellan enstaka pulser är mindre användbart för att lägesbestämma med FDOA. Med pulslängder som är vanliga i radarsammanhang kan frekvensen endast bestämmas med en noggrannhet i storleksordningen MHz för de enskilda pulserna medan de dopplerskillnader som inmätarnas rörelse ger upphov till normalt är i storleksordningen kHz. Radar som vill mäta hastighet med hjälp av doppler har motsvarande problem och mäter därför normalt frekvens över ett stort antal koherenta pulser.

Den tidigare nämnda parameterestimeringsmetoden CAF är ett elegant sätt för signalspaningssystem att samtidigt erhålla tids- och frekvensskillnadsmätning baserat på ett valfritt antal pulser. När radarsignalerna så medger förbättras då både noggrannheten i tids- och frekvensskillnadsmätningen. Med rätt förutsättningar kan frekvensmätningen

nå osäkerheter på i storleksordningen 10 Hz, vilket är en god grund för noggrann lägesbestämning.

För att kunna använda CAF måste dock den aktuella vågformen överföras mellan de samverkande plattformarna. Metoden är därmed mer krävande avseende länkens överföringskapacitet. Med hjälp av datakompression kan dock behovet minskas.

Datakomprimering

Mängden data som ska överföras från den bidragande plattformen till den sammanställande plattformen varierar som bekant med bland annat vald samverkansprincip.

I de fall då kommunikationsresursen inte räcker för att täcka den aktuella lägesbestämningsmetodens behov av dataöverföring kan någon form av datakompression nyttjas. Denna måste hos den mottagande plattformen kompletteras med en funktion för dekompression – återställande av ursprungsdata.

Datakompression är i grunden ett sätt att utnyttja den redundans som kan finnas i data. Denna kan reduceras genom att data representeras på ett effektivare sätt, vilket även innebär en reduktion av datamängden. Kompressionen kan genomföras på ett icke förstörande sätt – distorsionsfri kompression – eller delvis förstörande med ett visst mått av distorsion. Distorsionsfri kompression innebär att ursprungsdata kan återskapas exakt. Distorsionsfri kompression har en teoretisk gräns för kompressionsgraden (förhållandet mellan datamängdens storlek före respektive efter kompressionen), vilken i sin tur beror på redundansen i datamängden. Om det rör sig om stora datamängder kan ofta vinsten av en distorsionsfri kompression vara otillräcklig. Finns det möjlighet att acceptera att kompressionen ger upphov till distorsion i återskapade data kan andra kompressionsmetoder, som kan öka kompressionsgraden väsentligt, användas. Värt att notera är dock att data i vissa fall absolut inte får förvrängas vid överföringen. Exempel på sådana fall kan vara den bidragande plattformens position och hastighet eller av den bidragande plattformen beräknade emitterlägen. I denna typ av information är all data viktig.

Betydelsefullt för att kompressionen inte ska förstöra informationen är att de väsentliga delarna bevaras på ett bra sätt. Vad som är väsentligt varierar bland annat beroende på tillämpning. Det leder i sin tur till att algoritmer och matematiska verktyg för att genomföra och analysera kompressionens inverkan också varierar beroende på tillämpning.

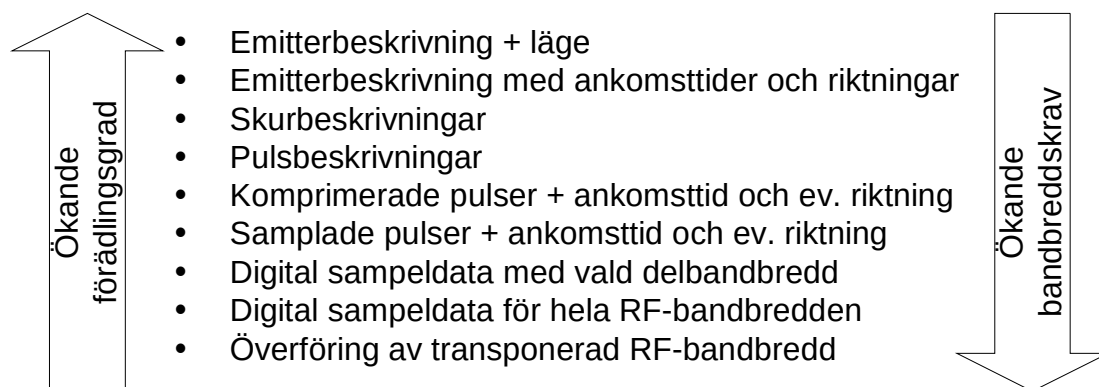
I en artikel av Fowler [11] presenteras ett förslag på matematiskt verktyg för att analysera olika metoder för kompression av emittersignaler i syfte att lägesbestämma en emitter. Fowler pekar här på vikten av att inte använda sig av traditionella mått för att beskriva den distorsion som kompressionen ger upphov till. Det är istället viktigt att analysera vilka delar av signalen som påverkar den efterföljande lägesbestämningens prestanda mest och sedan fokusera på att bevara dem. I artikeln introduceras två separata distorsionsmått som visar hur en kompression påverkar noggrannheten i skattning av frekvens- respektive tidsskillnad mellan två signaler. Dessa distorsionsmått kan i nästa steg användas för att jämföra olika kompressionsalternativ med varandra. En kvarstående svårighet är dock avvägningen mellan distorsion i tidsskillnad och distorsion i frekvensskillnad, vilken kan behöva göras när länken har begränsad kapacitet.

Det är dessutom så att det geometriska förhållandet mellan emitter och inmätare har stor betydelse för om det är tidsskillnads- eller frekvensskillnadsskattningen som bidrar mest till lägesnoggrannheten. Det leder i sin tur till att det är svårt att bestämma hur en av

kompression tillförd distorsion ska fördelas mellan tidsskillnads- och frekvensskillnads-skattningen.

Överförd signalspaningsinformation

Samverkan mellan plattformar kring lägesbestämning av emitterar kan ske på olika sätt och med olika grad av integration. Delandet av information kan ske på olika nivåer. I ett informationsutbyte på hög nivå kan plattformarna skicka en emitterbeskrivning eller någon form av identitet tillsammans med ett emitterläge. Vid denna typ av samverkan sker lägesbestämningen hos de enskilda plattformarna och någon form av sammanvägning av de olika alternativen sker för att öka noggrannheten i läget och säkerheten i emitteridentifieringen. Vid lägre nivåer av informationsutbyte har data som skickas mellan plattformarna en lägre förädlingsgrad och lägesbestämning av emittent sker enbart genom samverkan. Ett samverkansfall motsatt det först nämnda är att en insamlade – bidragande – plattform skickar ett intressant parti av frekvensspektret så som den ses lokalt till en sammanställande plattform som gör allt arbete med parameter-skattning och lägesbestämning. Figur 5.9 visar en hierarkisk listning av några tänkbara fall sorterad från en hög förädlingsgrad till en låg, samt hur detta påverkar kravet på förbindelsens bandbredd. En hög grad av förädling hos den bidragande plattformen leder ofta till att en mindre mängd data behöver skickas till den sammanställande.



Figur 5.9 När informationen som överförs till den sammanställande plattformen har en hög förädlingsgrad krävs lägre överföringskapacitet än om förädlingsgraden är låg.

Lägesberäkning

Lägesberäkning är benämning på den del av processen som omvandlar estimerade signalparametrar till ett emitterläge. För att lägesberäkning ska vara möjlig är det nödvändigt att ha tillgång till samtliga inmätande plattformars position. Den informationen kan fås från respektive plattformars navigeringssystem. I fallet att de samverkande plattformarna har förmåga att välja mellan olika metoder för generering av lägeslinjer kan med fördel en metod väljas som passar för den aktuella emittentens signaltyp och inmätarnas inbördes geometri. Skälet är att det då kan vara möjligt att öka noggrannheten i det beräknade läget samt undvika problem med mångtydigheter.

Lägesbestämning vid samverkan kan ske på i huvudsak två sätt. Antingen kan lägesberäkning ske på både den bidragande och den sammanställande plattformen eller endast på den sammanställande plattformen.

Om de bidragande plattformarna beräknar emitterlägen kan den sammanställande plattformens lägesbestämning inriktas mot att endast väga samman erhållna lägen till ett mer noggrant läge. I detta fall kan den sammanställande plattformen helt sakna förmåga att

genomföra inmätning och parameterestimering. För att sammanvägningen av ett antal lägesestimater ska ge ett bra slutresultat är det en fördel om de bidragande plattformarna har förmågan att bedöma och förse den sammanställande plattformen med ett mått på kvaliteten, exempelvis en felellips, på sina lägesestimater. Resultatet av sammanvägningen förbättras då sannolikt eftersom de olika estimaterna kan vikta så att deras påverkan på slutresultatet varierar. En annan aspekt som gör detta alternativ attraktivt är att datamängden som behöver överföras till den sammanställande plattformen blir liten.

Ett annat skäl till att de bidragande plattformarna kan ha förmåga att lägesbestämma är att de i vissa fall kan tvingas uppträda enskilt. För det första så kan det taktiska läget kräva ett helt tyst uppträdande. För det andra så är det inte säkert att möjligheten att kommunicera med en sammanställande plattform alltid existerar. För det tredje är det inte säkert att emittersignalen uppfattas och mäts in från mer än en plattform vilket omöjliggör lägesbestämning via samverkan.

Ett samverkansalternativ innebär att endast den sammanställande plattformen har förmåga att genomföra lägesbestämning. De bidragande plattformarnas uppgift blir då att genomföra inmätning av signalen och eventuellt genomföra parameterestimering, samt föra över informationen till den sammanställande plattformen. I detta samverkansalternativ saknar de bidragande plattformarna helt förmåga att uppdatera sin egen lägesbild. Om de bidragande plattformarna är beroende av en lägesbild måste de förse med information till denna på annat sätt.

En möjlighet som öppnar sig då den samverkande plattformen lägesbestämt en emitter är att gå över i följdning. Det innebär att algoritmen för lägesbestämning förenklas tack vare att det föregående emitterläget kan användas som startvärde för beräkningen. Även vid parameterestimeringen kan det vara en fördel att ha ett ungefärligt värde på emitterläget. Det leder dels till att risken för mångtydigheter minskar och dels till att beräkningstiden minskar.

5.3 Yttäckning vid samverkande lägesbestämning

I avsnitt 3.1 behandlades hur samverkan mellan flera inmätare utökar det gemensamma upptäcktsområdet relativt motsvarande område för en enskild inmätare. Med samma resultat kan yttäckningen för lägesbestämningen utökas om inmätarna utför den var för sig och inmätta lägen därefter distribueras.

Om lägesbestämningen ska kunna ske med bättre prestanda måste dock två eller fler radarsignalspanande system ha den aktuella radarn inom sin räckvidd så att lägesbestämningen kan ske gemensamt. En konsekvens av detta är att yttäckningen vid samverkande lägesbestämning är mindre än upptäcktsområdet för en enskild inmätare. Metoder som kräver tre inmätare ger mindre täckningsområden än de som utnyttjar två, vilket framgår av figur 5.10.

Skillnaden mellan täckningsområden vid upptäckt respektive lägesbestämning kommer att medföra att den samverkande lägesbestämningsprocessen som beskrivs i avsnitt 5.2 ibland inte kommer att kunna fullföljas på grund av att de plattformar som förväntas bidra inte har emittern inom räckvidden.

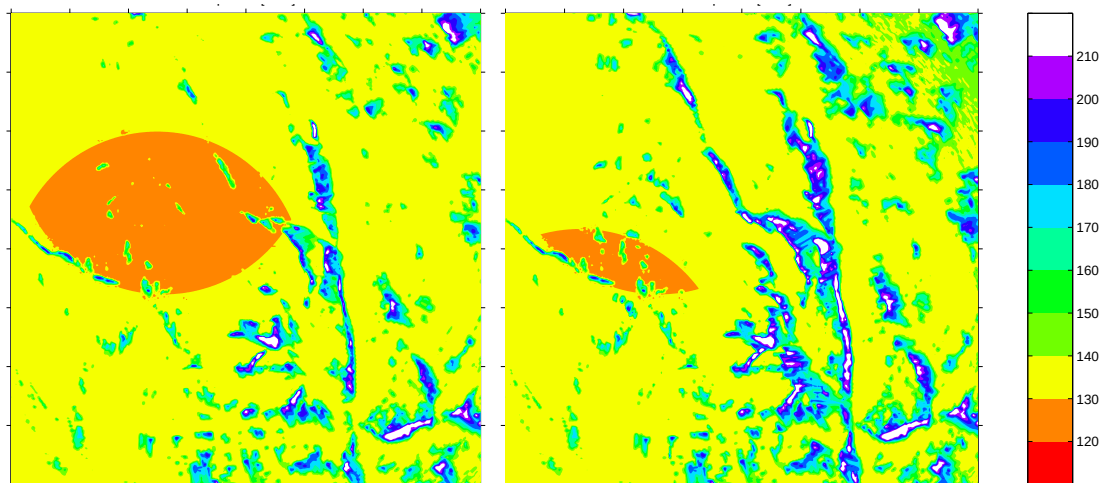
Figur 5.10 är principiell och tar inte hänsyn till att radar i de flesta fall utnyttjar riktantennor. Förenklingen har speciellt betydelse när lägesbestämningen sker med metoder som kräver att de samverkande systemen gör mätinsamlingarna helt samtidigt, exempelvis vid tidsskillnadsmätning. Eftersom smala riktlober endast i undantagsfall kan antas belysa flera separerade inmätare samtidigt måste systemkänsligheten medge

att den gemensamma lägesbestämningen även sker när en eller flera inmätare endast är belysta av radarns sidolober.

Parameterestimering med så kallade korrelerande metoder har dock egenskapen att även signaler med förhållandevis lågt signal/brus-förhållande kan hanteras. Genom att utnyttja digitala mottagare och eventuellt även bredbandiga gruppantennor med elektriskt styrda lobar kan dessutom systemkänsligheter nås som medger mottagning i radarns sidolobar från ganska stora avstånd. Används styrbara lobar kan en grov lägesinvisning från den begärande plattformen vara värdefull för att minimera behovet av antennisökning.

Avslutningsvis kan konstateras att aktuell yttäckning vid samverkande lägesbestämning påverkas av ett stort antal parametrar. Vad gäller gruppering är en tät formering önskvärd för att alla ingående enheter ska ha samma signaler inom räckvidden, men en gles formering önskvärd för att erhålla geometriska mätbaser som ger emitterlägen med god noggrannhet.

I den mån den inbördes grupperingen av plattformarna kan tillåtas påverkas av vad som är gynnsamt för radarsignalspaning och radarvarning är utfallet troligen ett resultat av en kompromiss mellan motstridiga krav.



Figur 5.10 Figuren illustrerar principiellt hur området där gemensam lägesbestämning kan utföras minskar när tre inmätare (högra delfiguren) används istället för två (vänstra delfiguren). Jämfört med upptäcktsområdet för en enskild inmätare är yttäckningen i båda fall sämre, se högra delfiguren i figur 3.1. Vid jämförelsen ska storleken på områden med samma färg studeras. Figurerna är hämtade från Eriksson [5].

5.4 Noggrannhet och snabbhet vid samverkande lägesbestämning

Prestandaförbättringar i form av snabb och noggrann lägesbestämning är sannolikt den största fördelen vid samverkan jämfört med enskilt uppträdande. Orsaken är dels att flera separerade inmätare momentant ger en geometrisk mätbas, dels att flera inmätare öppnar möjligheten att använda metoder som baseras på skillnadsmätningar, exempelvis TDOA.

Genom att kombinera lägeslinjer genererade med en eller flera metoder enligt avsnitt 5.1 fås idealt en skärningspunkt vid det korrekta emitterläget. Oavsett metod kommer dock inverkan av brus medföra att lägeslinjen breddas, det vill säga upprepade mätningar ger lägeslinjer som sprider något kring det felfria alternativet.

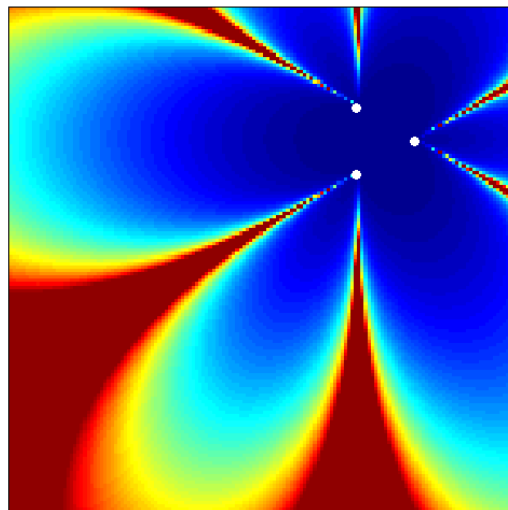
Hur stor spridningen blir beror dels på mätosäkerheten vid estimeringen av den parameter som den aktuella lägesbestämningsmetoden utnyttjar, dels på var emittern finns längs lägeslinjen. Eftersom minst två lägeslinjer är involverade vid lägesbestämningen påverkas den resulterade lägesnoggrannheten av spridningen hos var och en av dessa.

Lägesnoggrannheten är även i hög grad beroende av skärningsvinkeln mellan de aktuella lägeslinjerna. Bäst resultat fås när lägeslinjerna skär varandra i rät vinkel, medan en liten skärningsvinkel ger ett osäkerhetsområde som kan vara mycket utdraget i en dimension. Eftersom formen på lägeslinjer är starkt beroende av de metoder som skapat dem – enligt avsnitt 5.1 – påverkas skärningsvinkeln av både aktuell geometri och valda metoder.

Sammantaget gäller att lägesnoggrannheten – för varje kombination av metoder – ges av produkten av en faktor sammansatt av mätonoggrannheter och en geometrisk faktor som bestäms av inmätarnas och emitterns inbördes positioner. Den geometriska faktorn brukar på engelska betecknas *GDOP*⁶. Den påverkas vid FDOA av inmätarnas hastigheter, både till belopp och till riktning.

För att nå bästa lägesnoggrannhet finns det sannolikt i varje given situation en bästa kombination av metoder som genererar lägeslinjer. Vilken denna kombination är bestäms av:

- Med vilken noggrannhet respektive parameter kan estimeras
- Inbördes geometri mellan inmätarna och mellan inmätarna och emittern, se figur 5.11
- Relativa rörelser hos inmätarna och emittern



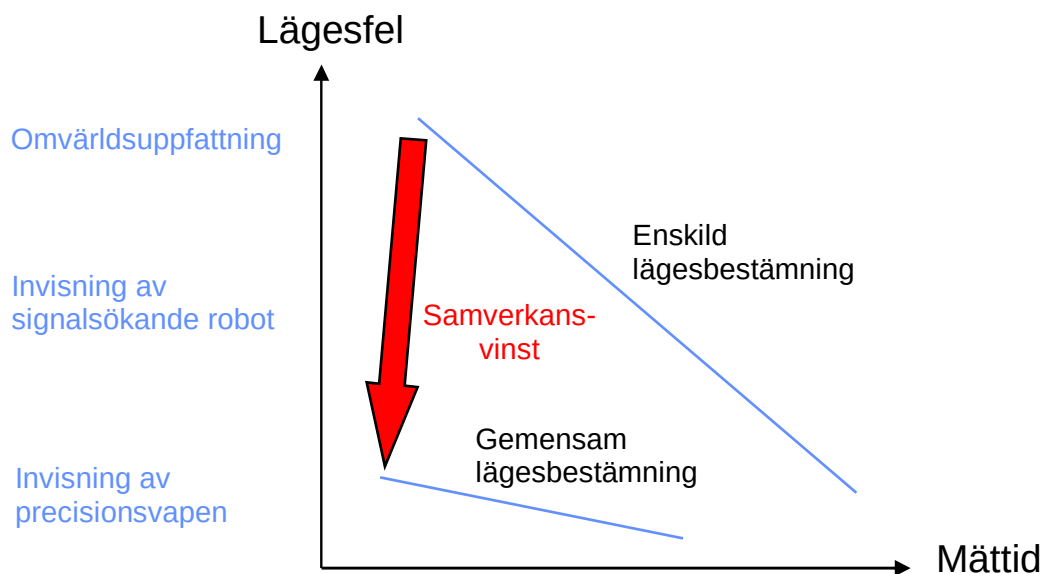
Figur 5.11 Principbild som visar att lägesnoggrannheten i hög grad beror av var målet befinner sig i förhållande till inmätarna. I exemplet samverkar tre inmätare (markerade med vita punkter) genom att lägesbestämma med TDOA. I blå områden är noggrannheten hög medan de mörkt röda partierna ger dåligt resultat. De senare återfinns framförallt i mätbasernas förlängningar där de aktuella lägeslinjerna skär varandra i ogynnsamt spetsig vinkel.

⁶ Geometric Dilution Of Precision

Generellt gäller att ökande mättid ger potential till bättre lägesnoggrannhet, se figur 5.12. Vid stationära inmätare beror detta på att flera inmätningar kan göras, vilket kan ses som osäkerheten i parameterestimeringen minskar. Vid rörliga inmätare beror det dels på fler inmätningar, dels på att den geometriska mätbas kan bli längre. Vid FDOA kan dessutom ökande mättid innebära att inmätarnas hastigheter förändras till belopp eller riktning, något som med denna metod är gynnsamt för lägesnoggrannheten.

Snabb och noggrann lägesbestämning med system för radarsignalspaning har de senaste åren varit ett uppmärksammat område internationellt och som framgår av rapportens inledning har det även varit huvudfokus för projektgruppen. Tillämpningar finns bland annat inom *SEAD – Suppression of Enemy Air Defences*, där snabbheten ofta är nödvändig för att hinna fastställa radarns position även vid korta sändningstider. Noggrannheten är önskvärd för att kunna verka med precisionsvapen trots att radarn har slutat sända.

I USA pågår det SEAD-inriktade utvecklingsprojektet AT3 där målsättningen är att med flygburna radarsignalspaningssystem, från långa avstånd, lägesbestämma markbaserade radarsystem med noggrannheten 35-50 m inom 10 sekunder. Framgångsrika demonstrationer påstås ha genomförts. Systemet använder samverkande lägesbestämning i form av en kombination av TDOA och FDOA.



Figur 5.12 Oavsett om lägesbestämningen sker enskilt eller genom samverkan mellan flera inmätare ger ökande mättid potential för bättre lägesnoggrannhet. När flera inmätare tillsammans utför lägesbestämningen kan noggrannheten redan efter kort tid i gynnsamma fall medge invisning av precisionsvapen.

Ett annat systemexempel är det tjeckiska signalspaningssystemet VERA-E som används för luftbevakning. Systemet är markbaserat men mobilt och lägesbestämningen baseras på TDOA med minst tre inmätare varav en är sammanställande. Noggrannheten anges till 10-100 m. Uppdateringstakten och processorkapaciteten medger följning av upp till 200 mål samtidigt.

För att nå noggrannheter på i storleksordningen tiotals meter är det viktigt att positionen hos inmätarnas antenner är bestämd med stor noggrannhet. Detsamma gäller deras hastigheter om FDOA används. Vid FDOA är dessutom nödvändigt att inmätarna har en

gemensam frekvensreferens. För TDOA krävs istället noggrann tidssynkronism. Problematiken berörs i kapitel 7.

5.5 Entydighet vid samverkande lägesbestämning

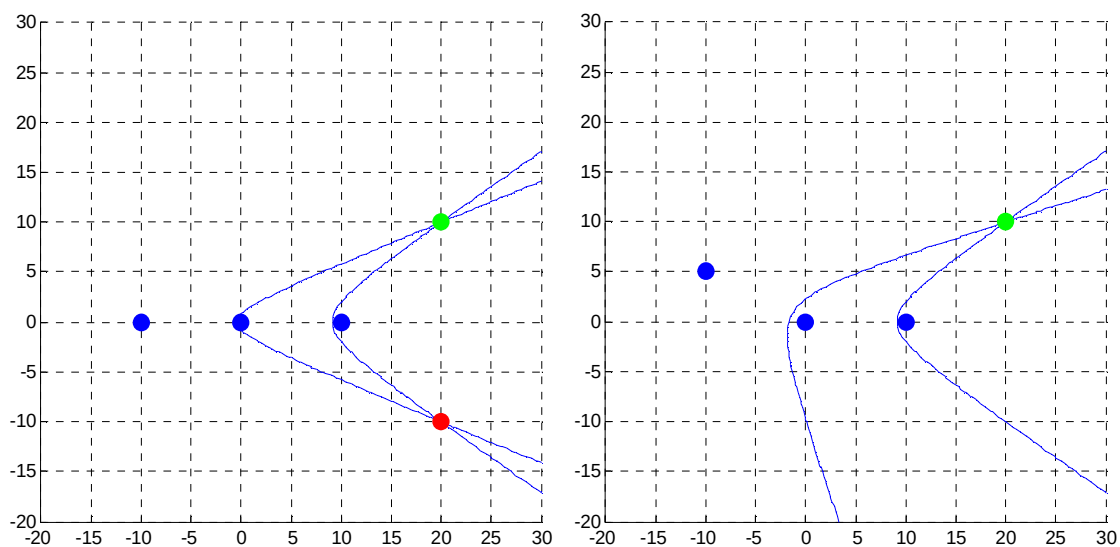
Mångtydigheter vid lägesbestämning är ett påtagligt problem vid både enskild lägesbestämning och samverkan. Ett falskt läge som är ett resultat av en mångtydighet kan inte skiljas från det riktiga läget, varför en analys av läget och geometrin bör göras för att kunna indikera om risk för mångtydigheter finns. Visar analysen att det skattade läget har fler – lika troliga – alternativ behövs mer information för att rätt läge ska kunna pekats ut. Exempelvis kan ett utpekat emitterläge vara orimligt ur räckvidds-synpunkt. Är det inte möjligt att tillföra mer information bör de system som senare hanterar emitterlägena ha möjlighet att indikera att de härrör från samma emitter.

Mångtydig lägesbestämning kan uppstå av fler orsaker. I vissa fall skär två lägeslinjer varandra i mer än en punkt. Om så sker beror på vilka metoder som har genererat lägeslinjerna och på den aktuella geometrin. I andra fall beror det på att parameterestimeringen är mångtydig och därmed resulterar i alternativa lägeslinjer. Avgörande för om parameterestimeringen blir mångtydig är hur radarns vågform passar den metod som används för att generera lägeslinjer.

Mångtydigheter orsakade av metod och geometri

Den mångtydighet som uppstår när två lägeslinjer skär varandra i mer än en punkt brukar benämnas den *fundamentala mångtydigheten*.

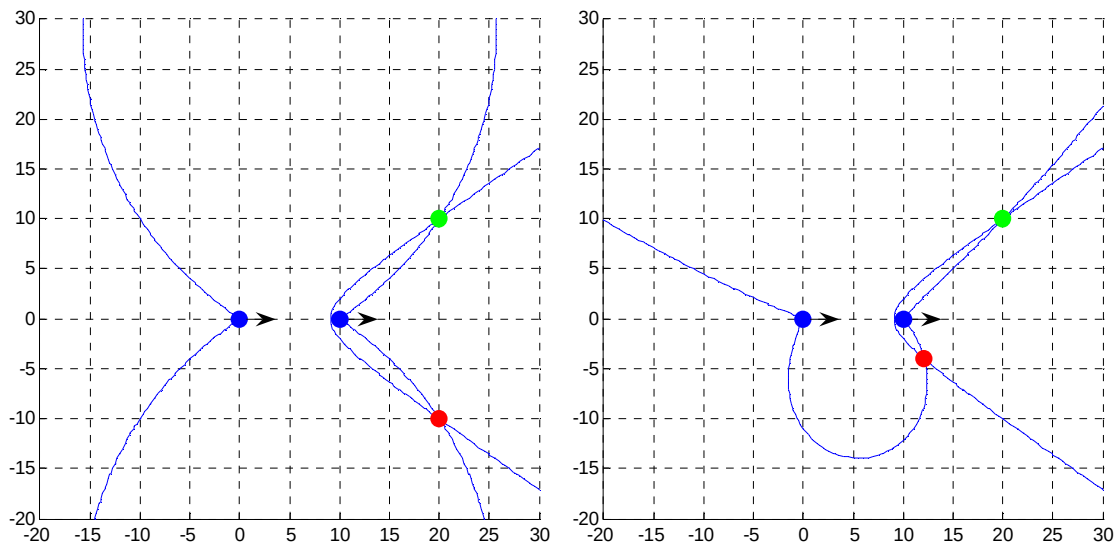
Den fundamentala mångtydigheten resulterar normalt i två alternativa lägen som är en projektion av varandra i någon kurva. Ett exempel på detta är vid TDOA med tre inmätare grupperade på en rät linje enligt vänstra delfiguren i figur 5.13. Oavsett var emittern är belägen kommer aktuell geometri medföra att de båda lägeslinjerna blir symmetriska i förhållande till en linje genom de tre inmätarna. Två alternativa lägen kommer därför att produceras där det falska är en spegling av det korrekta i nyss nämnd linje.



Figur 5.13 Till vänster syns ett exempel på fundamental mångtydighet vid lägesbestämning med TDOA. Det emitterläge som är markerat med grön cirkel är det riktiga. Utan ytterligare information kan det falska alternativet – markerat med röd cirkel – inte skiljas från det korrekta. I den högra figuren är inmätningengeometrin annorlunda vilket medför att lägeslinjerna skär varandra i endast en punkt och resultatet är entydigt.

Som framgår av högra delfiguren i figur 5.13 ger tre inmätare som lägesbestämmer med TDOA entydig lägesbestämning för vissa geometrier. Det går dock inte gruppera tre inmätare så att resultatet, oavsett emitterposition, alltid blir entydigt. Vänstra delfiguren i figur 5.17 visar en analys av vilka områden som ger entydighet när de tre inmätarna är grupperade i hörnen på en liksidig triangel.

Den fundamentala mångtydigheten existerar även vid andra kombinationer av lägeslinjer exempelvis TDOA och FDOA. Här påverkar även plattformarnas hastigheter resultatet, se figur 5.14.



Figur 5.14 En kombination av TDOA och FDOA för lägesbestämning. I delfiguren till vänster är det falska läget en spegling av det riktiga. I den högra är hastighetsvektorerna förändrade varför lägeslinjen för FDOA blir förändrad och därmed får det falska läget en annan placering.

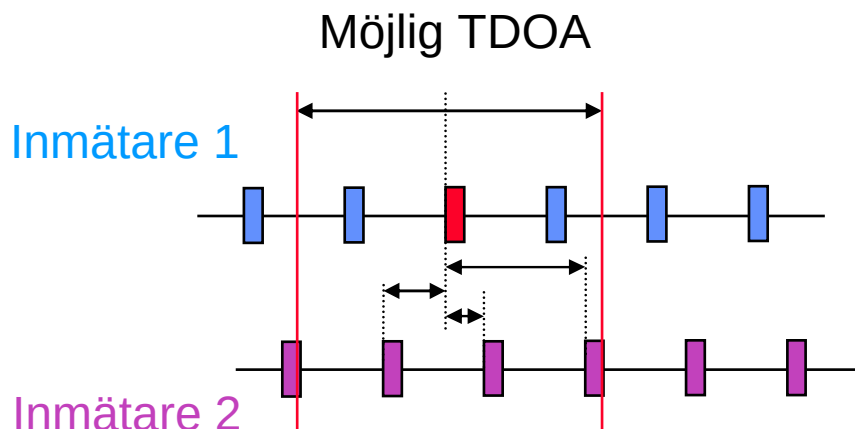
Mångtydigheter förorsakade av parameterestimeringen

När TDOA används för att skapa lägeslinjer måste gångtiden mellan de två inmätande plattformarna vara mindre än hälften av radarsignalens pulsrepetitionsintervall. Är signalen inte pulsmodulerad men har någon typ av återkommande modulation är det halva tiden för repetitionen i modulationsmönstret som är styrande. Uppfylls inte villkoret ovan kommer en osäkerhet i den inmätta tidsdifferensen motsvarande en multipel av repetitionsintervallet att finnas enligt figur 5.15. Denna osäkerhet ger upphov till fler lägeslinjer och därmed fler skärningar med andra lägeslinjer. Resultatet blir då ett antal alternativa lägen.

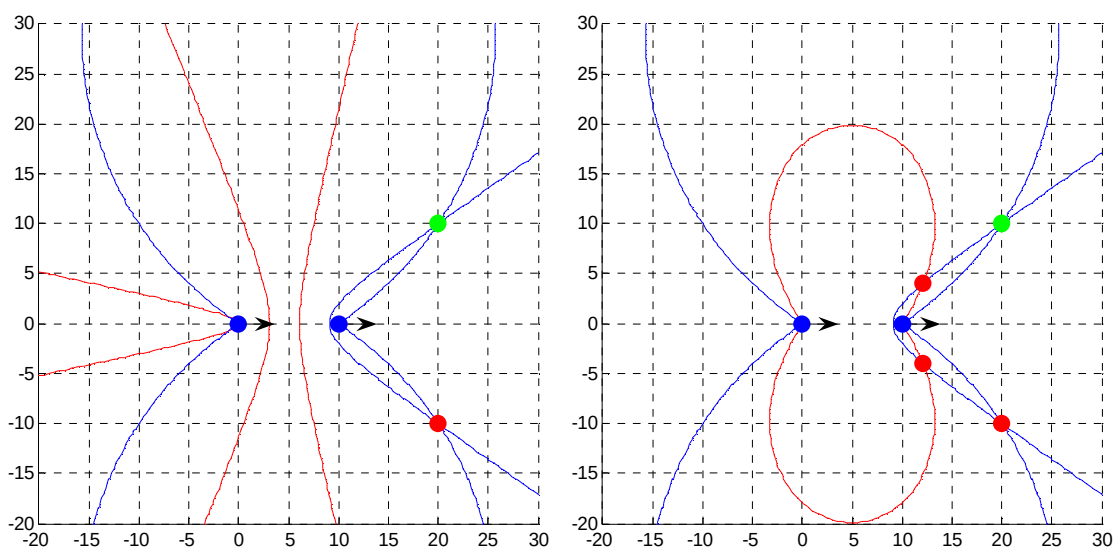
Även vid frekvensmätning av sekvenser med pulsmodulerade signaler kan mångtydigheter uppkomma. Orsaken är att signaltypen har ett antal frekvenskomponenter som endast är separerade med pulsrepetitionsfrekvensen. Signalens bärfrekvens ska normalt vara kraftigast men amplituden hos angränsande frekvenskomponenter kan vara likartad vilket medför att det under inverkan av brus kan vara svårt att göra rätt val.

Innan valet sker finns således alternativa lägeslinjer på motsvarande sätt som i fallet med TDOA, se figur 5.16.

I det specifika fall som presenteras i figur 5.16 finns det ingen pulsrepetitionsfrekvens – med dess invers pulsrepetitionsintervall – som kan ge alternativa lägeslinjer för både TDOA och FDOA samtidigt. Detta behandlas mer i följande avsnitt.



Figur 5.15 Tidsdifferensmätning kan resultera i felaktiga tidsdifferenser där felet är en multipel av pulsrepetitionsintervallet. Detta beror på att gångtiden mellan de inmätande plattformarna är större än ett halvt pulsrepetitionsintervall. Då finns en osäkerhet om skillnaden mäts mellan ankomsttiderna för pulser som lämnat radarn vid en och samma tidpunkt eller mellan pulser som lämnat radarn vid olika tidpunkter. Den röda pulsen är i exemplet referens. Den dubbla gångtiden, det vill säga det möjliga intervallet för tidsskillnads-mätningen, markeras med den översta pilen. Med aktuell geometri och givet PRI kan tre tidsskillnader mätas varav en får motsatt tecken jämfört med de båda andra.

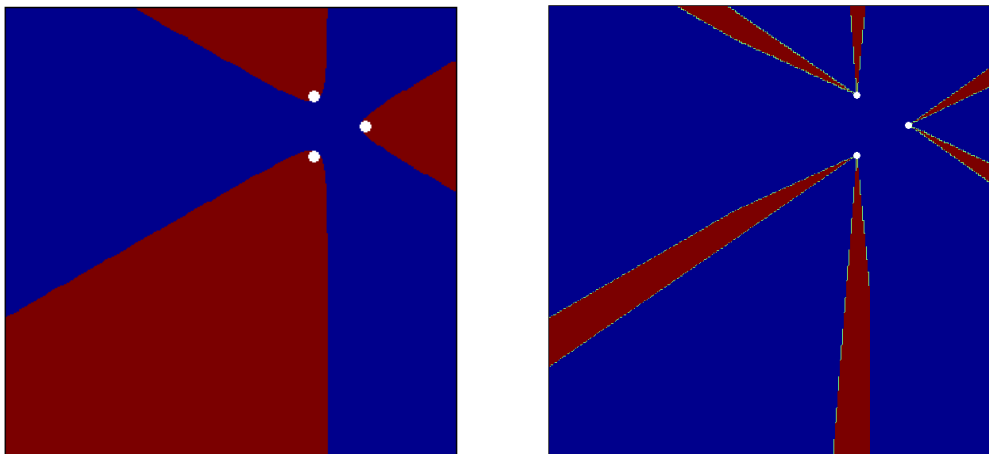


Figur 5.16 En principbild över två fall med kombinationen TDOA och FDOA. I den vänstra bilden förorsakar ett kort pulsrepetitionsintervall fyra alternativa lägeslinjer för TDOA, varav en är korrekt (blå) och tre felaktiga (röda). Dessa ger alternativa lägen i skärningen med lägeslinjen för FDOA. Fyra av skärningarna ligger utanför presenterat område och två ligger väldigt nära den vänstra inmätaren och kan därför inte markeras tydligt. I den högra bilden uppkommer motsvarande mångtydigheter då frekvensskattningen är mångtydig (på grund av en låg pulsrepetitionsfrekvens). FDOA ger i det här fallet en alternativ lägeslinje (röd).

Att åstadkomma entydighet

Då existensen av falska lägen inte är uppenbar vid lägesbestämning måste först någon form av åtgärd vidtas för att säkerställa om ett beräknat läge är entydigt. Detta kan göras redan vid konstruktionen av algoritmerna genom att föra in analyskriterier för misstänkt

mångtydighet. Ett exempel på en algoritm för TDOA som frånsett en lägeskattning ger en uppgift om det skattade läget är entydigt är LOCA⁷ som beskrivs mer noggrant i Andersson m.fl. [9]. Det är även möjligt att utföra en mångtydighetsanalys av större ytor och geometrier. Ett sådant verktyg är exempelvis användbart vid utplacering av markbaserade signalspaningsstationer. Med kännedom om vilka områden som är intressanta kan enheterna grupperas så att mångtydigheter till största delen undviks. Ett exempel på hur entydighetsanalys kan användas för att undersöka effekten av en kombination av lägebestämningsmetoder ses i figur 5.16. Områden i figuren där lägesbestämningen är mångtydig är markerade med brunt. I den vänstra delfiguren används endast TDOA. Av den högra delfiguren framgår hur områden med mångtydig lägesbestämning kan minska när TDOA kombineras med grov riktningsmätning. Precisionen i lägeskattningen kommer från tidsdifferensmätningarna och entydighet skapas där det behövs med stöd av riktningsinformation. Det kan vara intressant att notera att det räcker med en riktningsbaserad lägeslinje från en av inmätarna för att lösa mångtydigheterna.



Figur 5.17 Bilderna visar i brunt vilka områden som ger mångtydig lägesbestämning när inmätningsenheterna är placerade som en liksidig triangel. I den vänstra delfiguren används enbart TDOA. I den högra figuren har tidsdifferensmätningen kompletterats med en grov riktningsbestämning. Riktningsmätningen förmår inte lösa upp kvarvarande områden med mångtydighet eftersom ingen av de tre inmätarna i dessa områden ger tillräcklig vinkel-separation mellan sanna och falska emitterlägen. Analysen visar endast mångtydigheter som beror av geometrin i kombination med TDOA, och beaktar inte att även mätningen av respektive tidsskillnad kan vara mångtydig.

En annan gynnsam kombination är TDOA och FDOA. Metoderna kompletterar varandra genom att tids- respektive frekvensskillnadsmätningen gynnas av olika vågformer. FDOA gynnas av en vågform med en hög pulsrepetitionsfrekvens vilken ökar noggrannheten och minskar risken för mångtydigheter i frekvensskillnads-skattningen. TDOA ger i detta fall många alternativa lägeslinjer. Är pulsrepetitions-frekvensen låg gynnas TDOA genom att mångtydigheterna i tidsdifferensen minskar medan de alternativa lägeslinjerna för FDOA ökar i antal.

⁷ Location On the Conic Axis

6. Länkförbindelser för samverkan

6.1 *Kommunikationsbehov vid signalspaning i förbandssamverkan*

Vid signalspaning som sker i samverkan mellan enheter i ett förband uppkommer särskilda behov av kommunikation. Om spaningsenheterna är stationära kan kommunikationen ske över länkar som bygger på fast förbindelse via kabel, optofiber eller stationär radiolänk. Dessa system har i huvudsak också stationära egenskaper med avseende på kapacitet, tillgänglighet och fördröjningar. De kan därför huvudsakligen betraktas som en statisk komponent i signalspaningssystemet. Följande redovisning behandlar i huvudsak aspekter på länkar mellan plattformar där minst en kan vara rörlig.

För att uppnå bättre spaningsförmåga än den hos en enskild plattform måste spaningsorganen sammanbindas via kommunikationslänkar med egenskaper som är anpassade till mätsystemet och inmätningmetoden. Plattformarna måste även kunna kommunicera för att utbyta kommandon, målreferens- och bäringsinformation samt information om egen position och attityd m.m. Sekundärt för själva inmätningen men primärt för huvuduppgiften måste också mätplattformen kunna förmedla spaningsresultatet till den som ska utvärdera och använda informationen. Andra funktioner som kan noteras ha särskild vikt vid inmätning i en nätverksmiljö är hotklassificering, identitetsbestämning, regler för, order om och deltagande i gemensam inmätning, kalibrering av referensparametrar etc.

Det behövs alltså en generell struktur för upprättande och förmedling av omvärldsbild, uppdragssituation och status på förbandsnivå. Denna existerar redan idag i begränsad omfattning genom system och metoder implementerade på vissa plattformar men då i huvudsak mellan likartade enheter och ännu i liten utsträckning mellan olika vapenslag. Association av måldata från olika plattformar och andra källor till en gemensam lägesbild kräver extra insatser vid samverkan i form av måldataförmedling, analys och jämförelse, eventuell begäran om kompletterande inmätning etc. Detta ställer extra krav på dator- och minnesresurser samt på kommunikationskapacitet. Effektiva datafusionsmetoder kan i allmänhet tillgripas när inmätningarna bygger på radarsignalspaning eftersom den ofta ger resultat med väl skiljaktiga karaktärsdrag.

Uppräknade funktioner förutsätter en mer eller mindre kontinuerlig kommunikation hos alla plattformar, via ett generellt nätverk, en form av mobilt taktiskt Internet. Protokollmässigt bör nätet vara transparent. Däremot behöver den fysiska utformningen och respektive nods kapacitet, bandbredd eller överföringsmetod inte vara generell.

Uppbyggnaden av länksystemet bör vara anpassad till respektive plattform tillämpningsområde vad avser räckvidd, funktionsbehov m.m. Räckvidder hos befintliga länksystem för exempelvis tal eller data mellan flygande plattformar kan vara upp till flera hundra km utan relätrafik, medan taktiska inmätningsskavstånd ofta är avsevärt kortare.

6.2 *Kommunikationslänkens egenskaper*

Signalspaningsaktiviteter som genomförs i samverkan mellan geografiskt åtskilda rörliga plattformar är beroende av en förbindelse, vanligen baserad på radio. Resultatkrav på spaningssystemet styr ofta de egenskaper som länksystemet måste uppfylla. Dessa omfattar primärt överföringskapacitet och tidsförhållanden men också många sekundära egenskaper som röjningsrisk, störtlåglighet och telekonflikt.

Uppräknade faktorer beskrivs översiktligt nedan liksom deras inverkan, åtminstone delvis.

Överföringskapacitet

Olika nivåer av lokal förädling av inmätta data ställer olika krav på vilken datamängd som måste kommuniceras mellan samverkande enheter för att nå de samverkansfördelar som redovisats i avsnitt 5.2. I vissa fall måste absoluta krav på kommunikations-egenskaper ställas, i andra har nivån på inmätningens kvalitet ett mer eller mindre linjärt samband med nivån hos överföringsegenskaperna. Under vissa omständigheter kan förutsättningarna förbättras genom datakompression/dekompression i kommunikationskedjan, som också beskrivs i avsnitt 5.2.

En länks överföringsegenskaper kan uttryckas på olika sätt. De mera framträdande är åtkomsttid och tillgänglighet samt momentan kapacitet. De två tidigare faktorerna är ofta förknippade med förutsättningarna i en länk som är en delad resurs samt de prioriteter som olika nyttjandefunktioner kan åsättas. Momentan kapacitet uttryckt som datatakt i bitar per sekund är förknippad med länkens grundläggande utförande. Datatakten är nära kopplad till överföringskanalens bandbredd.

Det effektiva nyttjandet av tillgänglig bandbredd kan påverkas av modulationsval och datakompression samt belastas av krav på sekretess, låg feltolerans och redundans. Val av bandbredd är tekniskt beroende av bärfrekvens, ju högre bärfrekvens desto större bandbredd kan utnyttjas. Kortvågsförbindelser klarar något tusental databitar per sekund, VHF/UHF något tiotal till hundratal kilobit per sekund, mikrovågsänkar kan ligga mellan något tiotal till några hundra megabit per sekund. Se vidare avsnitt 6.3 nedan. Ännu högre datatakt kan nås i optiska system men här sätts fortfarande gränserna av förmågan hos modulatorer och möjligheterna att klara atmosfärens eller kanske tillfälligt utlagd optofibers överföringsvariationer.

Hantering av tid mellan samverkande plattformar

För att i samverkan mellan rörliga spaningsplattformar lägesbestämma ett mål, fast eller rörligt, måste inmätningarna från respektive plattform kunna anges tillsammans med en gemensam tidsangivelse. De geometriska relationerna mellan mätplattformar och mål förändras kontinuerligt genom varje enhets rörelse i rummet. Inmätningar med tidsangivelser och rörelsemönster hos mätplattformarna måste alltså vara kända för att man ska kunna sammanföra enskilda måldata till ett gemensamt målläge. Det måste alltså finnas en gemensam tidsuppfattning. Denna kan åstadkommas på i huvudsak två olika vis. Dels kan mätningar och mätdatakommunikation ske på ett känt tidskontrollerat vis. Detta brukar benämnas "realtid". Dels kan varje kommunicerat mätresultat tidsmärkas från en lokal klocka som har kalibrerats med gemensam tid. Denna etableras mellan plattformarna och vidmakthållas lokalt med sådan noggrannhet och stabilitet att de olika plattformarnas inmätningar kan anses ha utförts i relation till en gemensam klocka.

Realtid kräver att alla fördröjningar i inmätningss- och kommunikationssystemen är kända på så vis att i det ögonblick när den mottagande plattformen tar emot ett mätresultat från en annan plattform kan mottagaren räkna ut när målinmätningen skedde. Mottagaren måste dessutom få reda på inmätarens position vid mättillfället. Lokala systemfördröjningar såsom interna överföringar av data, konvertering, kryptering etc. kan vanligen bestämmas till ett konstant värde eller anges i meddelandet. Överföringstiden mellan plattformarna är däremot variabel, främst betingad av avståndet mellan plattformarna. Detta avstånd måste därför vara känt vid varje

kommunikationstillfälle. Avståndsbestämningen kan göras antingen utgående från plattformarnas ömsesidigt kända positioner eller genom att mäta signalens gångtid mellan plattformarna. Det senare kan exempelvis lösas genom utsändning av ett meddelande från ena plattformen med kvittens från den andra efter en känd fördröjningstid, se vidare nedan.

Realtidsbehov kan förutom kännedom om momentant inbördes avstånd ofta kräva ett dedicerad länksystem eller ett samutnyttjat (abonnentuppdelat eller multifunktions-uppdelat) system med oinskränkt prioritet för signalspaningen. De totala fördröjningar man eftersträvar bör ligga i millisekundklassen för realtidssystem.

En metod att komma runt realtidskraven är att utifrån etablering och upprätthållande av gemensam tidsuppfattning tidmärka alla överförda signalspaningsmeddelande med inmätningstidpunkten. Detta ställer då inga andra tidkrav på kommunikationskedjan än att den normalt förekommande totala fördröjningen ligger under en viss gräns så att spaningsinformationen fortfarande är relevant. Meddelandelängden kommer därvid att öka vilket ställer ytterligare krav på länkapaciteten.

Att etablera och kalibrera gemensam tid kräver särskilda åtgärder i likhet med kraven för realtidskommunikation, men endast vid dessa kalibreringstillfällen. Det kan ske genom "tidkommando" integrerat i länkstrukturen exempelvis genom att egen tid skickas och mottagaren återsänder kvittens efter en känd (kalibrerad) fördröjning. Avståndet mellan enheterna kan då beräknas och överföringstiden räknas bort. Olika metoder för att upprätthålla gemensam kännedom om positioner och tid förekommer som en del i etablerade länksystem. Att upprätthålla gemensam tid är i första hand en lokal systemfråga.

Gemensam tid hos plattformarna bevaras mellan kalibreringstillfällena i en stabil klocka. Korttidsstabilitet åstadkommes genom den lokala klockans tekniska konstruktion samt med miljöstabilisering. Om flera enheter ingår i nätet som inte har inbördes kontakt utan kommunikationen sker i en kedja kommer tidosäkerheten mellan de yttre enheterna att adderas genom kedjan på statistiskt vis.

Stabilitet relativt absolut tid åstadkoms genom jämförelse och justering mot global tidnormal typ GPS, globalt kommunikationssystem eller annat externt navigations-system. Inmätta och framräknade lägesresultatet måste relateras till absolut tid för att ha ett kvantitativt värde utanför den spaningssamverkande förbandsenheten. Denna tidrelation är oftast något mindre kritisk.

Befintliga länksystem avsedda för samlade taktiska kommunikationsbehov kan eventuellt nyttjas för begränsade datamängder. Dessa har i allmänhet inte realtidsegenskaper. Upprätthållandet av olika tjänster innebär att spaningsdata kan komma att ställas i kö med kortare eller längre fördröjning. Fördröjningstiden kan möjligen påverkas av en prioritetsfaktor för varje tjänst men inte absolut bestämmas varför större eller mindre fördröjningsvariationer kan förekomma. För komplettering i befintlig kommunikationsstruktur krävs att länkstandarden är öppen för att kompletteras med nya tjänster. Variationer i överföringstid kan även uppstå om kommunikationskanalen har kontrollfunktioner för överföringskvaliteten som vid osäkerhet beordrar omsändning av (del)meddelande. Andra tidvariationer kan bero på att kommunikationen är störd av yttre eller inre faktorer, exempelvis extern störsignalering eller egen telekonflikt-hantering.

Röjningsrisk

Vid passiv spaning med förbandssamverkan kan möjligheterna till tyst uppträdande begränsas genom att kommunikation krävs mellan samverkande enheter. Kommunikationen kan innebära att sändning måste ske från respektive spaningsplattform, vilket medför risk för upptäckt och lägesbestämning.

I vissa taktiska situationer kan sannolikt vikten av tyst uppträdande medföra att all kommunikation bör undvikas. Enskild förmåga är i ett sådant fall viktig. Samverkande signalspaning ställer i sig inte några krav på låg röjningsrisk.

Åtgärder för att minska motståndarens möjligheter att detektera min kommunikation kan vara att tekniskt och taktiskt anpassa uppträdandet. Sändningsmönster, modulation, kodning och kryptering, bandspridning, frekvensval, sändareffekt, utsändningsriktning etc. bör vara anpassade bland annat för att minimera röjningsrisk. Kommunikationen ska så långt möjligt endast kunna detekteras av samverkande plattform(ar). Praktiskt sett kan endast en ackrediterad mottagare tolka informationen som sänds via en modern länk. En motståndare, av länksystemet okänd aktör, kan normalt inte dela länkens information.

Med riktantenner kan man sänka signalstyrkan utanför sändarantennens lob i jämförelse med rundstrålande antenner. En lägre effekt kan användas eftersom mindre energi går förlorad i oönskade riktningar. Därmed blir signalen svår att detektera utanför sändarantennens huvudlob. Om även den avsedda mottagaren använder riktantenn kan utsänd effekt ytterligare sänkas.

Bandspridning, alltså att genom kodning eller tidstyrning sprida utsänd energi över en större bandbredd än som motsvarar meddelandets behov är också ett sätt att försvåra upptäckt.

Signalskyddande åtgärder syftar främst till att motståndarens varnare eller spaningsmottagare får svårare att detektera min signal. Denna typ av signalering kan kräva större bandbredd, mera komplicerad utrustning och därmed högre kostnader samt eventuellt också att de kommunikerande enheterna känner varandras positioner

Störtålighet

Ett länksystem för taktiskt bruk bör ha hög störtålighet. Grundläggande är att inte röja sig och därmed minska risken för riktad störning. Effektanpassning, bandspridning och i vissa fall frekvenshopp minskar risken för upptäckt och ökar störtåligheten. Om systemet omfattar styrbar antenn i mottagarkanalen minskar risken för verkan från fientlig störning av kommunikationen.

Telekonflikt

Risk för telekonflikt kan med styrbar kommunikationsantennlob både minska och öka. Totalt utstrålad effekt kan sänkas genom att effekten koncentreras i en specifik riktning vilket generellt kan medföra mindre risk för oönskad verkan på andra system. Eftersom kommunikation utifrån en rörlig plattform vanligen måste kunna ske i alla riktningar varvet runt och sfäriskt med luftburna system kan den riktade energin i vissa fall ha ogynnsam inverkan på plattformens övriga system, dels genom huvudloben, dels via sidolober. Likaså kan mottagning via riktantenn störas i varierande grad från lokala källor i motsvarande lobar. Bland annat kan känsligheten hos ett signalinmätande system sjunka om dess antenn utsätts för höga fältstyrkor på olämplig frekvens.

Interoperabilitet

Begreppet betyder i huvudsak möjligheter till samverkan. Avgränsningen i detta avseende kan beskrivas ur ett perspektiv av ömsesidiga överenskommelser (tjänstestandarder) mellan de parter som ska samverka. På kommunikationsområdet används inom NATO begreppet IER – Information Exchange Requirements för funktionsnivån. Omfattningen kan sträcka sig från att verka i tidsmässig eller geografisk närhet utan att orsaka ömsesidig störning. Den vanligaste nivån är sannolikt en viss delmängd av teknisk eller operativ förståelse och interaktion, gemensamma radiokanaler, gemensamt språk, gemensamma koder etc. Högsta praktiska nivån kan sannolikt uttryckas med att man har identisk utrustning, uppfyller samma regelverk och arbetar i gemensam orderlinje.

Interoperabilitetskrav måste rimligen gälla delsystem, delfunktioner på plattformsnivå och för operativ samverkan främst på förbandsnivå. Vidgade ansatser kräver sannolikt mycket omfattande internationell standardisering.

På området signalspaning i samverkan kan detta innebära att om kommunikationskanalen som den samverkande signalspaningen använder är en del av plattformens ordinarie kommunikationslänk så måste krav ställas på att tjänsten även kan införas och nyttjas i en internationellt reglerad miljö. Interoperabilitet inom en viss tjänstestandard måste kunna tillgodoses samtidigt som den plattformsspecifika (i detta fall signalspaning) funktionen bedrivs.

Länksystem och nära länkade stödfunktioner såsom kalibrering, tidsynkronisering m.m. bör av olika skäl övervägas som interoperabilitetskrav. För bredare samverkan måste vissa kommunikations- och kalibreringsfunktioner existera och fungera i samverkan mellan plattformar av olika slag och från olika vapenslag. För möjligheter att delta i internationell samverkan krävs också att standardisering över nationsgränser etableras, följs och provas för att tillförlitlig samverkan ska vara möjlig.

Varje system har egna protokoll av kommunikationsregler och meddelandetyper. För samverkan mellan olika system krävs speciella åtgärder och anpassningssystem mellan eller i anslutning till respektive kommunikationsnod.

6.3 Olika länktekniker och exempel på befintliga länksystem

Inom västliga försvarsmakter har olika länkstandarder för kommunikation m.m. utvecklats. För närvarande pågår införandet av systemet Link 16 och IFF (egenidentifiering) inom NATO m.fl. organisationer. Att märka är att Link 16-konceptet har en avsevärt större omfattning än enbart länkfunktion. Man kan notera att taktisk planering, stridslednings- och spaningstaktik är starkt länkade med Link 16-miljön. En utvecklingslinje inom amerikanska och NATO-relaterade organisationer med benämningen TADIL (Tactical Digital Information Link) finns i olika versioner för realtidsöverföring av taktiska data. Dessa länkkoncept förutses bli integrerade med Link 16 på de plattformar där båda finns. Även det amerikanska CDL-konceptet, (Common Data Link) är internationellt spritt i olika tappningar. Många tidigare utvecklade länksystem har funnits och existerar i många fall fortfarande.

Link 16 har i sin kommunikationsdel stora likheter med TARAS, det system som hittills varit avsett att användas inom bland annat det svenska flygvapnet. TARAS i sitt initiala utförande var uppbyggt runt analog radiokommunikation men med funktionella möjligheter att överföra data i digital form. I sin projekterade andra version skulle digital radiokommunikation med högre bärfrekvens, större bandbredd och utökad

funktionalitet införts. Troligen kommer Link 16 med i huvudsak motsvarande taktiska funktionalitet i stället att väljas för att uppfylla krav vid internationell samverkan.

TARAS liksom Link 16 är båda tidmultiplexade, frekvenshoppande och direktsekvensmodulerade system inom frekvensområdet 960 - 1215 MHz med kanalbandbredden 3 MHz och hopptakten 77 khopp/s. Normalt hanterar systemen ett antal simultana logiska kanaler för kommando, data och digitaliserat tal, varav ett mindre antal nyttjas för styrning och övervakning av länksystemet. För att (för) bli en del i ett nät krävs en inbördes tidsynkronism bättre än 230 µs.

Ra90 från Rockwell Collins var projekterad för TARAS. Denna är modifierbar till motsvarande användning inom Link 16. Fr41 i TARAS analoga flygradiofunktion kan modifieras till Have Quick II i Link 16. Nettokapaciteten hos dessa system är 4,8 kb/s per logisk kanal. Flera kanaler kan slås samman för högre kapacitet. I TARAS kan även kanaler delas för bättre utnyttjande, ex. radarlägesbild inom förband.

CDL är ett länkkoncept för mikrovågsområdet (vanligen X eller Ku-band). Systemet har utvecklats för olika tillämpningar med i huvudsak luft-mark/sjö-inriktning. Vanligaste överföringskapaciteten är 10,71 Mb/s men även högre hastigheter, exempelvis 45 Mb/s respektive 274 Mb/s, har provats. Utveckling pågår mot 400 Mb/s. Utöver radiodelen krävs numera endast ett PCI-kort av standardstorlek för att åstadkomma kärnan i denna länkfunktion. Särskilt störtlåga länkar med avsevärt lägre kapacitet har inom CDL varit operativa sedan 1980-talet, ex. S-CDL på US Army E-8 JSTARS. Planer finns för införande av CDL i de flesta taktiska flyg- och samverkande marinplattformarna inom den amerikanska krigsmakten. Tillämpningarna är i huvudsak överföring av högupplöst sensordata från opto-, radar- och signalspaning.

Mellan satelliter eller flyg och mark/ytfartyg, kan även optiska länksystem komma i fråga för att ytterligare öka överföringskapaciteten. Dessa kan i vissa former även betjäna bredbandsförbindelse med ubåt för att utbyta sonardata och spaningsdata över ytan.

Kommunikation mellan marina ytenheter, till landstationer och till vissa flygplan- och helikopterenheter använder kortvåg på fixfrekvens eller med frekvenshopp. Överföringen når i allmänhet väl bortom visuell horisont utan behov av reläenheter. Bärfrekvensen 1 - 20 MHz medger endast begränsad bandbredd och datatakten är sällan över 2400 b/s. Systemen används både för order- läges- och sensordataöverföring. Ofta krävs operatörsstöd för effektivering av pejlorder och gemensam inmätning.

Länkförbindelser mellan enheter inom ett förband kan även etableras via utnyttjande av exempelvis stör- och signalspaningssystem eller via en tilläggsfunktion i radar. Det senare alternativet är en vanlig metod vid datalänkning mellan skjutande plattform och robot. Allt multipelutnyttjande begränsar emellertid systemens ordinarie användningspotential.

Inom den svenska armén upprättas rörliga förbindelser med hjälp av bland annat radiosystemet Ra180/480 som arbetar med långsamt frekvenshopp (c:a 100 hopp/s) inom truppradiobandet 30 - 88 MHz. Överföringen är digital och krypterad. Till detta kan anslutas en datasändningsenhet DART380 för skyddad digital kommunikation upp till 2400 b/s inom en kanal om 16 kb/s. Liknande koncept finns hos marktrupper i vår omvärld, ex. SINCGARS i US Army. Inom Sverige kan försvarets länksystem vanligen vidarekopplas via markbunden utrustning med 64 kb/s per kanal baserade på Telesystem 9000.

Mellan samverkande enheter i täta formationer företrädesvis för mark- eller ytfarkoster kan länksystem som utnyttjar bärfrekvens med hög atmosfärsdämpning väljas för att undvika fientlig upptäckt och störning. Enheterna kan vara försedda med både optiska och mikrovågsbaserade varnarsystem som samverkande kan bidra till en tydligare omvärldsbild och hotdetektion. En vanlig bärfrekvens i dessa sammanhang är 60 GHz. Länkkapaciteten kan därför göras hög. Nätverket kan dynamiskt konfigureras efter vad utbredningsförhållandena för stunden medger i likhet med mobiltelefoni. Dessutom kan automatisk reläfunktion mellan samverkande enheter etableras. Kommunikation förväntas inte tränga utanför förbandets aktionsområde varför extern order- och lägeskommunikation måste ske på annat vis.

7. Krav på angränsande system

System för radarsignalspaning som samverkar har behov av stödjande information från olika typer av andra system på de bärande plattformarna. Exempel på sådan information är tids- och frekvensreferenser. Om plattformen är rörlig tillkommer position, hastighet och attityd. Bristande kvalitet i denna information kan vara förödande för exempelvis den noggrannhet som är möjlig att nå vid samverkande lägesbestämning. De tidigare beskrivna metoderna för att generera lägeslinjer ställer i detta avseende olika krav.

Lägeslinjer producerade via riktningsmätning förutsätter god kännedom om det aktuella antennsystemets attityd. Tidsskillnadsmätning kräver att inmätarna har en gemensam tidsuppfattning eller att fördröjningen vid överföringen mellan enheterna är känd.

Frekvensskillnadsmätning ställer på motsvarande sätt krav på en gemensam frekvensuppfattning men för att beräkna den aktuella lägeslinjen vid en given frekvensskillnad måste även de ingående inmätarnas hastigheter vara kända till riktning och belopp.

Oavsett vilka metoder som används för att lägesbestämma emitterar är naturligtvis resultatets kvalitet även beroende av att signalspaningssystemens positioner är väl inmätta. Detta gäller för såväl stationära som rörliga system. Är systemen rörliga ställs inte bara krav på positionsnoggrannheten utan även på uppdateringstakten.

8. Avslutande diskussion

I rapportens tidigare delar redovisas ett antal aspekter kring samverkan mellan radarsignalspaningssensorer. Helt klart är att samverkan medför ett antal fördelar jämfört med enskilt uppträdande. Det medför också en del ökade krav på de samverkande systemen, men även på angränsande system i form av exempelvis navigeringssystem och kommunikationssystem.

Samverkan mellan radarsignalspanande plattformar kan erbjuda påtagliga fördelar beträffande upptäckt relativt enskilt uppträdande. Upptäcktsförmågan ökar genom att fler system tillsammans momentant kan täcka ett större område. Dessutom ökar möjligheterna att upptäcka svaga signaler eftersom samverkan möjliggör användning av signalbehandlingsmetoder som kan lyfta fram signaler som för en enskild inmätare är dolda i brus.

En komplikation när flera inmätare ska samverka är att säkerställa att data – från de olika inmätarna – som läggs samman (fusioneras) verkligen avser en och samma emitter. Problemet brukar inom området sensordatafusion benämnas associering men inom radarsignalspaning används även begreppet relativ identifiering. En korrekt relativ identifiering är en förutsättning för exempelvis samverkande lägesbestämning.

Genom att radarsignalspaning har en unik förmåga att identifiera emittrar med hjälp av karaktäristiken i den mottagna vågformen finns i de flesta fall goda möjligheter till robust relativ identifiering. Svårigheten tilltar om ambitioner finns att samverka med radarsignalspaningssystem av olika typ, bland annat på grund av att dessa uppfattar omgivningen på olika sätt.

Den enskilt största skillnaden prestandamässigt vid gemensam relativt enskild lägesbestämning är att god noggrannhet kan erhållas på mycket kortare tid. Det beror bland annat på att de inmätande enheterna vid samverkan är separerade vilket momentant skapar en mätbas. Vid enskild lägesbestämning är det svårt att på kort tid mäta avståndet till emittern. Om plattformen är rörlig kan den skapa en mätbas för att på så sätt förbättra avståndsnoggrannheten. Mätbasen måste dock skapas genom att plattformen förflyttar sig vilket tar tid.

Då lägesbestämning genomförs med hjälp av samverkande enheter möjliggörs användning av TDOA som lägesbestämningsmetod. Dessutom får metoden FDOA ökad relevans. Den kan visserligen användas även vid enskilt uppträdande, men är då beroende av att emitterns frekvens är stabil under en lägre period eller åtminstone periodiskt återkommande.

För att uppnå ökade prestanda och robusthet vid lägesbestämningen är det gynnsamt att kombinera olika lägesbestämningsmetoder. Möjligheten att kombinera metoder är inte avgränsad till samverkan utan kan även ske vid enskilt uppträdande. Det nya vid samverkan är att kombinationsmetoder där TDOA ingår blir aktuella, vilket leder till fler alternativa kombinationer. En gynnsam kombination som blir möjlig vid samverkan är TDOA och FDOA. Kombinationen kan dessutom föregås av en gemensam parameterestimering genom att så kallad CAF används. Ur CAF fås nämligen både tids- och frekvensskillnad mellan den av olika system mottagna emittersignalen. Värt att notera är också att CAF kan ge en påtaglig prestandaförbättring jämfört med att exempelvis mäta ankomsttid på enskilda pulser.

Lägesbestämningsmetoden FDOA ger möjligheten att skatta en emitters hastighet. För att det ska vara möjligt krävs dock att positionen är känd eller skattas med någon annan

metod exempelvis riktningsmätning eller TDOA. Kombinationen FDOA och TDOA ger dessutom en ökad robusthet mot mångtydigheter.

Samverkan mellan enheter kan ske på olika nivåer och utifrån olika rollfördelningar. De olika rollerna kan antingen vara statiskt knutna till de samverkande enheterna eller variera dynamiskt från en situation till en annan. En viktig parameter är dessutom graden av enskild förmåga. I de fall plattformarna helt saknar enskild förmåga blir de beroende av att samverkan alltid existerar, vilket inte är önskvärt. En tänkbar lösning är att systemen alltid har en viss enskild förmåga, men att om möjligheten till samverkan finns förbättras förmågan ytterligare.

För att samverkan ska vara möjligt måste de samverkande enheterna kunna kommunicera med varandra. Valet av samverkansnivå och samverkansprincip ställer direkta krav på kommunikationen. Bland annat kommer nivån av förädling som utförs på den enskilda plattformen att påverka. En hög nivå av förädling leder ofta till att den kommunicerade datamängden minskar och tvärtom. Värt att notera är att en hög grad av förädling i vissa fall försämrar prestanda genom att detaljeringsgraden minskar. Det kan därför av prestandaskäl vara önskvärt att föra över lågt förädlad information till sammanställande plattform. För att detta ska vara möjlig krävs att kapaciteten hos kommunikationslänken är hög. Dessutom kan metoder för datakompression utnyttjas för att ytterligare höja kapaciteten.

9. Referenser

- [1] Andersson Börje, Henriksson Daniel, Lindgren Björn, "Flygburen passiv lägesbestämning baserad på noggrann frekvensmätning", FOI-R--0329--SE, december 2001.
- [2] Andersson Börje, Bergdal Hans, Henriksson Daniel, Lindgren Björn, Westerlund Carl-Lennart, "Precisionslägesbestämning med flygburna radarsis-sensorer", FOI-R--0719--SE, december 2002.
- [3] Bergdal Hans, Andersson Börje, Lindgren Björn, "Signalspaningsteknik del 2 Radarsignalspaning", FOI 2002.
- [4] Vaccaro Dennis D., "Electronic Warfare Receiving Systems" Artech House 1993, ISBN 0-89006-543-8.
- [5] Eriksson Gunnar, "Exempel på täckningsområde för lägesbestämning av artilleri-lokaliseringsradar genom radarsignalspaning i kraftigt kuperad terräng", FOA-internt arbetspapper, november 1999.
- [6] Houghton A. W., Reeve C. D., "Spread Spectrum Signal Detection using a Correlation Receiver", Sixth International Conference on Radio Receivers and Associated Systems, Conference Publication No 415, s. 42-46, 1995.
- [7] Elbornsson Ulrika, "Upptäck och riktningsbestämning av bandspridda signaler med hjälp av korrelation", FOI-R--0030--SE, februari 2001.
- [8] Ahnström Ulrika, Falk Johan, Wikström Maria, "TDOA-baserad positionering av kommunikationssignaler – beskrivning av demonstrator och resultat från försök", FOI-R--1276--SE, juni 2004.
- [9] Andersson Börje, Henriksson Daniel, Lindgren Björn, "Aktiviteter avseende radarsignalspaning och radarvarning inom projekt VMS NBF", FOI Memo 03-2237, september 2003.
- [10] Wiley Richard G., "Electronic Intelligence: The Analysis of Radar Signals", second edition, Artech House 1983, ISBN 0-89006-592-6.
- [11] Fowler, Mark L., "New Distortion Measures for Data Compression for Emitter Location," Thirty-Fifth Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers, November 5 – 7, 2001, pp. 658 – 662.