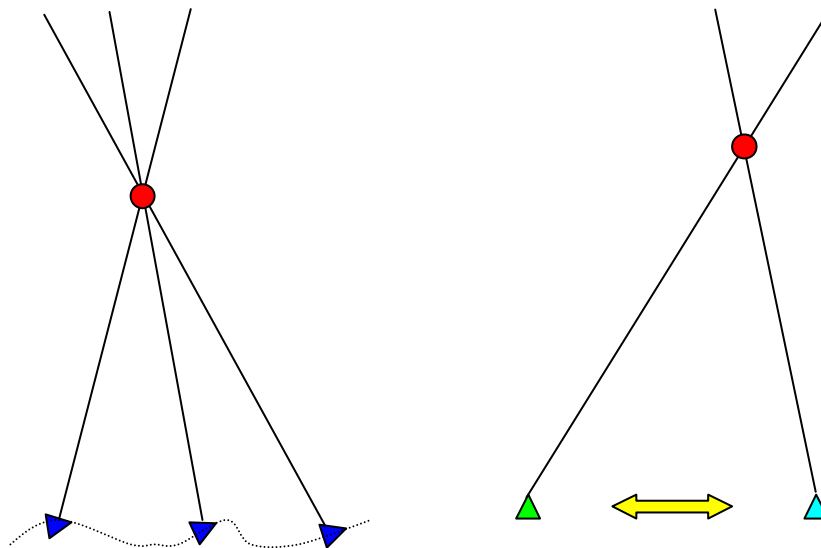


B Andersson, H Bergdal, D Henriksson, B Lindgren, C-L Westerlund

Precisionslägesbestämning med flygburna radarsis-sensorer



TOTALFÖRSVARETS FORSKNING SINSTITUT

Ledningssystem
Box 1165
581 11 Linköping

FOI-R--0719--SE

December 2002

ISSN 1650-1942

Användarrapport

Börje Andersson, Hans Bergdal, Daniel Henriksson
Björn Lindgren, Carl-Lennart Westerlund

Precisionslägesbestämning med flygburna radarsis-sensorer

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Ledningssystem Box 1165 581 11 Linköping	Rapportnummer, ISRN FOI-R--0719--SE	Klassificering Användarrapport
	Forskningsområde 6. Telekrig	
	Månad, år December 2002	Projektnummer E70211
	Verksamhetsgren 5. Uppdragsfinansierad verksamhet	
	Delområde 61 Telekrigföring med EM-vapen och skydd	
	Författare/redaktör Börje Andersson Hans Bergdal Daniel Henriksson Björn Lindgren Carl-Lennart Westerlund	Projektledare Börje Andersson
Godkänd av Lennart Nyström		
Uppdragsgivare/kundbeteckning Försvarsmakten		
Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig Börje Andersson		
Rapportens titel Precisionslägesbestämning med flygburna radarsis-sensorer		
Sammanfattning <p>Under åren 1997-2002 har FoT-projektet VMS Flyg bedrivit forskning inriktad mot teknik, system och metoder för framtida radarvarnare och radarsis-system. Behovet av forskningsinsatser inom området är sammantaget så omfattande att fokusering mot ett delområde varit nödvändig. Det viktigaste delområdet har bedömts vara metoder för snabb och noggrann lägesbestämning av emitterar. Kraven på denna typ av lägesbestämning dikteras bland annat av behovet att framgångsrikt kunna undertrycka motsidans LV-radarsystem, så kallad SEAD - <i>Suppression of Enemy Air Defences</i>.</p> <p>Inom SEAD är det önskvärt att snabbt och noggrant lägesbestämma mobila LV-radarsystem för att medge insats med precisionsvapen. Det faktum att emitterns läge bestäms med precision utökar tidsintervallet, inom vilket en attackinsats framgångsrikt kan slå ut radarstationen, från att vara begränsat av radarns sändningstid – vilket är aktuellt vid insats med signalsökande robot – till att vara begränsat av radarns tid att lämna grupperingsplatsen. Denna skillnad kan vara helt avgörande för resultatet.</p> <p>Rapporten ger en orientering om signalspaningsbaserade metoder för att med höga prestanda lägesbestämma mikrovågsemitterar. Ambitionen är att ge en förståelse för metodernas principiella funktion och egenskaper. Alternativa lösningar värderas också på olika sätt mot varandra. Tyngdpunkten ligger på lägesbestämning från ett enskilt flygplan men även metoder som utnyttjar samverkan mellan flera inmätande flygplan beskrivs.</p>		
Nyckelord Telekrig, SEAD, signalspaning, radarvarnare, lägesbestämning, DDOA, långbasinterferometri, TDOA		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 92	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista Sekretess Öppen	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Command and Control Warfare Technology P.O. Box 1165 SE-581 11 Linköping	Report number, ISRN FOI-R--0719--SE	Report type User report
	Research area code 6. Electronic Warfare	
	Month year December 2002	Project no. E70211
	Customers code 5. Contracted Research	
	Sub area code 61 Electronic Warfare, Electromagnetic Weapons	
Author/s (editor/s) Börje Andersson Hans Bergdal Daniel Henriksson Björn Lindgren Carl-Lennart Westerlund	Project manager Börje Andersson	
	Approved by Lennart Nyström	
	Sponsoring agency Swedish Armed Forces	
	Scientifically and technically responsible Börje Andersson	
Report title (In translation) Precision Geolocation of Emitters using Airborne Radar Warning Receivers		
Abstract <p>During recent years one branch of project "VMS Flyg" ("Aircraft EW") has been directed towards technology, systems and methods of airborne radar warning and ES-systems. As the need of research in this area didn't match available resources the research effort was focused on methods of rapid and accurate geolocation of emitters. Demands on such geolocation is mainly set by the need to efficiently counter air defence systems, a procedure often called SEAD – Suppression of Enemy Air Defences.</p> <p>Within SEAD it is mandatory to precisely and rapidly locate SAM systems and thereby get the opportunity to attack them using precision weapons. As a direct consequence of the precise geolocation the time available to attack mobile SAM systems increases from transmitting time (time available to attack by anti radiation missiles) to time-on-station, which might be decisive to the result of the attack.</p> <p>In this report some basic methods of direction finding and emitter location are treated together with advanced precision geolocation methods and combinations of such methods. The emphasis of this report is on single aircraft precision geolocation but multi-platform scenarios are also considered.</p>		
Keywords Electronic Warfare, SEAD, ESM, RWR, Emitter Location, DDOA, Frequency Estimation		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 92	
	Price acc. to pricelist Security classification	

Innehållsförteckning

1. Inledning	7
1.1 Från bakgrund till framtid	7
1.2 Rapportens syfte och innehåll.....	8
2. Taktiska behov av snabb och noggrann lägesbestämning av emitterar	9
2.1 Lägesbestämningens syfte	9
2.2 Behov i ett SEAD-scenario.....	9
3. Prestanda vid lägesbestämning.....	13
3.1 Noggrannhet	13
3.2 Snabbhet.....	18
3.3 Entydighet	18
3.4 Yttäckning.....	19
4. Inmätning med radarsignalspaning jämfört med andra metoder	21
4.1 Målegenskaper.....	21
4.2 Spaningsegenskaper	24
4.3 Spaningsegenskaper för kombinationsmetoder	27
5. En eller flera inmätande flygplan?	29
6. Grundläggande lägesbestämningsprinciper	31
6.1 Riktningmätning och triangulering	31
6.2 Tvådimensionell riktningmätning av mark- eller ytbaserad emitter.....	38
6.3 Riktning- och effekttäthetsmätning.....	41
6.4 TDOA – mätning av skillnad i ankomsttid.....	46
6.5 DDOA – mätning av dopplerskillnad	51
6.6 LBI – Långbasinterferometri	58
7. Kombinerade lägesbestämningsmetoder	63
7.1 Allmänt om att kombinera metoder	63
7.2 DDOA och riktningmätning	63
7.3 Långbasinterferometri och riktningmätning	69
7.4 DDOA, LBI och riktningmätning	72
7.5 TDOA och DDOA.....	74
8. Några prestandapåverkande faktorer.....	79
8.1 Emitteregenskaperna	79
8.2 Signalmiljön	80
8.3 Vågutbredningen	80
8.4 Radarsis-systemet.....	81
8.5 Den inmätande plattformen	83
8.6 Länkförbindelserna.....	84
9. Sammanfattning och slutsatser.....	85
10. Referenser	87

Bilageförteckning

Bilaga A - Beskrivning av använda typfall.....	89
1. Allmänt.....	89
2. Rakbana.....	90
3. Frånböj 2G.....	90
4. Motböj 2G.....	90
5. Rakbana med roll.....	91

1. Inledning

1.1 Från bakgrund till framtid

Under åren 1997-2002 har FOI bedrivit forskning inriktad mot ny teknik och nya metoder med potential att öka förmågan hos flygbaserade varnar- och motverkanssystem – VMS. Verksamheten har varit samlad i FoT-projektet VMS Flyg som till ungefär lika delar har engagerat avdelningen för Ledningssystem och avdelningen för Sensorsystem.

En delmängd av insatserna har varit inriktade mot att studera teknik, system och metoder för framtida radarvarnare och radarsis-system. Utvecklingen mot digital mottagarteknik har generellt bedömts vara en språngbräda mot framtida prestandaförbättringar bland annat genom att funktionaliteten i ökad grad kan realiseras med digital signalbehandling.

Som exempel på funktioner där den nya tekniken bedöms få stor betydelse kan nämnas:

- Separation – exempelvis genom digital kanalisering
- Detektion och upptäckt – bland annat av smygradarsignaler
- Inmätning – med ökad precision för att exempelvis individbestämma emitterar
- Rikttnings- och lägesbestämning – med ökad snabbhet och noggrannhet

Behovet av forskningsinsatser inom området är sammantaget så omfattande att en fokusering mot ett delområde har varit nödvändig. Det viktigaste delområdet har bedömts vara metoder för 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 SEAD - *Suppression of Enemy Air Defences*. Området är internationellt mycket uppmärksammat, dels för den stora betydelsen, dels för att förmågan vid de senare årens konflikter har visat sig otillräcklig.

Svårigheten är framförallt att permanent slå ut mobila LV-radarsystem. Vapeninsats med signalsökande robotar har ofta bara en tillfällig effekt och förbrukar och binder stora resurser kontinuerligt under konflikten. För att nå en mer varaktig effekt utvecklas nu signalsökande robotar med kompletterande IR- eller millimetervågsmålsökare för slutfasen. Detta förväntas ge en viss förmåga att verka även mot radar som sänder kortvarigt och mot icke sändande enheter i radarns närhet.

Avseende flygplanets radarsis-sensor krävs dock en parallell utveckling med syfte att snabbt lägesbestämma mobila LV-radarsystem. Det är även önskvärt att väsentligt höja lägesnoggrannheten för att medge insats med precisionsvapen. Om detta är möjligt utökas tidsintervallet inom vilket en attackinsats framgångsrikt kan slå ut radarstationen för lång tid. Tidsintervallet kan sägas öka från att vara begränsat av radarns sändningstid till att vara begränsat av radarns tid att lämna grupperingsplatsen. Denna skillnad kan vara helt avgörande för resultatet.

Tre radarsis-baserade lägesbestämningsmetoder bedöms ha potential som kan svara mot ovanstående behovsbild.

- DDOA – *Doppler Difference of Arrival*
- LBI – *Long Baseline Interferometry*
- TDOA – *Time Difference of Arrival*

Metoderna är användbara var för sig men de kan med fördel kombineras för att minimera svagheter och utnyttja respektive metods fördelar.

Inriktningen inom VMS Flyg har i huvudsak varit fokuserad på att förbättra förmågan hos ett enskilt flygplan. Av detta skäl har TDOA-metoden – som kräver flera inmätare – endast studerats i begränsad omfattning.

Fram till och med 2001 gjordes den dominerande insatsen inom DDOA 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]. Under 2002 har parallellt långbasinterferometri bearbetats och nyttan av att kombinera metoderna analyserats.

Kompetensgruppens inriktning mot metoder för snabb och noggrann lägesbestämning av emitterar försvinner inte när VMS Flyg avslutas. Årsskiftet 2002/2003 påbörjas FoT-projekt VMS NBF där en delmängd av innehållet har inriktning mot radarvarnare och taktiska radarsis-system.

Verksamheten kommer dock i ökad grad att fokusera på lägesbestämning av emitterar genom samverkan mellan flera inmätande flygplan. Jämfört med förmågan hos ett enskilt flygplan finns stor potential att nå motsvarande noggrannhet på kortare tid.

Samverkan mellan flera flygplan medger att TDOA används. Även DDOA-metoden eller kombinationer som inkluderar DDOA bedöms ha stor relevans. Genomfört arbete på DDOA-området inom VMS Flyg är därför en värdefull plattform för den fortsatta satsningen inom VMS NBF.

1.2 Rapportens syfte och innehåll

Syftet med den här rapporten är i första hand att ge en orientering om befintliga och nya metoder, aktuella att användas för lägesbestämning av emitterar som sänder på mikrovågsområdet. Ambitionen är att innehållet ska ge en förståelse för metodernas principiella funktion och egenskaper. Alternativa lösningar värderas också på olika sätt mot varandra.

Rapporten innehåller – efter den här inledningen – i kapitel 2 en beskrivning av den behovsbild som motiverar insatser inriktade mot lägesbestämningsmetoder med bättre prestanda. I kapitel 3 diskuteras därefter olika aspekter av begreppet prestanda. Som en förberedelse inför rapportens senare delar innehåller kapitlet bland annat en genomgång av alternativa sätt att analysera och presentera noggrannheten vid lägesbestämning.

Kapitel 4 jämför på olika sätt de egenskaper flygburna radarsis-sensorer har med vad som gäller för radar- eller elektrooptiska system.

Möjligheterna och svårigheterna att lägesbestämma emitterar med flygburna radarsis-sensorer är olika om ett enskilt flygplan används eller flera flygplan samverkar. Detta diskuteras på flera ställen i rapporten men kapitel 5 behandlar ämnet allmänt. Kapitel 6 innehåller en genomgång av aktuella lägesbestämningsprinciper och i kapitel 7 beskrivs hur dessa kan kombineras samt vilka fördelar som kan nås.

I kapitel 8 diskuteras ett antal parametrar som påverkar prestanda, från emitteregenskaper och vågutbredning till radarsis-systemet och den inmätande plattformen. Även länkförbindelsen vid samverkande lägesbestämning kommenteras.

I det avslutande kapitel 9 sammanfattas slutligen intryck och värderingar.

2. Taktiska behov av snabb och noggrann lägesbestämning av emitterar

I detta kapitel motiveras kort varför lägesbestämningsprestanda hos en radarvarnare eller ett radarsis-system är av särskild stor betydelse i ett taktiskt perspektiv. Störst utrymme ges åt det internationellt mycket uppmärksammade SEAD-scenariot där radarsis-sensorers förmåga att lägesbestämma motsidans radarledda LV-system ofta har en avgörande betydelse för duellens utfall.

2.1 *Lägesbestämningens syfte*

Kraven på ett taktiskt flygplans förmåga att lägesbestämma emitterar beror i hög grad på lägesbestämningens syfte.

Nedan listas exempel på hur information om emitterlägen, som är inmätta med radarvarnare eller radarsis-system, kan användas i olika taktiska syften:

- Underlag för undanmanöver
- Invisning av andra sensorer baserade på exempelvis optik, radar eller radio-sis
- Invisning av riktad störsändning eller närstörsändning
- Invisning av signalsökande robot (se avsnitt 2.2)
- Invisning av insats med precisionsstyrda vapen (se avsnitt 2.2) eller indirekt eld
- Läget kan vara avgörande för resultatet av ”icke kooperativ identifiering”, se nedan
- Uppdatering av signalreferensbibliotek under pågående stridshandlingar. Läget kan vara avgörande för att knyta en ny eller ändrad radarmod till ett system-sammanhang.

Allmänt bidrar naturligtvis såväl förhöjd lägesnoggrannhet som snabbhet till att omvärldsuppfattningen förbättras. Mer konkret kan konstateras att information om emitters läge har fått en ökad betydelse. Orsaken är bland annat att svårigheten att ”sidbestämma” emitterar har blivit mer påtaglig i och med att nästan identiska system ibland förekommer på båda sidor i konflikter. Emitters läge kan i dessa fall vara en avgörande parameter för nationalitetsbestämning.

Nytan av noggrann lägesbestämning beror till viss del på emitters mobilitet. Denna problematik berörs i avsnitt 2.2.

2.2 *Behov i ett SEAD-scenario*

Vid internationella militära insatser är behovet av att ha kontroll över aktuellt luftrum väsentligt vilket klart har framgått vid senare års konflikter. Bland annat visar erfarenheten att markoperationer endast i begränsad omfattning genomförs om denna kontroll saknas.

Motsidans jakthot har ofta varit hanterligt genom en kombination av egen överlägsen prestanda och numerär. Även de stationära systemen i det markbaserade luftförsvaret har kunnat undanröjas genom olika typer av precisionsvapen.

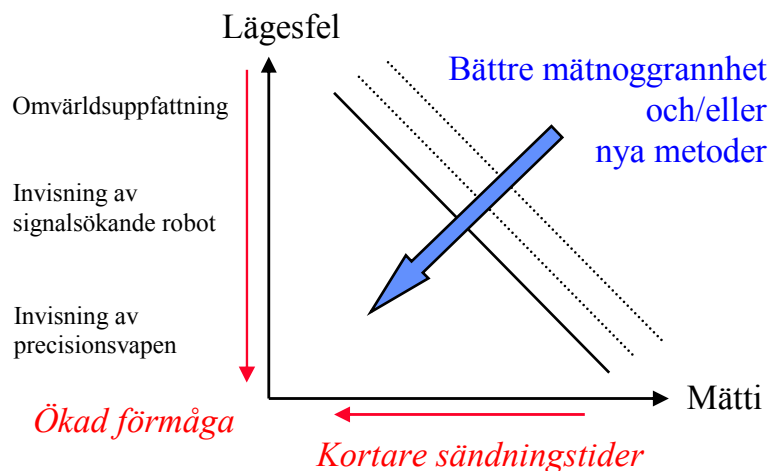
Med syfte att neutralisera det kvarstående hotet mot luftherravälde har eget flyg därutöver genomfört dueller med motsidans mobila radarledda LV-system. För att upptäcka

dessa hot/mål och invisa vapeninsats – i form av till exempel signalsökande robot – är radarsis-system en primär sensor varför flygplan med speciella målinmätande sis-system vanligtvis engageras för uppgiften.

Denna SEAD-verksamhet var i huvudsak framgångsrik under exempelvis operation *Desert Storm* men erfarenheterna från operation *Allied Force* är delvis annorlunda. Serberna utnyttjade under konflikten sina mobila LV-radar rörligt och restriktivt med konsekvensen att få flygplan sköts ner men samtidigt att få radarstationer slogs ut. Serbernas mobila LV var därför ett potentiellt hot under hela konflikten. Förbrukningen av signalsökande robotar var hög och offensiva resurser bands av SEAD-uppgifter, se Ternblad [2].

Slutsatsen inför framtida konflikter tycks därför vara att det finns ett stort behov av förmåga att permanent slå ut även mobila LV-ställningar. Denna förhållandevis nya inriktning av SEAD brukar benämnas DEAD – *Destruction of Enemy Air Defences*.

En lösning kan vara att förbättra den noggrannhet och snabbhet med vilken radarvarnare eller radarsis-system lägesbestämmer markbaserade emitterar, se figur 2.1. Målet kan vara att nå målkoordinater som medger insatser med precisionsvapen (kanske mot annan systemdel än emittern) i stället för signalsökande robotar (mot radarantennen). Om detta är möjligt utökas tidsintervallet där en attackinsats framgångsrikt kan slå ut radarstationen, från att vara begränsat av radarns sändningstid till att vara begränsat av radarns tid att lämna platsen. Denna skillnad kan vara helt avgörande för resultatet. En form av precisionsvapen är en robot med en målsökare som är en kombination av signalsökare, radar- eller IR-sökare och GPS.



Figur 2.1 För att bland annat permanent kunna slå ut mobila LV-system finns ett stort behov av att förbättra lägesbestämningens noggrannhet så precisionsvapen kan användas. Kortare sändningstider ställer parallellt krav på att inmätningen av emitterläget sker snabbare. Behovet kan mötas genom att väsentligt förbättra noggrannheten vid exempelvis triangulering, eller genom att utnyttja lägesbestämningsmetoder med potentiellt bättre prestanda avseende noggrannhet och snabbhet. Den erforderliga inmätningstiden kortas avsevärt om lägesbestämning sker genom samverkan mellan flygplan utrustade med radarvarnare eller sis-system.

Ett exempel på framtida koncept som kan komma att undanröja befintliga ofullkomligheter är det amerikanska AT3 – *Advanced Tactical Targeting Technology* – som enligt uppgift strävar mot att inom 10 sekunder kunna lägesbestämma emitterar med en osäkerhet av 15-50 m på avstånd upp till 150 nautiska mil.

AT3 utnyttjar samverkan mellan lämpliga flygplan, som kanske av annan anledning, befinner sig i ett aktuellt område och konceptet är väl i linje med tankarna avseende nätverksbaserat försvar.

3. Prestanda vid lägesbestämning

Begreppet prestanda används i olika sammanhang med skiftande betydelse. I det här kapitlet beskrivs ett antal aspekter på detta begrepp som är aktuella vid lägesbestämning av emitterar. Egenskaper som diskuteras är:

- Noggrannhet
- Snabbhet
- Entydighet
- Yttäckning

3.1 *Noggrannhet*

Lägesbestämning av emitterar är en tvåstegsprocess som i första momentet innefattar att:

- Estimera parametrar i den inmätta signalen vars värden innehåller information om emitterläget.
- Estimera egna parametrar – exempelvis position, attityd och hastighet – för en eller flera inmätningssantennerna.

I ett andra steg beräknas (skattas) ett emitterläge ur ovanstående estimat. Valet av metod för lägesbestämning avgör både vilka signalparametrar som används i steg 1 samt hur algoritmerna i steg 2 utformas. Det senare steget inkluderar bland annat en modell som beskriver hur emitterläget påverkar de parametrar som estimeras.

Oavsett metod kommer noggrannheten i lägeskattningen att påverkas av olika typer av fel. Felen förorsakas exempelvis av att parameterestimeringen inte är felfri eller att modellen i steg 2 avviker från verkligheten.

Deterministiska och stokastiska fel

De fel som påverkar lägesbestämningen kan delas in i två grupper, *deterministiska fel* som har en förutsägbarhet och *stokastiska fel* vilka är slumpmässiga.

Deterministiska fel är repetitiva vilket innebär att de är konstanta när förutsättningarna inte ändras sig. Denna typ av fel kan därmed i vissa fall – åtminstone i teorin – elimineras eller reduceras genom kalibrering eller korrektion. I praktiken bestäms förutsättningarna av så många parametrar – frekvens, amplitud, polarisation, infallsriktning, temperatur och så vidare – att kalibreringar som inkluderar alla kombinationer inte kan göras. En del av de parametrar som påverkar deterministiska fel kanske inte heller mäts vilket naturligtvis innebär att korrektion inte kan ske. Detta gäller exempelvis ofta polarisation.

Dessutom finns ytterligare en typ av fel som kan anses vara deterministiska, men som har sitt ursprung i att den modell som används för att beräkna emitterläget ur de inmätta parametrarna inte tillräckligt väl beskriver de verkliga förutsättningarna. Denna typ av fel brukar benämnas modellfel. Ett exempel på feltypen är det så kallade koningsfelet som är aktuellt vid interferometri. Koningsfelet beskrivs närmare i avsnitt 6.1.

De stokastiska felen – som ofta är en följd av brus – går däremot inte att förutsäga exakt. En viss prediktering av dessa är dock möjlig med hjälp av statistiska beskrivningar. En statistisk beskrivning är ett matematiskt samband som beskriver hur troliga olika värden hos felet är. Det stokastiska felet kan beskrivas genom att en typ av fördelning anges.

Därtill finns även ett antal parametrar som styr det exakta utseendet hos fördelningen. Dessa måste också specificeras för att beskrivningen ska vara fullständig. Hur många parametrar som krävs och exakt vilka de är beror på typen av fördelning.

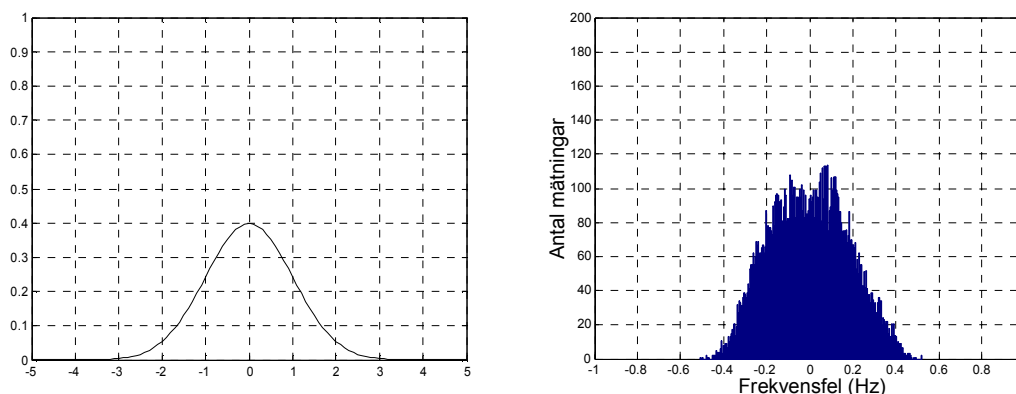
Då en fördelning specificerats kan den matematiska beskrivningen användas för att beräkna sannolikheten för att felet ska hålla sig inom vissa gränser. Dessutom kan den resulterande effekten på utdata, orsakad av det stokastiska felet, beräknas genom exempelvis felfortplantning.

Andra verktyg, som också är användbara för att få kunskap om de stokastiska felens inverkan på slutresultaten, är Cramér-Rao-analyser samt Monte-Carlo-simuleringar. Dessa verktyg beskrivs längre fram i detta kapitel.

Fördelningar

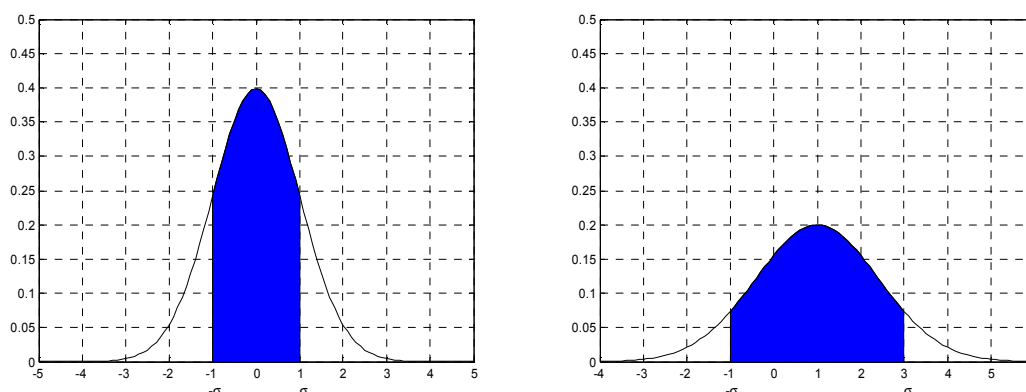
Det finns ett antal namngivna och matematiskt definierade fördelningar som används för att beskriva hur sannolikt ett visst utfall är. Fördelningarna brukar ofta presenteras med hjälp av någon eller båda av två funktioner – fördelningsfunktionen och täthetsfunktionen. Dessa båda är relaterade till varandra på så sätt att täthetsfunktionen är derivatan av fördelningsfunktionen.

I naturvetenskapliga sammanhang är en vanligt förekommande fördelning *normalfördelningen*, som även benämns Gaussfördelning, se figur 3.1. Denna används ofta för att vid simulering beskriva egenskaperna hos brus.



Figur 3.1 Diagrammet till vänster illustrerar täthetsfunktionen för en normalfördelning med standardavvikelsen 1 och medelvärdet 0. Normalfördelningen är en vanlig fördelning i mät- och simuleringsammanhang, vilket kan illustreras av det högra diagrammet som visar ett histogram (motsvarande täthetsfunktionen) för felet i resultatet från upprepade frekvensmätningar på en kontinuerlig sinussignal med fast frekvens.

Gemensamt för alla täthetsfunktioner är att ytan under funktionskurvan har en area som har värdet ett, vilket innebär att sannolikheten för att få ett utfall i funktionens definitionsområde är 100 %. Sannolikheten för att man i en normalfördelning ska få ett värde som ligger inom området som begränsas av standardavvikelsen, $\pm\sigma$, är ungefär 68 %, vilket innebär att risken att hamna utanför är ungefär 32 %. Detta förhållande gäller oavsett standardavvikelse och medelvärde för en normalfördelning, se figur 3.2.



Figur 3.2 Två exempel på normalfördelningar. I den vänstra figuren är standardavvikelsen 1 och medelvärdet 0 vilket gör att fördelningen ofta betecknas $N(0,1)$. I den högra är standardavvikelsen 2 och medelvärdet 1 vilket skrivs $N(1,2)$. Den area under kurvorna som har markerats blå är i båda fallen 68 % av den totala arean under kurvorna vilket motsvarar sannolikheten för att ett utfall ska hamna i det intervall som begränsas av standardavvikelsen.

Standardavvikelse, väntevärde och liknande

För att beskriva de olika fördelningarnas egenskaper används i många fall parametrar som *wäntevärde* och *varians*. Väntevärdet är den stokastiska variabelns medelvärde – eller mer stringent uttryckt – det värde som medelvärdet går mot efter tillräckligt många försök. Variansen är ett mått på den stokastiska variabelns spridning kring medelvärdet, och kan beskrivas som medelvärdet av de kvadrerade avvikelserna från väntevärdet.

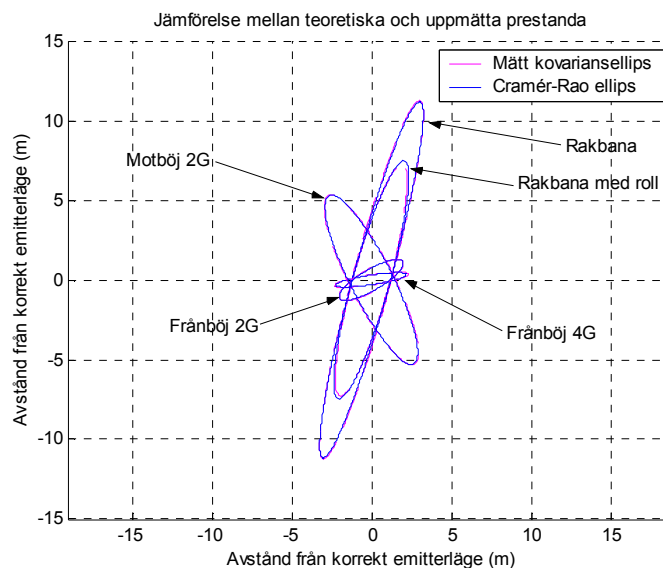
Standardavvikelsen är ett annat spridningsmått som används ofta i den här rapporten. Standardavvikelsen är den positiva kvadratroten ur variansen och betecknas med den grekiska bokstaven σ .

Ett annat vanligt mått är det så kallade RMS-värdet – *Root Mean Square* – vilket är närbesläktat med standardavvikelsen. RMS-värdet beräknas till skillnad från standardavvikelsen med utgångspunkt från ett givet börvärde, varför ett eventuellt offsetfel i medelvärdet påverkar resultatet.

Det finns en risk för att spridningsmått – varians, standardavvikelse och RMS-värde – av en betraktare tolkas som en absolut gräns. I vissa fall kan värden ha avsevärt större fel vilket är en följd av att spridningsmått är en slags medelvärden.

Felellipser

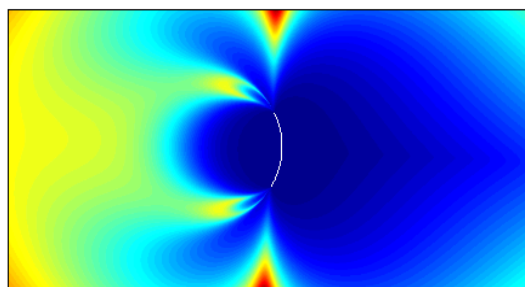
Stokastiska variabler, eller endimensionella fördelningar är ett bra sätt att beskriva fel i indata till lägesbestämningsalgoritmer, som exempelvis tids-, fas- eller frekvensdata. För att beskriva fel i flera dimensioner – vilket är aktuellt exempelvis vid lägesbestämning – är det lämpligt att använda flerdimensionella fördelningar. Dessa kan i princip ha ett godtyckligt antal dimensioner, men i praktiska sammanhang rör det sig om två i planet och tre i rummet. För att få en bild av flerdimensionella fördelningar är det i vissa fall det lämpliga att beskriva den geometriska utbredningen av standardavvikelsen. För två dimensioner blir detta i form av en ellips, och för tre en ellipsoid. I figur 3.3 finns exempel på ett antal felellipser för olika simuleringsfall som härrör från en tidigare rapport, Andersson m.fl. [1].



Figur 3.3 Exempel på felellipser för olika flygbanor vid lägesbestämning med DDOA. Ellipserna är framtagna dels med hjälp av Cramér-Rao-analys och dels med Monte-Carlo-simuleringar. Eftersom standardavvikelsen för de senare ligger nära Cramér-Rao-gränsen för samtliga flygbanor är den valda estimeringsmetoden tydligen bra.

Cramér-Rao-analys

Ett sätt att skapa sig en uppfattning om effekterna av stokastiska fel är att göra en teoretisk analys med hjälp av Cramér-Rao-gränser – i litteraturen ofta förkortade med CRB eller CRLB¹. CR-gränsen visar hur liten variansen kan bli under de för uträkningen givna förutsättningarna i form av spridningsmått på ingående fel. För att resultatet av en CR-analys ska vara giltigt krävs dock att den estimator som undersöks är väntevärdesriktig vilket innebär att den ger ett medelvärde som går mot det sanna värdet.



Figur 3.4 Exempel på hur Cramér-Rao gränsen för en lägesbestämningsmetod kan presenteras för ett område kring en flyg bana (den vita bågen mitt i figuren). Färgskalan beror på längden på den längsta halvaxeln – det vill säga största radien – i de felellipser vars storlek är beräknade för varje punkt i figuren. De blå färgerna anger låga värden (små lägesfel) och de röda höga värden (stora lägesfel).

Cramér-Rao-gränsen används ofta som en referens vid jämförelser mellan olika estimeringsalgoritmers prestanda. I vetenskapliga kretsar är det viktigt att de utvecklade skattningsmetoderna har prestanda som ligger nära CR-gränsen. Tyvärr är det inte alltid

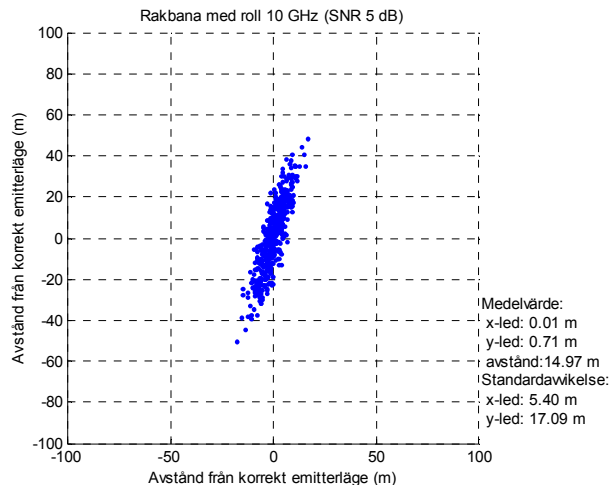
¹ Cramér-Rao Lower Bound

så att detta även betyder att metoden snabbt kommer fram till ett estimat, vilket kan vara en viktig parameter i ett verkligt system. På senare tid har dock även beräkningsbördan för olika algoritmer aktualiserats.

Inom projektet har CR-gränsen även använts för att undersöka olika lägesbestämning-metoders prestanda över stora ytor. CR-gränsen har då beräknats för ett antal emitterpositioner relativt en fix flygbana. Beräkningen har begränsats till två dimensioner vilket leder till att CR-gränsen kan uttryckas som en ellips. Den största halvaxeln i CR-ellipsen används som noggrannhetsmått och kan presenteras i form av ett färgkodat värde för varje emitterposition. I figur 3.4 återfinns exempel på en sådan färgkodad presentation.

Monte-Carlo simuleringar

Förutom Cramér-Rao-analys används simuleringar som ett viktigt verktyg för att få ett noggrannhetsmått på exempelvis lägesbestämningsskattningar. De i simuleringarna ingående parametrar som motsvarar inmätt data – exempelvis fasskillnad eller frekvens – påförs slumpmässiga fel vars storlek och sannolikhet bestäms av en vald täthetsfunktion och dess spridningsmått. De slumpmässiga felen används vid beräkning av ett emitterläge. Därefter slumpas ett nytt värde fram för de stokastiska variablerna varefter läget beräknas igen. Det hela upprepas tills ett tillräckligt antal skattningar av läget har nåtts. Förfarandet kallas Monte-Carlo-simuleringar efter den berömda staden med alla dess slumpmässiga spel. Från resultaten av simuleringarna kan spridningsmått beräknas, exempelvis i form av spridningsellipser. Dessa kan sedan jämföras med de teoretiskt framräknade CR-gränserna för att få ett mått på hur bra lägesbestämningsskattningen är.



Figur 3.5 Ett exempel på resultat av en Monte-Carlo-simulering. Vid varje beräkning av ett läge har fel påförts på indata till en lägesbestämningsskattning, och varje lägeskattning har plottats som en punkt i figuren. Resultatet är en punkthop som är tätare i mitten, vilket visar att sannolikheten är större för att hamna där än i kanterna. För att åstadkomma figuren har 500 simuleringar genomförts.

Tyvärr är simuleringarna ett tungt och tidsödande arbete då samma skattning måste göras ett stort antal gånger för att få en statistisk säkerhet i de sökta spridningsmått.

Ett resultat av Monte-Carlo-simuleringar, hämtat från en tidigare rapport, Andersson m.fl. [1], kan ses i figur 3.5. De enskilda punkterna i figuren motsvarar resultatet av en enskild simulering och totalt har det gjorts 500 simuleringar.

3.2 Snabbhet

En lägesbestämning kan som tidigare nämnts delas in i två steg, insamling av underlag och beräkning av ett emitterläge från detta underlag. Stegen tar var för sig tid att utföra vilket inverkar på metodens snabbhet. Styrande vad gäller insamlingstiden är ofta den tid som åtgår till att skapa en geometrisk mätbas. Denna faktor kommer framför allt in när endast ett enskilt flygplan används och lägesbestämningen genomförs med metoder som egentriangulering, DDOA eller LBI. När tvådimensionell riktningsmätning används mot emitterar på marken behövs ingen mätbas och läget kan i princip bestämmas momentant. De olika lägesbestämningsmetoderna kommer att beskrivas närmare i kapitel 6.

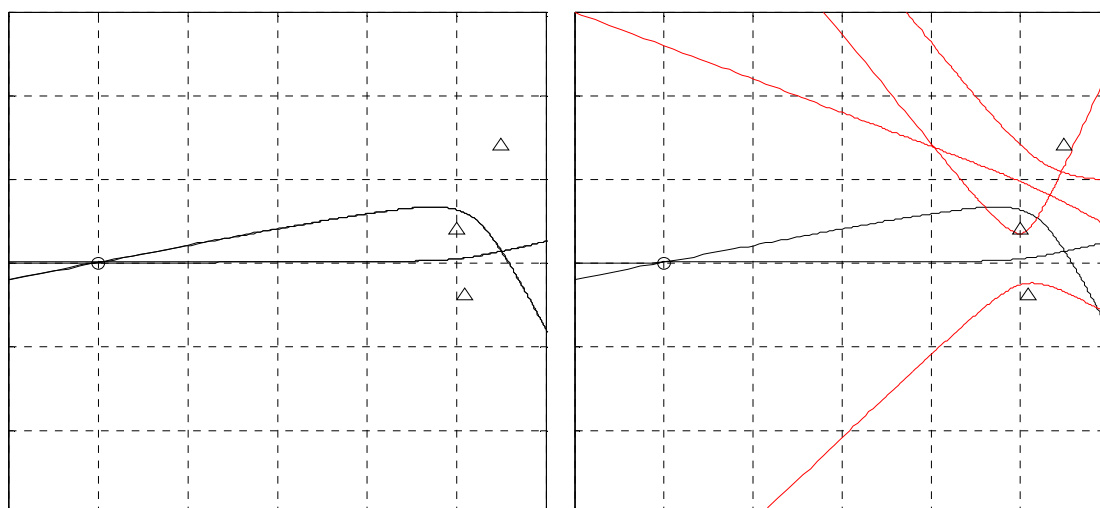
När lägesbestämning sker genom samverkan mellan inmätande flygplan som är geometriskt separerade finns momentan tillgång till en eller flera mätbaser. I gengäld kan tiden för att överföra insamlade data mellan inmätarna på ett påtagligt sätt bidra till den totala lägesbestämningstiden – i vart fall om länkförbindelsens bandbredd är måttlig. För att öka snabbheten kan den mängd data som överförs minskas vilket naturligtvis försämrar noggrannheten. Lägesbestämningen är därmed – som i de flesta fall – en kompromiss mellan noggrannhet och snabbhet, vilket bland annat framgår av figur 2.1.

3.3 Entydighet

Det är önskvärt att en algoritm för emitterlokalisering endast pekar ut en enda punkt där emittern kan befinna sig, vilket inte alltid är fallet. En så kallad *fundamental mångtydighet* förekommer ofta hos flera av lägesbestämningsmetoderna varvid ett falskt emitterläge förutom det korrekta existerar. Positionen för det falska emitterläget är beroende av den aktuella geometrin mellan inmätningarna och det korrekta emitterläget. Genomgående är det falska respektive sanna alternativet placerade på olika sidor av mätbasen eller mätbaserna, vilket illustreras av den vänstra delen av figur 3.6. Den fundamentala mångtydigheten kan därmed lösas med en kompletterande metod som medger sidobestämning. Den grova riktningsmätning som normalt utförs av ett flygplans radarvarnare kan i många fall vara tillräcklig för uppgiften.

Utöver den fundamentala mångtydigheten kan ytterligare falska emitterlägen uppstå på grund av att parameterestimeringen i sig är mångtydig. Vid TDOA är exempelvis detta aktuellt om emitterns pulsrepetitionfrekvens är så hög att flera – lika sannolika – tidsskillnader kan beräknas, se högra delen av figur 3.6.

Oavsett orsaken till mångtydigheter resulterar dessa vid simuleringar i att lägeskattningarna fördelar sig i grupper med en viss spridning. För att beskriva lägesbestämningens egenskaper ur ett noggrannhetsperspektiv kan det därför vara fördelaktigt att hantera mångtydigheten som ett separat problem och bara ange medelfel och standardavvikelse för den grupp av lägesestimater som återfinns vid det sanna emitterläget. Detta angreppssätt används bland annat av Dahlin [3] som behandlar frekvensmätning där motsvarande problematik förekommer.



Figur 3.6 Lägesbestämning av emitterar kan av olika orsaker besväras av mångtydigheter. Den vänstra delfiguren ger exempel på hur den så kallade fundamentala mångtydigheten uppstår vid TDOA. De två hyperbelgrenarna skär varandra i två möjliga emitterlägen – ett sant och ett falskt. Utan ytterligare mätningar går det inte avgöra vilket emitterläge som är det korrekta. I den högra delfiguren förekommer fler mångtydigheter än den fundamentala på grund av att de bakomliggande mätningarna av tidsskillnader i sig är mångtydiga.

3.4 Yttäckning

Ett ytterligare prestandamått för en lägesbestämningsmetod som hanterar markbaserade emitterar är yttäckning. Förmågan att övervaka stora ytor skiljer mellan olika metoder och begränsas inte bara av metoderna utan även av fysikaliska fenomen. De faktorer som inverkar är utöver lägesbestämningsmetoden och emitterns egenskaper – däribland frekvens – bland annat sis-mottagarnas känslighet, antennkonfigurationer och flyghöjd.

Lägesbestämningsmetoden betyder mycket. Lobmaxpejling är en avsökande metod där den övervakade ytan söks av med en smal antennlob. Om en emitter inte sänder när den finns i antennloben hittas den inte. Den smala antennloben ger å andra sidan en vinst som gör det möjligt att lägesbestämma emitterar strax bortom horisonten eller i emitterns sidlob. De momentant yttäckande metoderna – exempelvis DDOA och LBI – har möjlighet att bestämma ett emitterläge hitom horisonten utan att besväras av egen intermittens.

Noggrannheten hos ett läge är enligt tidigare avsnitt beroende av de inparametrar som ges till den lägesbestämmande algoritmen. Felen i inparametrarna beror bland annat på sis-mottagarnas känslighet och avståndet till emittern. Längre avstånd ger en svagare signal vilket leder till ett sämre lägesestimater. För en mer utförlig beskrivning av mottagarkänslighet hänvisas till Bergdal m.fl. [4]. Systemets känslighet kan ökas genom att använda antenner med en större antennvinst, men dessa är i gengäld mer direktiva – det vill säga har smalare lobber – och ger därmed en mindre momentan yttäckning. Det ideala ur ett yttäckningsperspektiv är bredlobiga, perifert på flygplanet placerade antenner vilka kan ge en fullständig vinkeltäckning i ett horisontalplan och en yttäckning som bland annat beror av flyghöjden.

Signalens väg från emittern till det insamlade flygplanet kan också blockeras av hinder i terrängen. Genom att öka flyghöjden kan den eftersökta emittern åter komma inom signalspanarens blickfång.

Den yttäckning som lägesbestämningens krav ger skiljer sig från den som behövs för att upptäcka en emitter. Det fall där detta är mest uppenbart är då flera signalspanande flygplan används för lägesbestämning med hjälp av TDOA. Det räcker då att endast en plattform detekterar en emitter för att den ska kunna upptäckas. För att en lägesbestämning ska vara möjlig krävs det antingen att alla plattformarna har tillgång till signalen från emittern samtidigt eller åtminstone parvis.

När endast ett flygplan används sker upptäckt och lägesbestämning från samma plattform, men flygplanet måste ha tillgång till emitterns signal ett flertal gånger under en längre tid. Dessutom måste detta ske på ett sådant sätt att de olika inmätningarna går att relatera till varandra.

4. Inmätning med radarsignalspaning jämfört med andra metoder

Rent allmänt gäller att spaning bedrivs med en förhoppning om att upptäcka ett mål som man efter upptäckt mer eller mindre omsorgsfullt ägnar sig åt att mäta in.

Det finns många sätt att upptäcka ett mål. Gemensamt för alla är att någon egenskap hos målet utnyttjas för upptäckt och sedan inmätning. En utrustning används då som är speciellt anpassad för just den valda målegenskapen och som vanligtvis är användbar både för upptäckt och fortsatt inmätning.

Självklart finns det hos mängden tänkbara mål ett mycket stort antal intressanta egenskaper. Begränsas intresseområdet till mål av traditionell militär typ och målegenskaperna till sådana som kan användas för att upptäcka och mäta in mål med elektromagnetiska metoder och på ett relativt stort avstånd, kan ett antal intressanta målegenskaper skisseras, se figur 4.1.

Beroende på vilken målegenskap man väljer och sedan anpassar spaningsutrustningen till får denna olika egenskaper exempelvis ifråga om ID-förmåga och yttäckning.

Genom att kombinera olika spaningsutrustningar, det vill säga att välja att utnyttja flera olika målegenskaper, kan synergieffekter skapas.

B E L Y S N I N G	E G E N S T R Å L N I N G		
Reflektion, absorption och transmission av EM-energi Kräver en belysningskälla Radar-/IR-signatur	Avsiktlig utsändning av EM-energi Utsändningen är vanligen intermittent "Sändarsignatur" (RF-signature)	GRÄNSFALL	Oavsiktlig emission av EM-energi T ex termisk emission eller UV-strålning IR/UV-signatur

Figur 4.1 Vid spaning (upptäckt/inmätning) mot ett mål med elektromagnetiska metoder kan den målegenskap som utnyttjas vara antingen reflektion/absorption, avsiktligt utsänd energi eller oavsiktligt emitterad energi. Utnyttjas reflektion/absorption krävs en belysningskälla annars inte. Den målegenskap som valts styr det sätt som spaningen måste bedrivas på och avspeglar sig i spaningsresultatet.

4.1 Målegenskaper

Reflektion, absorption och transmission

En viktig egenskap hos mål är deras sätt att reflektera infallande elektromagnetisk strålning, hur det sker vid exempelvis olika infallsriktningar, frekvens och polarisation. Med reflektion besläktade fenomen är absorption och transmission (genomskinlighet).

Reflektion som bas för målupptäckt och inmätning är grundstenen i all radartillämpning. Absorption av den infallande strålningen innebär att en del av denna varken reflekteras eller transmitteras. Egenskapen är oftast negativ ur upptäckts- och inmätningssynpunkt men kan vara positiv om den leder till en ökad kontrast mot bakgrunden.

Vid sidan av reflektion och absorption bör för fullständighets skull även transmission nämnas. Idealt transmitterande (genomskinliga) objekt är självklart svåra ur upptäckts- och inmätningssynpunkt. De varken reflekterar eller absorberar infallande strålning och de anpassar sig alltid perfekt till bakgrunden. Idealt genomskinliga objekt är dock, om de överhuvud taget finns, inte intressanta för den diskussion som förs här.

Belysningssändare

Gemensamt för alla radar är att en belysningskälla krävs. Utan infallande strålning blir det med säkerhet ingen reflektion. Vanligtvis är belysningssändaren samlokaliserad med den mottagare som tar emot reflexen, monostatisk radar, men så måste det inte vara. Bistatisk respektive multistatisk radar använder sig av en eller flera någorlunda fritt lokaliserade belysningssändare.

Belysningssändaren måste heller inte nödvändigtvis vara avsedd som belysningssändare och behöver inte heller tillhöra "egen sida". Passiv radar, även kallad parasiterande radar, utnyttjar reflexer i målet från en sändare som egentligen skall lösa en helt annan uppgift. Exempel på passiv radar finns från 2:a världskrigets *Klein Heidelberg*, som utnyttjade brittiska *Chain Home* för belysning, till dagens *Silent Sentry*, som utnyttjar TV- och rundradiosändare på FM-bandet.

En helt annan typ av belysningssändare, men nog så viktig, är solen som sänder bredbandigt och därvid täcker in bland annat det synliga och det infraröda våglängdsområdet. Med solen som belysningskälla kan vi med exempelvis ögon, TV-kameror och IR-kameror upptäcka och följa mål. Artificiella belysningskällor finns även på det optiska våglängdsområdet men spelar en underordnad roll för upptäckt och målinmätning på långt håll.

Bakgrunden

På det optiska våglängdsområdet spelar målets bakgrund särskilt stor roll för upptäckt/målinmätning. Den ur radarsynpunkt mindre önskvärda målegenskapen absorption kan när det gäller optiska våglängder vara till fördel. Det viktiga är inte en stark reflex utan en god kontrast mot bakgrunden. Ett mörkt mål är lätt att upptäcka och mäta in mot en ljus bakgrund.

Även i radarfallet är bakgrunden viktig. Ett litet mål som en robot kan vara lätt att upptäcka mot en himmelsbakgrund (klotterfri) medan samma mål mot bakgrund av marken kan vara svårt att upptäcka på grund av markklotter. Ett särskilt svårt mål kan ubåtsperiskop sägas vara eftersom det målet i princip aldrig frigör sig från sjöklotterbakgrunden.

Egenstrålning

När det gäller egenstrålning från målet är det både naturligt och nödvändigt att skilja på två fall:

Oavsiktlig emission

Det första fallet handlar främst om den termiska strålning som alla kroppar vars temperatur skiljer sig från den absoluta nollpunkten ger ifrån sig enligt naturens lagar, i

olika grad beroende på kroppens temperatur och emissivitet. Denna form av egenstrålning kan självklart betecknas som oavsiktlig.

En annan snarlik målegenskap är strålningen från en jet- eller raketmotors avgasflamma, exempelvis IR- eller UV-strålning. Även denna form av egenstrålning kan betraktas som oavsiktlig eftersom avsikten med jet-/raketmotorn är en helt annan än att avgasflamman skall avge strålning.

Avsiktlig utsändning

Det andra fallet av egenstrålning svarar mot användning av någon form av sändare på den plattform som utgör mål. Sändaren kan exempelvis ingå i plattformens kommunikationsutrustning, tillhöra dess radar, utgöra en transponder eller vara en störsändare. Denna form av egenstrålning kan betecknas som avsiktlig.

Det senare fallet är den utstrålning som är grunden för signalspaning, som ju går ut på att utvinna information ur avsiktligt utsända signaler oavsett deras ändamål och typ.

Även vid utnyttjande av avsiktlig utstrålning, det vill säga vid signalspaning, spelar bakgrunden en viktig roll. Bakgrunden kan i detta fall sägas vara mängden av signaler av likartat slag som den aktuella signalen men emanerande från källor som kanske inte befinner sig på den plattform som utgör aktuellt mål. Bakgrunden kan också sägas vara brus genererat i omgivningen, det vill säga utanför signalspaningsmottagaren samt brus och intermodulationsprodukter genererade i mottagaren. Liksom i andra spaningsfall krävs vid signalspaning att den från målet utsända signalen ger en tillräcklig kontrast mot bakgrunden för att upptäckt och inmätning skall kunna genomföras med bra resultat.

Signaturbegreppet

Begreppet "signatur" används ofta för att karaktärisera den målegenskap man valt att utnyttja för upptäckt/målinmätning.

I fallet radar ligger begreppet "radarsignatur" mycket nära begreppet målarea. Radarsignatur används allmänt som ett kvalitativt mått vid exempelvis diskussioner om -reduktion av målarea ledande till "låg radarsignatur". Målarea är möjligen vanligare vid kvantitativa beräkningar. I begreppet radarsignatur är ofta en variation med frekvens, infallsriktning och polarisation underförstådd.

När det gäller IR- och UV-signatur är det kanske mera ovanligt med kvantitativa beräkningar men signaturbegreppet används flitigt vid jämförelser mellan olika måltyper och diskussioner om vilken kontrast de gör mot olika bakgrunder.

I fråga om avsiktligt utsänd EM-energi används i stort sett inte något signaturbegrepp alls. För att uppmuntra till ett brett tänkande ifråga om upptäckt/målinmätning vore det positivt med ett signaturbegrepp även för detta fall. Man skulle kunna tänka sig att ett begrepp "sändarsignatur" eller kanske "emittersignatur" skulle kunna vara användbart exempelvis vid diskussionsvis jämförelse mellan olika signalkällor eller vid en analys av möjligheterna att på det ena eller det andra sättet upptäcka och mäta in en plattform.

I begreppet sändarsignatur bör då ingå någon slags karaktäristik av hur den aktuella signalkällan används, exempelvis hur ofta. Signalkällors tillgänglighet diskuteras kortfattat i ett eget avsnitt senare i detta kapitel.

I åtminstone USA kan begreppet "RF-signature" sägas vara etablerat.

4.2 Spaningsegenskaper

Den spaning som – efter vald målegenskap – kommer att bedrivas får naturligtvis vitt skilda egenskaper just beroende på den egenskap hos målet som man valt att utnyttja. I denna översiktliga diskussion har de målegenskaper som kan utnyttjas getts en grov och enbart kvalitativ beskrivning. Det är därför bara möjligt att i grova drag beskriva vilka konsekvenserna blir av valet av utnyttjad målegenskap. I det följande diskuteras olika spaningsmetoder strukturerat efter deras egenskaper ifråga om räckvidd, precision i lägesbestämning, ID-förmåga, tillgänglighet och den röjningsrisk de medför.

Räckvidd

Väljer man reflektion som den egenskap som skall utnyttjas har man dragit på sig två problem. Dels skall man på något sätt belysa målet med tillräcklig intensitet dels ska man ta emot den reflekterade signalen med tillräcklig känslighet. Detta kan också uttryckas så att det här handlar om tvåvägs vågutbredning – från spaningsutrustningen till målet och åter. Att tvåvägsutbredning gäller kan knappast betraktas som någon fördel ur räckviddssynpunkt. En fördel är dock att mottagningen i detta fall kan signalanpassas till den signal som kommer från målet men som härrör från spaningsutrustningen självt och därför är känd till sin karaktär.

Väljer man att utnyttja egenstrålning hos målet bortfaller det ena problemet nämligen belysningsproblemet. Å andra sidan är man nu utlämnad till den signal som målet strålar ut samt dess karaktär och effektnivå. Envägsutbredning, som det här handlar om, brukar betraktas som gynnsamt ur räckviddssynpunkt men helheten är lite mera komplicerad än så.

Ett är dock säkert, att högre frekvens i princip medför kortare räckvidd. Utbredningsdämpningen ökar med ökande frekvens liksom förluster av olika slag, exempelvis atmosfärsdämpning. Väljer man att utnyttja målets reflektionsförmåga respektive egenstrålning i form av avsiktlig sändning så kan detta ske över hela spektrat. Frekvensen kan därmed sägas vara neutral i fråga om räckviddsbalansen mellan utnyttjande av reflektion i respektive egensändning från målet. Väljer man att exempelvis utnyttja reflektion av IR-strålning eller egenstrålning i form av IR- eller UV-strålning så är frekvensen ungefärligen given och dessutom mycket hög och därmed blir räckvidden alltid kort utom i rena undantagsfall.

Värt att notera är dock att vid ökande frekvens ökar också möjligheterna att genom användning av en i förhållande till våglängden stor apertur – exempelvis en parabolantenn eller en optisk lins – kompensera för hög utbredningsdämpning eller stora förluster. Detta rubbar dock inte den allmänna regeln att hög frekvens är negativt ur räckviddssynpunkt.

Precision i lägesbestämning

Den precision som kan uppnås vid lägesbestämning av ett mål när man valt att utnyttja en viss egenskap hos målet beror på vilken den valda egenskapen är. Dessutom är precisionen också beroende av ett antal andra faktorer på ett ofta avgörande sätt. Exempel på sådana faktorer är: avståndet till målet, geometrin på den utnyttjande (inmätande) sidan med en eller flera inmätare, signal/brus-förhållande och sist men inte minst den tid som står till förfogande för lägesbestämningen. Större delen av föreliggande rapport är ägnad åt att beskriva dessa faktorer men endast för fallet

utnyttjande av avsiktligt utsända signaler och då med fokusering mot sändare på mikrovågsområdet.

Försöker man jämföra utnyttjande av reflektion med utnyttjande av egensändning inom mikrovågsområdet och på lägre frekvenser är det svårt att belägga att det finns någon principiell skillnad i den lägesprecision som är möjlig att uppnå.

Ifråga om det optiska frekvensområdet – främst utnyttjande av reflekterad eller egen-emitterad IR-strålning – gäller att avståndet till målet måste vara kort och därmed finns en grund för hög precision i lägesbestämningen. Dessutom gäller att aperturer som är stora i våglängder räknat kan användas vilket ytterligare bidrar till precisionen i lägesbestämning. Liknande förhållanden kan sägas gälla på millimetervågsområdet men då främst ifråga om utnyttjande av reflekterad signal.

När det gäller precision i lägesbestämning framstår utnyttjande av exempelvis IR-strålning som något av en vinnare men endast på relativt korta avstånd.

ID-förmåga

Efter valet av den målegenskap man vill utnyttja gäller, som tidigare sagts, att i ett första skede att upptäcka målet och i ett andra skede handlar det om att mäta in målet.

Lägesbestämning är en vanlig form av inmätning men inte den enda och kanske inte den viktigaste. Att på något sätt karaktärisera målet kan vara nog så viktigt och det man då skapar kan allmänt beskrivas som en bild. Bilden kan ges många olika former för att så bra som möjligt ta till vara de möjligheter som finns att utvinna information.

Allt är dock inte möjligt att åstadkomma. En gräns sätts redan vid valet av utnyttjad målegenskap och utrymmet blir än snävare genom de begränsningar som använd mätutrustning medför. Man kan grovt beskriva de bilder som skapas i två nivåer: En *kartbild* visar målet relaterat exempelvis till andra mål och till inmätaren medan en *målbild* ger detaljerad information om målet.

Både kartbild och målbild kan självklart anta många olika former. I detta sammanhang är det tillräckligt att peka på två olika former av målbild som skulle kunna kallas *fotoliknande målbild* respektive *parametriserad målbild* och där benämningarna förhoppningsvis är tillräckligt beskrivande.

Syftet med den karaktärisering av målet som här kallas målbild är att kunna identifiera målet som ett led i byggandet av en aktuell omvärldsbild och ytterst att på rätt sätt kunna angripa målet.

Vilken betydelse har då valet av utnyttjad målegenskap för möjligheterna att identifiera målet? Allmänt gäller att ju högre frekvensen är desto större är möjligheterna att skapa en bra fotoliknande målbild och därmed att kunna identifiera den plattform som utgör mål. På optiska frekvenser är det relativt enkelt att skapa en fotoliknande målbild, exempelvis genom att utnyttja egenemitterad eller reflekterad IR-strålning. Man måste dock komma ganska nära målet. Motsvarande förhållanden gäller på millimetervågsområdet. På lägre frekvenser är det svårt men inte helt omöjligt att skapa en fotoliknande målbild men våglängden måste dock vara liten i förhållande till målstorleken.

Väljer man att utnyttja avsiktligt utsända signaler är det givetvis omöjligt att skapa en fotoliknande målbild. Däremot är möjligheterna goda att skapa en parametriserad målbild även om den egentligen hänför sig till använd sändare och inte till plattformen i sig. Den parametriserade målbild som på detta sätt relativt enkelt kan skapas kan vara utomordentligt detaljerad och ge en god grund för identifiering av

sändaren men kanske också plattformen. Kan flera sändare identifieras och knytas till samma plattform ökar möjligheterna att säkert identifiera även plattformen. För identifieringen krävs tillgång till bland annat ett signalreferensbibliotek, det vill säga en sammanställning av tidigare mätresultat i strukturerad form.

En parametriserad målbild med samma kvalitet som utnyttjande av avsiktligt utsända signaler möjliggör kan inte skapas om man valt att utnyttja reflekterade eller oavsiktligt emitterade signaler.

Sammanfattningsvis gäller att en innehållsrik parametriserad målbild kan skapas på alla frekvenser genom att utnyttja avsiktligt utsända signaler och att denna målbild kan ge ett gott ID-stöd. Vidare gäller också att en bra fotoliknande målbild kan skapas på höga frekvenser och ge ett visst ID-stöd.

Tillgänglighet

Innan man slutligen bestämmer vilken målegenskap som skall utnyttjas bör man tänka igenom hur tillgänglig den tilltänkta målegenskapen kommer att vara under de premisser som i övrigt kommer att gälla för den spaning som skall bedrivas. Följande frågor kan då vara relevanta:

Kommer den aktuella målegenskapen att alltid finnas hos alla mål eller bara intermittent hos somliga mål? Är det möjligt att utforma en plattform – presumptivt mål – så att aktuell målegenskap saknas helt eller nästan helt? Är det möjligt att maskera oavsiktlig egenstrålning i viss riktning exempelvis mot horisonten?

Reflektioner från en plattform vid belysning är mycket svåra att helt komma ifrån men i retroriktningen och över ett begränsat frekvensområde kan den reflekterade signalen bli oanvändbart svag i synnerhet om absorberande material dessutom används.

Att avstå från avsiktlig sändning från en plattform är inte svårt i det enskilda fallet och under en begränsad tid. Att systemmässigt alltid avstå från avsiktlig sändning är däremot utomordentligt svårt särskilt i framtida nätverksorienterade strukturer.

Röjningsrisk

Den röjningsrisk som här kortfattat diskuteras är endast den röjningsrisk som spaningsplattformens egen sändarsignatur medför.

Väljer man att utnyttja någon form av egenstrålning från målet för upptäckt och inmätning är spaningsplattformens sändarsignatur obefintlig liksom röjningsrisken men om kommunikationen med omvärlden från spaningsplattformen sker över radio – vilket är ganska sannolikt – finns det likväl en sändarsignatur och en risk för röjning genom denna.

Väljer man att utnyttja reflektion/absorption får man skilja på fallen att belysnings-sändaren finns på spaningsplattformen – det monostatiska fallet – eller på annat ställe. I det monostatiska fallet kommer belysnings-sändaren sannolikt att ge ett dominerande bidrag till spaningsplattformens sändarsignatur.

I de bistatiska och multistatiska fallen kommer respektive belysningsplattform givetvis att få en lätt utnyttjbar sändarsignatur men är kanske mindre intressant som mål. Solen och andra liknande belysningskällor kan man i detta sammanhang glömma.

4.3 Spaningsegenskaper för kombinationsmetoder

Väljer man att utnyttja endast en av de tre grundläggande målegenskaperna innebär detta en suboptimering. En sådan kan givetvis vara ekonomiskt betingad.

Antag att man bortser från ekonomiska begränsningar och väljer att utrusta spaningsplattformen för samtliga av de tre grundläggande målegenskaperna. Spaningsplattformen utrustas därför med någon form av radar, någon form av sis-system och någon form av optronisk spaningsutrustning.

Kan något generellt sägas om vilka roller de tre nu nämnda utrustningarna bör spela?

Radarn tar alla mål med tillräcklig målarea, den kommer sannolikt inte att ge någon icke kooperativ ID och den kommer att röja spaningsplattformen. (Millimetervågsradar har liknande egenskaper som optroniken, se nedan.)

Sis-systemet ger ingen garanti för målinmätning i det speciella fallet men kommer likväl att producera många mål. Sis-systemet kommer dessutom att ge icke kooperativ ID och det är inte röjande.

Optroniken kan vara men behöver inte vara röjande. Den fungerar bäst på korta avstånd där den kan ge icke kooperativ ID.

Åtskilliga exempel finns på kombinationer av spaningsutrustningar. En vanlig kombination är att använda sis-system för överblick och ID för att efter invisning använda radar eller optronik i ett närområde där avståndet är kort.

5. En eller flera inmätande flygplan?

Lägesbestämning av emitterar med hjälp av radarvarnare eller radarsis-utrustning kan ske med ett enskilt flygplan eller via samverkan mellan flera inmätare.

Finns krav på momentan eller mycket snabb lägesbestämning kan inte ett enskilt flygplans förflyttning utnyttjas för att skapa en mätbas. Kravet kan dock klaras om flera – lagom separerade – flygplan samverkar. Tvådimensionell rikttningsbestämning av en markbaserad eller ytbaserad emitter kan vara ett kraftfullt alternativ men flyghöjden får inte vara för låg om det område där noggranna lägesbestämningar är möjliga ska nå en önskvärd storlek.

Vid samverkan mellan flygplan finns behov av extern kommunikation. Kravet på förbindelsen är beroende av metod. Ett sätt att realisera TDOA är exempelvis att via en länk överföra den aktuella signalens vågform vilket kan erfordra både bredbandighet och predikterbar fördröjning.

Samverkan förutsätter även vad som ibland benämns *relativ identifiering*, det vill säga att lägesberäkning baseras på signal från samma emitter. Om det finns risk för sammanblandning finns också risk för att falska lägen kan uppstå.

Inom VMS Flyg har nästan uteslutande precisionslägesbestämning från en enskild plattform studerats varför tyngdpunkten för rapporten ligger inom just lägesbestämning med en enda inmätande plattform. Kommande år kommer radarsis-forskningen att inrymmas inom VMS NBF, där fokus kommer att ligga på metoder som använder sig av flera inmätande enheter.

Notera att det även i ett nätverkskoncept kan vara relevant att studera hur lägesbestämning ska genomföras från en enda plattform. En anledning är att även om flera plattformar finns att tillgå kan nätverksförbindelsen mellan dessa sluta fungera eller på annat sätt störas. Ett annat skäl kan vara att nätverksförbindelsen inte finns tillgänglig på grund av att tyst uppträdande prioriteras. Dessutom kan den situationen inträffa att inte alla plattformar blir samtidigt belysta. En sådan situation kan exempelvis lösas genom en återgång till lägesbestämning från en plattform, förutsatt att lägesbestämningsmetoden så tillåter.

Att använda flera dedicerade flygplan för en lägesbestämning innebär en betydligt ökad resursanvändning jämfört med vad som gäller vid ett enskilt inmätande flygplan, en resursanvändning som inte alltid kan försvaras. Om inmätningen för lägesbestämningen utgör en sidouppgift som löses parallellt med en huvuduppgift, som motiverar närvaron i aktuellt område, kommer saken i ett annat läge. Det amerikanska försökssystemet AT3 har ett sådant upplägg.

6. Grundläggande lägesbestämningsprinciper

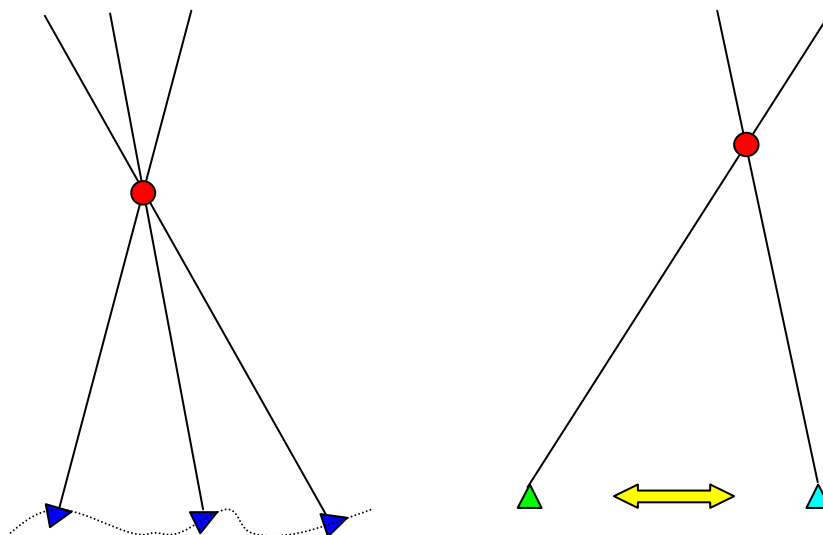
I det här kapitlet beskrivs alternativa principer som är aktuella för att med flygburna radarvarnare eller radarsis-system lägesbestämma emitterar. Vissa av principerna är användbara med såväl ett som flera inmätande flygplan medan andra förutsätter fler inmätare för att ett läge ska kunna bestämmas. För att hålla beskrivningarna överskådliga är de i huvudsak avgränsade till att hantera lägesbestämning i två dimensioner. Undantaget är avsnittet som behandlar vertikal triangulering där en tredimensionell betraktelse är nödvändig.

Syftet med kapitlet är att läsaren ska ges en övergripande förståelse för hur respektive princip fungerar men i vissa fall ges även exempel på prestandaegenskaper.

Genom att kombinera olika principer för lägesbestämning kan ofta metoder med bättre noggrannhet och robusthet erhållas. Ett antal olika metoder som utnyttjar kombinationer av de lägesbestämningsprinciper som beskrivs i det här kapitlet behandlas i kapitel 7.

6.1 Riktningmätning och triangulering

Triangulering som även kallas krysspejling är en välkänd princip för lägesbestämning med signalspaningssensorer. Den kan antingen utföras genom samverkan mellan två eller flera inmätare eller genom att en inmätare flyger upp en pejlbas. Det senare alternativet brukar benämnas *egentriangulering*.



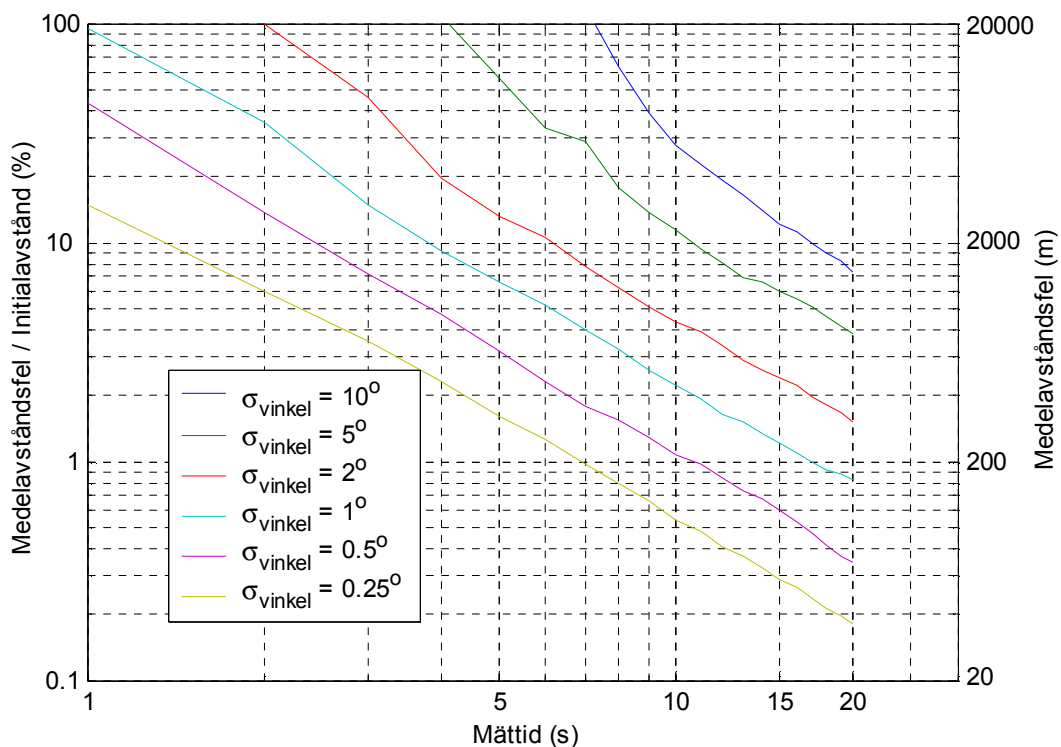
Figur 6.1 Triangulering kan ske via riktningmätningar från två eller flera positioner. Riktningmätningarna erhålls genom att ett flygplan bestämmer riktningen till emittern upprepade gånger eller att flera inmätande flygplan samverkar.

Noggrannheten vid triangulering bestäms av:

- Riktningmätningarnas antal och positioner relativt varandra och emittern
- Noggrannheten hos riktningmätningarna
- Kvaliteten i bestämningen av inmätningpositionerna

För en beskrivning av geometriens inverkan på lägesnoggrannheten hänvisas till Bergdal m.fl. [4]. En viktig parameter i sammanhanget är den så kallade kryssvinkeln som är den vinkel med vilken två – mot samma emitter – inmätta infallsriktningar skär varandra. Kryssvinkeln bestäms av avståndet till emittern i kombination med storleken på den mätbas som exponeras mot emittern.

Den ideala kryssvinkeln ur noggrannhetssynpunkt är 90° . När avståndet till emittern är stort i förhållande till den exponerade mätbasen blir den resulterande kryssvinkeln liten. Konsekvensen är att lägesbestämningen då har dålig noggrannhet i avståndsled. Detta är ett påtagligt problem exempelvis vid egentriangulering där bra avståndsinformation inte kan nås på kort tid, se figur 6.2.



Figur 6.2 Simuleringsresultat som för ett geometriskt typfall visar hur lägesosäkerheten vid triangulering minskar med ökande flygsträcka och minskad osäkerhet i riktningmätningen. Det aktuella typfallet är Rakbana, enligt bilaga A. Initialavståndet är 20 km vilket innebär att 1 % motsvarar 200 m. Av diagrammet framgår exempelvis att riktningmätning med $0,25^\circ$ standardavvikelse efter 20 s ger cirka 40 m medelavståndsfel vid lägesbestämningen. Trianguleringen är baserad på cirka 20 riktningmätningar per sekund. Vid 20 s innebär det att totalt cirka 400 riktningmätningar är jämnt fördelade längs den då 6 km långa flygbanan.

Noggrannheten i riktningmätningarna påverkas generellt av signal/brus-förhållandet och möjligheten att medelvärdesbilda flera mätningar. (Vilket i princip motsvarar en höjning av signal/brus-förhållandet.) Därutöver inverkar ytterligare ett antal parametrar som beror av vilken metod för riktningmätning som används.

I de följande avsnitten beskrivs och kommenteras några alternativa metoder för inmätning av riktningen till en emitter. En utförligare beskrivning kan exempelvis hittas i Bergdal m.fl. [5]. Tyngdpunkten i den här rapporten är – i fråga om riktningbestämning – förlagd på interferometri som bedöms vara mest aktuell för noggrann lägesbestämning från små taktiska flygplan.

Lobmaxpejling

Lobmaxpejling är en traditionell princip för rikttningsbestämning, som ofta återfinns exempelvis hos en spaningsradar. Metoden kräver tillgång till en rörlig lob med riktverkan det vill säga en antenn som åtminstone i en dimension är stor i förhållande till våglängden. Inom radarsis-området förekommer därför lobmaxpejling på större flygplan med ELINT²-uppgifter men den är ovanlig på mindre taktiska flygplan. Bland annat genom utvecklingen av bredbandiga gruppantenner kan dock detta alternativ inte helt avskrivas.

En nackdel med lobmaxpejling är att den inte är momentan utan att avsökning krävs för att ge vinkeltäckning. Konsekvensen är att upptäcktsegenskaperna är annorlunda än för momentana vinkelmätare (amplitudmonopuls och interferometri) som använder breda lober.

En fördel med riktlobens antennvinst är att systemkänsligheten förbättras. Eftersom rikttningsmätning med hjälp av lobmaxpejling måste säkerställa att signalen har tagits emot i huvudloben – vilket i automatiska system oftast sker genom amplitudjämförelse med en bredlobsantenn – finns dock ingen garanti för att detektion också resulterar i en rikttningsinmätning. Anledningen förklaras ingående i Bergdal m.fl. [5] där begreppet pejlkänslighet används som ett komplement till systemkänslighet.

Av resursskäl har lobmaxpejling inte studerats inom VMS Flyg. I litteraturen återfinns dock exempelvis uttryck för hur den brusbegränsande noggrannheten beror av antennstorleken och signal/brus-förhållandet. Se exempelvis Schleher [6].

Ingen egen analys är genomförd för att verifiera giltigheten i denna typ av samband, varför de heller inte har inkluderats i den här rapporten.

Amplitudmonopuls

Amplitudmonopuls är den vanligaste principen för rikttningsbestämning i flygburna radarvarnare. Normalt används 4 antenner med de ca 90° breda huvudloberna centrerade i riktningarna $\pm 45^\circ$ och $\pm 135^\circ$ i vingplanet. Infallsriktningen erhålls vid amplitudmonopuls genom att inbördes jämföra den i de fyra antennerna mottagna signaleffekten.

Rikttningsnoggrannheten hos en radarvarnare med fyra antenner är ofta i storleksordningen 7-10° RMS. Rikttningsfelet orsakas bland annat av:

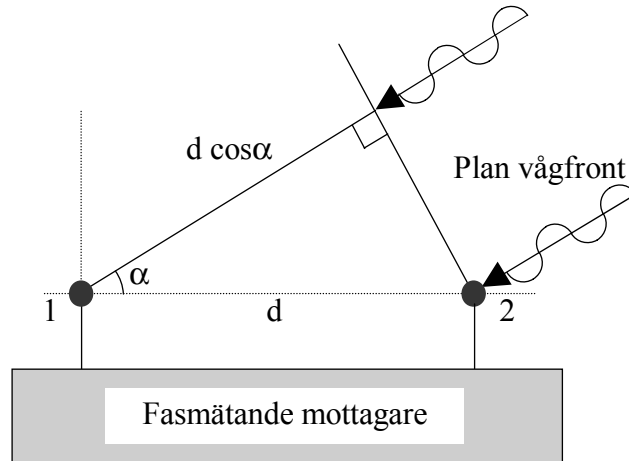
- Bristande amplitudmatchning mellan antenner eller mottagarkanalerna
- Avvikelser i lobform eller lobinriktning
- Lågt signal/brusförhållande

Av Bergdal m.fl. [5] framgår att noggrannheten exempelvis kan förbättras genom att minska lobbredden. Detta innebär att amplitudmonopuls kan vara en intressant princip för momentan rikttningsbestämning när tillgång finns till bredbandiga gruppantenner. Ett konkurrerande alternativ är dock interferometri som ibland benämns fasmonopuls.

Interferometri

Principen för interferometri framgår av figur 6.3.

² Electronic Intelligence



Figur 6.3 En interferometer kan bestämma infallsriktningen till en emitter genom att utnyttja att den resulterande fasskillnaden mellan två antenner är beroende av infallsriktningen. Fasskillnaden beror även av avståndet mellan antennerna och emitters våglängd (frekvens).

En infallande plan vågfront ger vid de två antennerna upphov till en sann fasskillnad ψ som enligt ekvation 6.1 beror av antennavståndet d , våglängden λ och infallsriktningen α .

$$\psi = 2\pi \cdot \frac{d}{\lambda} \cdot \cos \alpha \quad (\text{radianer}) \quad (6.1)$$

Med känt antennavstånd kan därför infallsriktningen fastställas enligt ekvation 6.2 om frekvensen och fasskillnaden kan bestämmas.

$$\alpha = \arccos\left(\frac{\psi \cdot \lambda}{2\pi \cdot d}\right) \quad (6.2)$$

En besvärande egenskap hos en verklig interferometer är att en mottagare endast kan mäta fas inom ett intervall med bredden 2π , exempelvis från $-\pi$ till och med $+\pi$. Alla hela 2π i den sanna fasskillnaden går därmed förlorade och kvar finns en *mätbar fasskillnad* φ .

Om ovanstående ekvationer utökas för att inkludera denna realitet erhålls ekvation 6.3, där n är ett okänt heltal.

$$\psi = \varphi - n \cdot 2\pi = 2\pi \cdot \frac{d}{\lambda} \cdot \cos \alpha \quad (\text{radianer}) \quad (6.3)$$

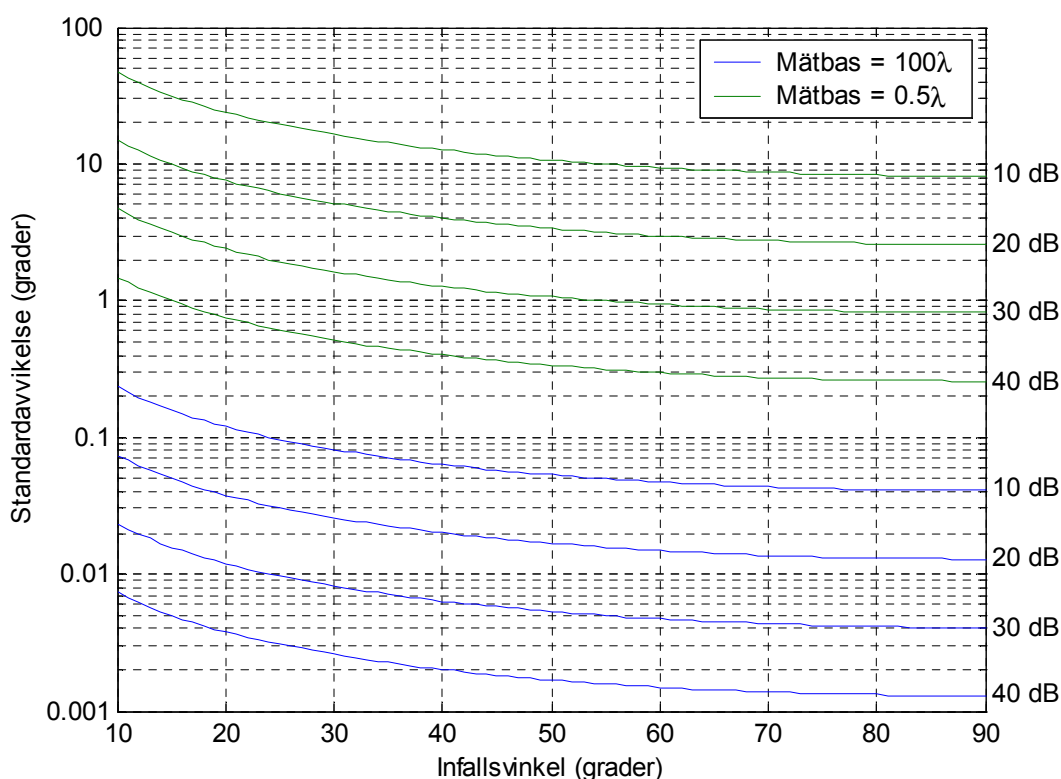
Detta innebär att infallsriktningen måste bestämmas med hjälp av ekvation 6.4.

$$\alpha = \arccos \left(\frac{\frac{\varphi}{2\pi} - n}{d/\lambda} \right) \quad (6.4)$$

Konsekvensen av detta är att riktningsmätningen är entydig inom hela sektorn från 0° till 180° endast om den sanna fasskillnaden överensstämmer med den mätbara fasskillnaden, vilket innebär att heltalsvariabeln n är lika med noll. Av ekvation 6.3 framgår att detta gäller om antennavståndet är mindre än en halv våglängd.

En uppenbar lösning på problematiken med mångtydigheter är därför att välja en mätbas som är kortare än en halv våglängd för den högsta frekvens som är aktuell.

Enligt Bergdal m.fl. [5] är villkoret svårt att uppfylla om bredbandighet eftersträvas. Dessutom minskar den inverkan som fäsel har på den estimerade infallsvinkeln om mätbasen ökas, se ekvation 6.4. Enligt referensen är ett alternativ för att nå såväl entydighet som noggrannhet att använda flera än två element placerade som en linjär array med lämpliga avstånd mellan antennerna. Om mångtydigheten löses enligt denna metod ges den resulterande riktningsnoggrannheten i huvudsak av den längsta antennmätbasen.



Figur 6.4 Storleken på riktningsfelet hos en interferometer på grund av brus bestäms av signal/brusförhållandet, den aktuella infallsriktningen och kvoten mellan antennavståndet och våglängden. Infallsvinkeln definieras enligt figur 6.3. Riktningsfel som förorsakas av brus kan – relativt vad som framgår av det här diagrammet – minskas genom att medelvärdesbilda över flera mätningar.

Hur riktningsfelets standardavvikelse σ_θ beror av brus ges av ekvation 6.5 som är framtagen med stöd av Barton [7]. Förutom signal/brus-förhållandet SNR inverkar avståndet mellan antennerna räknat i våglängder d/λ och infallsriktningen α .

$$\sigma_\theta = \frac{\lambda}{\pi \cdot d \cdot \sin \alpha \cdot \sqrt{2 \cdot SNR}} \quad (\text{radianer}) \quad (6.5)$$

Figur 6.4 presenterar riktningsfelets standardavvikelse vid olika signal/brus-förhållande och infallsvinklar. Antennmätbaserna $\frac{1}{2}$ våglängd respektive 100 våglängder används. Hos en interferometer med en 100 våglängder lång mätbas är standardavvikelsen – enligt figur 6.4 – endast i storleksordningen $1/100$ -grad när signal/brus-förhållandet är drygt 20 dB. Tydligt finns potential till mycket hög noggrannhet i riktningsmätningen när mätbasen är lång. Detta utnyttjas vid en lägesbestämningsprincip som benämns långbas-interferometri, se vidare avsnitt 6.6.

I en tredimensionell verklighet kan problem fås då de av interferometern inmätta vinklarna ska tolkas. Normalt brukar emittern antas ligga i ett plan. Den vinkel som mäts av interferometern tolkas då som infallsvinkeln i det antagna emitterplanet. Om antagandet är korrekt erhålls inget fel, men då emittern inte ligger i det antagna planet kommer det att resultera i en felaktig uppfattning om riktningen till emittern.

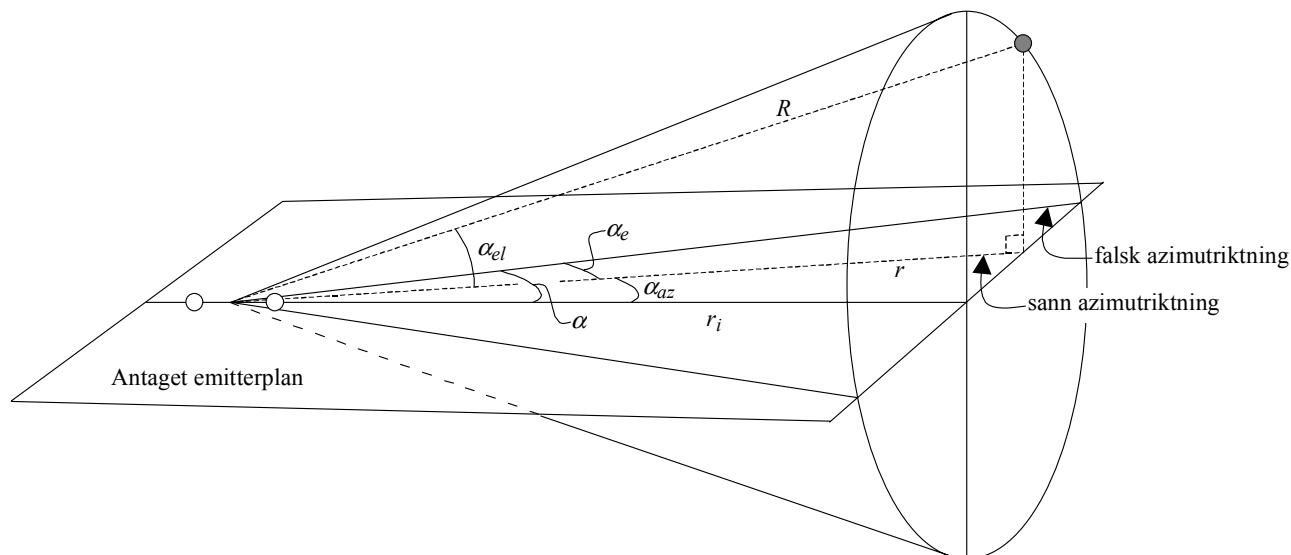
För att illustrera hur detta fel uppkommer kan följande situation betraktas. En interferometer placeras så att antennmätbasen och dess förlängning utgör centralaxeln i en kon. Konens spets placeras i interferometerens centrum. Emittern placeras någonstans på konens mantelyta. Den vinkel som mäts av interferometern är då konens toppvinkel, vilket gäller oavsett var på konen emittern befinner sig. Resonemanget illustreras grafiskt i figur 6.5. Notera att konens toppvinkel är α , att α_{el} är elevationsvinkeln, α_{az} är azimuthvinkeln i det antagna emitterplanet och α_e är det riktningsfel som kan uppstå – koningsfelet. Dessutom betecknar R avståndet från interferometerens centrum till emittern, r är avståndet till projektionen av emitterläget på det antagna emitterplanet och r_i är det på konens centralaxel projicerade avståndet.

Då figur 6.5 studeras inses att om emittern ligger i det antagna planet sammanfaller azimuthvinkeln med konens toppvinkel, vilket nämnts tidigare. Då emittern inte finns i det antagna planet kommer interferometern fortfarande att mäta konens toppvinkel. Den sanna azimuthvinkeln kommer dock inte att vara lika med toppvinkeln längre. Vanligtvis tolkas den inmätta toppvinkeln som azimuthvinkel, vilket leder till att ett fel uppstår. Detta fel brukar som ovan nämnts benämnas koningsfel. Notera att sann azimuthvinkel alltid har samma eller ett lägre belopp än toppvinkeln, det vill säga den uppmätta infallsvinkeln.

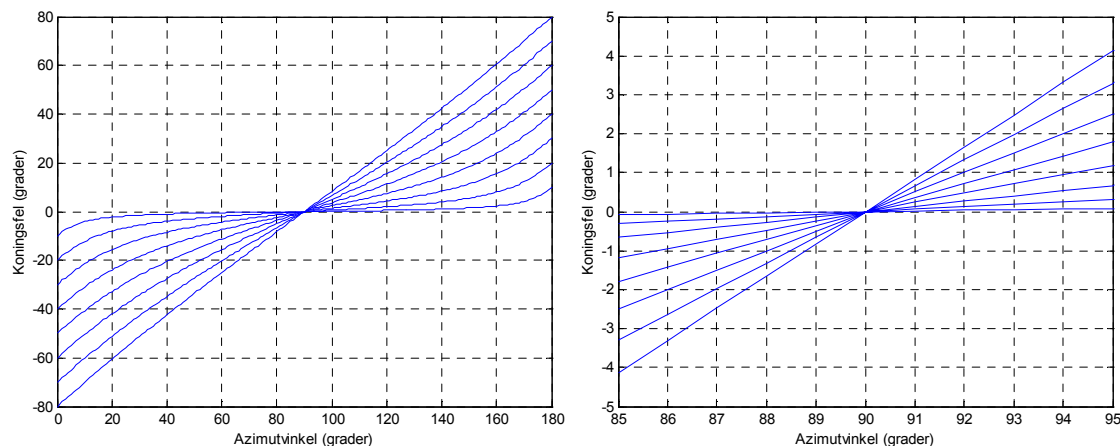
För att utreda koningsfelets kvantitativa inverkan kan figur 6.5 användas för att sätta upp ett ekvationssystem, ur vilket beroendet mellan toppvinkel, elevationsvinkel och azimuthvinkel kan lösas ut, se ekvation 6.6.

$$\begin{cases} r_i = r \cos \alpha_{az} \\ r = R \cos \alpha_{el} \\ r_i = R \cos \alpha \end{cases} \Rightarrow \cos \alpha = \cos \alpha_{el} \cos \alpha_{az} \quad (6.6)$$

Som framgår av figur 6.6 är koningsfelet litet för såväl azimutvinklar nära 90° (infall vinkelrätt mot mätbasen) som för små elevationsvinklar (emittern ligger nära azimutplanet).



Figur 6.5 Illustration av koningsfelets uppkomst och konsekvens. Det verkliga emitterläget är markerat med en grå punkt. Om konens toppvinkel α , det vill säga den vinkel som interferometern faktiskt mäter tolkas som azimutvinkel fås ett fel i azimutriktningen, vilket brukar benämnas koningsfel. Den verkliga azimutvinkeln α_{az} är som synes en helt annan än den uppmätta vinkeln till följd av att elevationsvinkeln α_{el} inte är noll. Koningsfelet betecknas i figuren med α_e .



Figur 6.6 Koningsfelet hos en interferometer med en linjär antennarray beror av infallsvinkeln i azimut och elevation. Felet är alltid noll vid azimutinfall vinkelrätt mot mätbasen (azimut= 90°). För andra azimutvinklar ökar felet med ökande elevationsvinkel. Högra figuren är en uppförstoring av den mittre delen av den vänstra figuren. Linjerna visar felet för elevationer från 10° till 80° i 10° -steg.

Ytterligare en önskad effekt hos en interferometer med mätbaser i endast en dimension är att riktighetsbestämning av emitterar som ligger i mätbasens plan besväras av en fundamental mångtydighet som motsvarar den verkliga infallsriktningens spegling i mätbasen. Problemet kan exempelvis hanteras genom att antennerna har en viss

riktverkan som undertrycker infall från bakåtsektorn. En alternativ metod är att utnyttja grov riktningsinformation från exempelvis amplitudmonopuls.

Ett sätt att eliminera koningsfelet är att utnyttja två ortogonala mätbaser. Denna lösning resulterar i att riktningen till emittern kan bestämmas i både azimut- och elevationsled, vilket i nästa avsnitt benämns tvådimensionell riktningsmätning. Riktningen till emittern ges av skärningen mellan två koners mantelytor.

6.2 Tvådimensionell riktningsmätning av mark- eller ytbaserad emitter

Tvådimensionell mätning av en signals infallsriktning möjliggör för sis-plattformen att i vissa fall lägesbestämma emittern i tre dimensioner. Signalens infallsvinkel kan exempelvis bestämmas såväl i flygplanets ving- som fenplan.

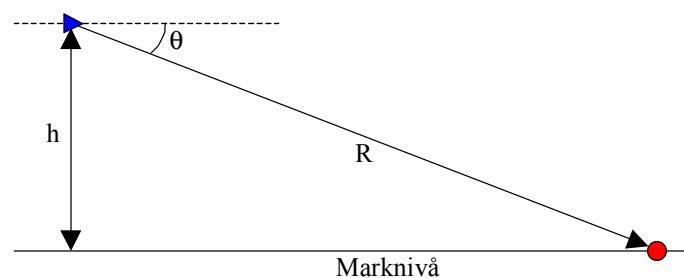
Normalt kräver triangulering två geografiskt separerade inmättningsplatser för att ett läge ska kunna beräknas. Mäts infallsriktningen i två ortogonala dimensioner och emittern antas vara mark- eller ytbaserad (det vill säga en dimension är känd) kan lägesbestämningen genomföras momentant från en enda mätplats.

För att bestämma avståndet till emittern brukar så kallad vertikal triangulering användas. Avståndet beräknas genom användning av den inmätta elevationsvinkeln och antagande om att emittern befinner sig i mark- eller ytplanet. Emittirläget är alltså den punkt där den inmätta riktningen skär markplanet. I det fall då marknivå är plan utgör plattformens flyghöjd den vertikala trianguleringens mätbas. Om markytan inte är plan blir situationen något mer komplex vilket berörs längre fram i detta avsnitt. Dessutom kan tilläggas att då markytan inte är plan kan det vara lämplig att lagra information om dess utseende. Detta kan till exempel ske i form av en så kallad terrängdatabas.

Precis som vid alla typer av triangulering fås försämrad noggrannhet om mätbasen är kort. I fallet med tvådimensionell riktningsmätning innebär det att osäkerheten i beräkningen av avståndet till emittern R ökar om flyghöjden h minskar. Avståndsfelet enligt Vaccaro [8] återfinns i ekvation 6.7.

$$\frac{\sigma_R}{R} = \frac{1}{\sin \theta} \sqrt{\left(\frac{\sigma_h}{R}\right)^2 + \sigma_\theta^2 \cos^2 \theta} \quad (6.7)$$

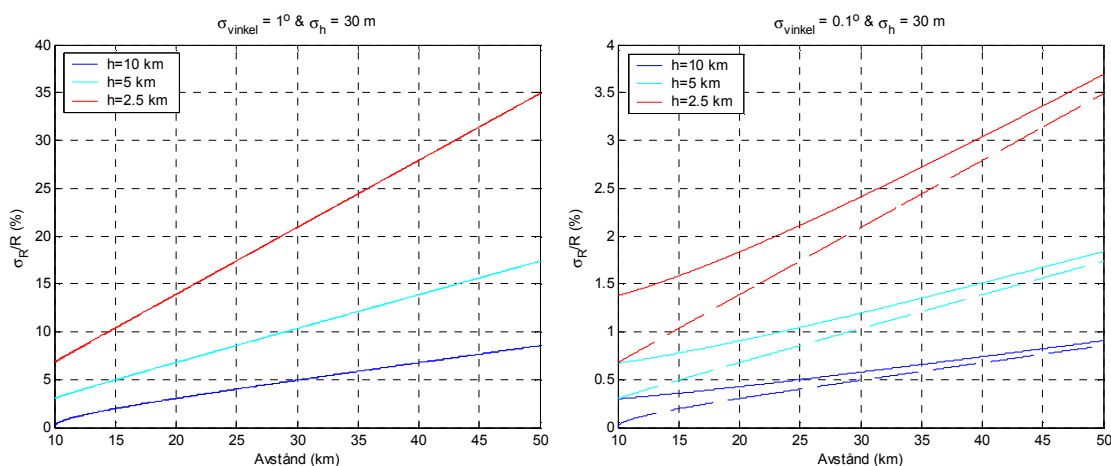
Den geometriska kopplingen mellan beteckningarna redovisas i figur 6.7. Notera att σ_R , σ_h och σ_θ är standardavvikelsen för respektive parameter.



Figur 6.7 Geometrisk koppling mellan beteckningarna som används i ekvation 6.7. R betecknar avståndet till emittern, h är flyghöjden och θ är elevationsvinkeln.

I figur 6.8 redovisas beräkningar baserade på ekvation 6.7. I den vänstra bilden är spridningen i vinkel 1° och höjdfelet 30 m. Beräkningarna är genomförda vid tre olika flyghöjder. Samma flyghöjder redovisas i den högra bilden. Dessutom är höjdfelet detsamma, medan vinkelfelet är $0,1^\circ$. I övrigt visar bilderna det relativa avståndsfelet i procent som funktion av avståndet till emittorn. Som synes ökar felet dels då flyghöjden minskar och dels då avståndet till emittorn ökar. Det är en följd av att skärningsvinkeln med marknivån i båda fallen blir spetsigare.

För att undersöka vilken betydelse höjdfelet får har även beräkningar utan höjdfel genomförts. I den högra bilden finns dessa beräkningar presenterade som streckade linjer. I den vänstra figuren där vinkelfelet är 1° dominerar dess inverkan kraftigt på totalresultatet, varför ingen förbättring i praktiken erhålls då höjdfelet eliminerats.



Figur 6.8 Resultat från beräkningar utgående från ekvation 6.7. Tre olika flyghöjder har använts. Notera att såväl låg flyghöjd som långt avstånd har negativ inverkan på resultatet. De streckade linjerna i den högra figuren anger att felfri höjd använts vid beräkningarna. Axlarnas gradering startar vid avståndet 10 km eftersom det är det lägsta möjliga avståndet för flyghöjden 10 km. Emittorn befinner sig i det fallet rakt under plattformen.

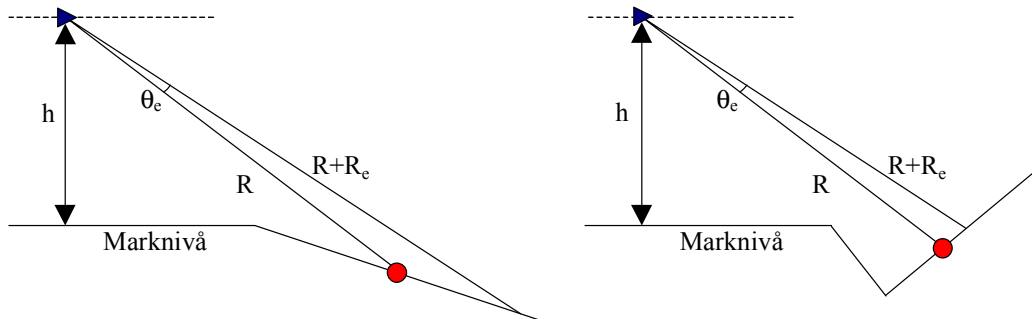
Det ovan beskrivna avståndsfelet gäller under förutsättningen att den information som erhålls ur terrängdatabasen är korrekt. Då den är behäftad med fel kan även dessa ge upphov till avståndsfel. Om ekvation 6.7 utökas med fel i emitterhöjd erhålls ekvation 6.8, där $\sigma_{h_{emitter}}$ representerar osäkerheten emitters höjd.

$$\frac{\sigma_R}{R} = \frac{1}{\sin \theta} \sqrt{\left(\frac{\sigma_h + \sigma_{h_{emitter}}}{R} \right)^2 + \sigma_\theta^2 \cos^2 \theta} \quad (6.8)$$

Notera att fel i plattformens höjd och fel i emitters höjd påverkar det resulterande avståndsfelet på precis samma sätt. Det leder till att höjdfelet, som var satt till 30 meter, i figur 6.8 kan anses representera en total höjdosäkerhet, det vill säga summan av osäkerhet i den egna mätta höjden och osäkerhet i terrängdatabasen.

Det faktum att marknivån under emittorn lutar kan ge upphov till ytterligare ett intressant fenomen. I vanlig triangulering brukar noggrannheten bero starkt av hur stor kryssvinkeln är. Om marknivån lutar kraftigt bort från plattformen kan spetsiga kryssvinklar erhållas även om plattformens höjd är stor. En sådan situation ökar därför avståndsosäkerheten. Det omvända gäller om marken lutar mot plattformen, eftersom

kryssvinkeln då ökar, vilket i sin tur kan förbättra prestanda. Fenomenet illustreras i figur 6.9. Notera att plattformens höjd och vinkelfelet är lika stort i båda fallen. I den högra figuren erhålls ett betydligt lägre avståndsfel till följd av att marklutningen är gynnsam.



Figur 6.9 Noggrannheten i avstånd påverkas av markens lutning i emitterlägets omgivning. Vinkelfelet och mät höjden är identisk i de båda situationerna. Det framgår dock tydligt att avståndsfelet blir väsentligt större om marken lutar bort från plattformen.

Hittills har endast elevationsvinkelfel studerats. Felet i azimut kommer naturligtvis även att påverka uppfattningen om emitterns läge. Noteras bör dock att den påverkan mät fel i azimut har på avståndsfelet kan försummas eftersom den är liten jämfört med det fel som osäkerhet i elevationsvinkeln ger upphov till.

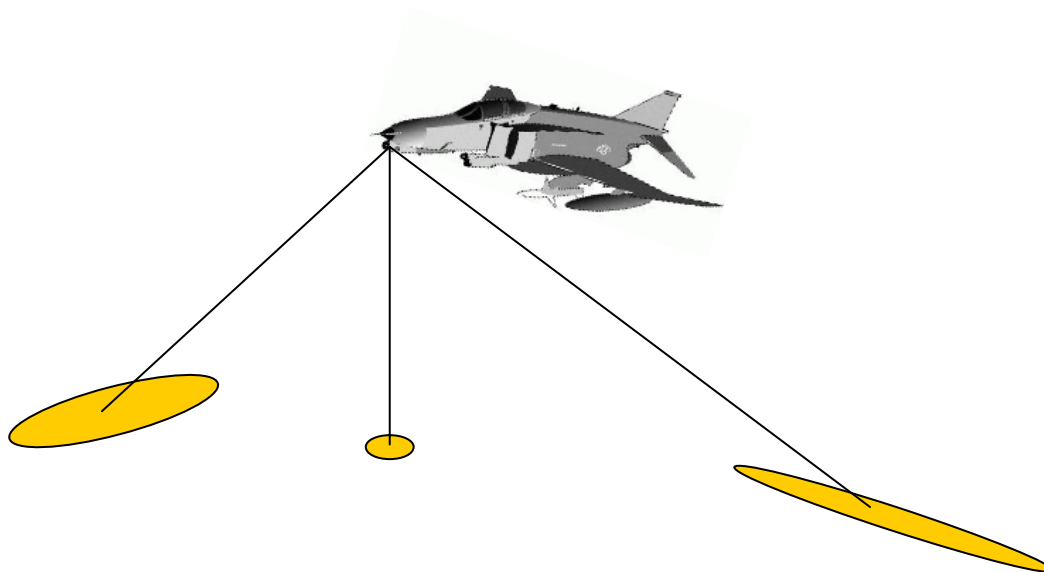
Dessutom bör noteras att ovanstående resonemang inte tagit någon hänsyn till att jordytan är krökt, vilket innebär att avståndsfelen i realiteten är något större än de avståndsfel som redovisats i figur 6.8. I och för sig kan modellen förändras så att den även inkluderar effekten av jordens krökning.

Det finns ytterligare en effekt som inte kan kompenseras bort. Eftersom jordytan kröker kommer kryssvinkeln mellan jordytan och den mätta riktningen att bli spetsigare än den skulle ha blivit om jordytan varit platt. Effekten av detta blir att noggrannheten försämras då avståndet ökas.

Vertikal triangulering är en väl beprövad princip för att lägesbestämma markbaserade emitterar. Den användes exempelvis av det legendariska flygplanet F-4G *Wild Weasel* som under lång tid utnyttjades för att bekämpa LV-system. F-4G var bland annat utrustat med fyra antennenheter à 10 stycken planspiralantennor vilket inom en stor andel av 4π -sfären bedöms ha presterat tvådimensionell riktningsmätning med i storleksordningen 1° -noggrannhet.

Den resulterande lägesnoggrannheten hos APR-47 systemet på F-4G var inte tillräcklig för att använda precisionsvapen men väl anpassad för att kunna leverera signalsökande robot i den mest effektiva moden. Signalsökande robot är för övrigt ett annat exempel på system som utnyttjar tvådimensionell riktningsmätning. I detta fall minskar naturligtvis vinkelfelens betydelse allt eftersom avståndet minskar.

Som kuriosa kan nämnas att en variant av vertikal triangulering användes redan under andra världskriget där tyskarna med det markbaserade signalspaningssystemet *Naxburg* bestämde azimutvinkeln och höjd vinkeln till brittisk flyg. Avståndet kunde beräknas genom att bombflyget alltid utnyttjade cirka 5000 m flyghöjd medan Mosquito kom på 10000 m och med en annan pulsrepetitionsfrekvens.

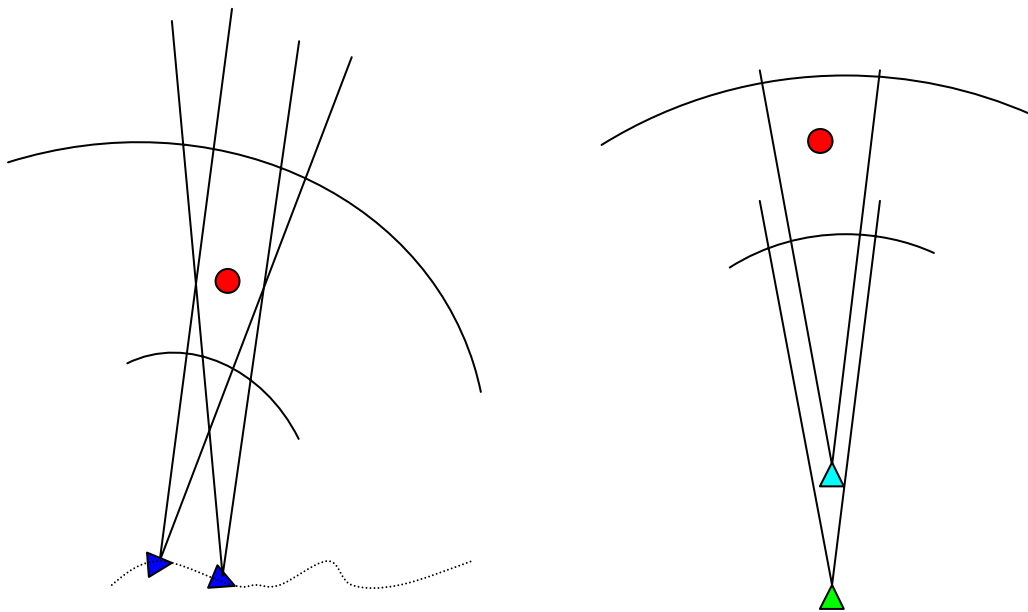


Figur 6.10 Vid så kallad vertikal triangulering mäts infallsriktningen i två ortogonala dimensioner. Denna infallsriktningen pekar ut det estimerade emitterläget genom skärningen med mark- eller havsytan. Noggrannheten beror bland annat av elevationsvinkeln.

6.3 Riktungs- och effekttäthetsmätning

Effekttätheten från en emitter avtar med kvadraten på avståndet vid frirymdsutbredning vilket radarvarnare och sis-utrustningar kan utnyttja för att lägesbestämma emittern. Oavsett om emitterns uteffekt och antennförstärkning är känd eller inte kan i princip lägesbestämningen baseras på enbart ett antal effektmätningar gjorda i olika positioner. Som framgår nedan är dock osäkerheterna förknippade med denna typ av avståndsmätning så stora att även triangulering baserad på grova riktningsmätningar i de flesta fall ger en noggrannare lägesbestämning. Undantaget är om den mätbas som exponeras mot emittern är kort eller helt saknas.

När lägesbestämningen sker med ett enskilt flygplan är detta aktuellt när mättiden är kort eller när flygriktningen i huvudsak är från eller mot emittern, se figur 6.11. I dessa fall kan den avståndsuppfattning som baseras på effektmätning av den mottagna signalen kombinerad med riktningsmätning ge en grov lägesuppfattning.



Figur 6.11 Även en grov avståndsuppfattning baserad på effektmätning minskar osäkerheten i lägesbestämningen om den exponerade mätbasen är kort eller saknas. Detta är aktuellt om mättiden är kort eller om rörelseriktningen är från eller mot emittern.

Under vilka förutsättningar lägesbestämning baserad på kombinationen riktning- och effekttäthetsmätning ger bättre resultat än ren triangulering beror naturligtvis på den aktuella geometrin, men även noggrannheten hos riktningmätningarna respektive de parameterar som påverkar möjligheten att bedöma avståndet med hjälp av den uppmätta effekttätheten inverkar. I det följande beskrivs olika aspekter av avståndsbestämning baserad på effektmätning.

De fysikaliska sambanden

Den effekt en radarsignal ger upphov till på mottagaringången av en radarvarnare eller sis-utrustning ges av ekvation 6.9.

$$P_{dBm} = ERP_{dBm} - L_{dB} + G_{dB} \quad (6.9)$$

I ekvation 6.9 är:

- P_{dBm} är effekten på mottagaringången
- ERP_{dBm} är emitterns ekvivalenta isotropa uteffekt i riktning mot varnar/sis-systemet
- L_{dB} är den aktuella utbredningsdämpningen från emittern fram till mottagarantennen
- G_{dB} är sis-systemet antennvinst i riktning mot emittern

Utbredningsdämpningen L_{dB} är i sin tur bestämd av bland annat frekvensen f_{GHz} och avståndet R_{km} . I fri rymd gäller ekvation 6.10.

$$L_{dB} = 20 \log R_{km} + 20 \log f_{GHz} + 92,5 \quad (6.10)$$

Alternativa metoder som baseras på effektmätning

Skattning av avståndet till emittorn kan ske på två alternativa sätt.

- A. Emittorns ERP är känd
- B. Den egna rörelsens inverkan på mottagen effekt analyseras

Emittorns ERP är känd

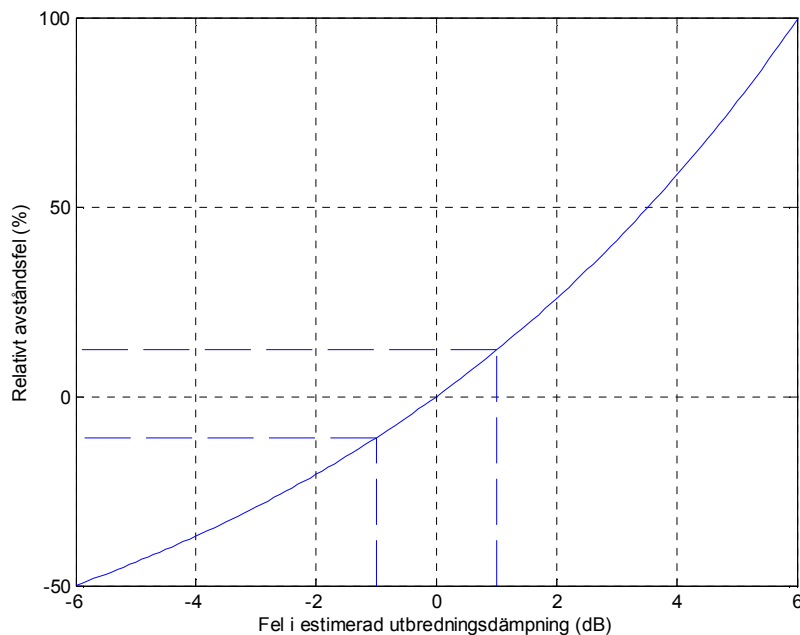
Om information om emittorns ERP finns tillgänglig i sis-utrustningens bibliotek och den mottagna signalens effekt har uppmätts kan ovanstående två samband utnyttjas för att beräkna den aktuella utbredningsdämpningen. Genom att även mäta den mottagna signalens frekvens kan därefter avståndet bestämmas. Det finns tyvärr många felkällor som bidrar till att göra avståndsmätningen osäker.

- Det ansatta värdet på emittorns ERP är – om det uppmätts med ett ELINT-flygplan – bara i sällsynta fall bättre än inom ± 2 dB enligt Wiley [9]. ERP varierar dessutom mellan individer vilket ökar felområdet ytterligare om inte individbestämning är möjlig.
- ERP-värde i emitterbiblioteket avser huvudloben. Osäkerheten om emittorns aktuella antennförstärkning i riktning mot sis-systemet ökar spridningen.
- Den av sis-systemet uppmätta effekten pålagras fel när omräkning till effekttäthet vid antennen görs. Framförallt på grund av bristande kännedom om mottagarens förstärkning och antennförstärkningen i riktning mot emittorn. I både dessa fall finns ett frekvensberoende som försvårar möjligheterna att kalibrera.
- Den verkliga utbredningsdämpningen avviker från frirymdsdämpningen på motsvarande avstånd. Orsaken kan exempelvis vara flervägsutbredning eller atmosfärsdämpning.
- Bristande överensstämmelse mellan emittorns och sis-systemets polarisation kan ge stora förluster.
- Om inte sis-mottagarens separation är tillräcklig kan andra signaler påverka mätningen av signalens effekt och frekvens.

Samtliga ovanstående felkällor påverkar möjligheten att fastställa den aktuella utbredningsdämpningen och ger därför fel när avståndet beräknas. I figur 6.12 visas hur fel i den estimerade utbredningsdämpningen inverkar på det relativa avståndsfel, det vill säga avståndsfel normerat med det korrekta avståndet. Av figuren framgår som väntat att ± 6 dB osäkerhet resulterar i att avståndet till emittorn kan bestämmas till intervallet 50-200 % av det nominella, vilket motsvarar ett avståndsfel på från -50 till

+100 %. Vid ± 1 dB fel är motsvarande intervall 89-112 %, det vill säga osäkerheten i avståndsled är cirka ± 11 %.

För ± 1 % avståndsfel erfordras att utbredningsdämpningen bestäms med ett fel som är mindre än 0,1 dB, vilket naturligtvis kan inträffa vid en enskild mätning men ligger fullständigt utom räckhåll i medeltal.



Figur 6.12 Genom att mäta effekttätheten kan utbredningsdämpningen beräknas om emitterns ERP är känd. Mäts även emitterfrekvensen kan avståndet till emittern estimeras. Det resulterande relativa avståndsfelet beror bland annat av felen i det utnyttjade ERP-värdet samt i mätningen av effekttätheten. Om skillnaden i dessa fel är inom ± 1 dB hamnar avståndsfelet inom cirka ± 11 % av det korrekta avståndet.

Den egna rörelsens inverkan på mottagen effekt analyseras

Oavsett om ERP-data finns för en emitter eller inte kan avståndsbestämning ske genom att analysera hur den egna rörelsen inverkar på den mottagna effekten. Principen kan belysas med ett enkelt exempel där det inmätande flygplanet rör sig rakt mot emittern enligt figur 6.13.

Skillnaden i mottagen effekt ΔP_{dBm} mäts vid två tidpunkter separerade med mätsträckan ΔR varefter avståndet till emittern från den andra mätpunkten kan beräknas med sambandet

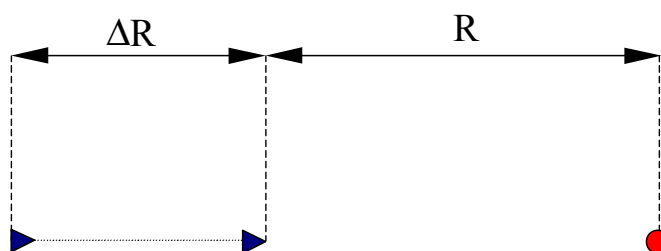
$$R = \frac{\Delta R}{10^{\frac{\Delta P_{dBm}}{20}} - 1} \quad (6.11)$$

Av sambandet framgår exempelvis att en effektökning av 1 dB på en mätsträcka av 1 km ger ett beräknat emitteravstånd av cirka 8,2 km.

Ovanstående samband kan ges en något större giltighet om vinkeln mellan mätsträckan och riktningen till emittern införs. Eftersom denna vinkel är olika i de två mätpunkterna används här ett medelvärde av de två vinklarna, α .

$$R \approx \frac{\Delta R}{(10^{\frac{\Delta P_{dBm}}{20}} - 1) \cdot \cos \alpha} \quad (6.12)$$

Överensstämmelsen är bäst när bäringsdragningen till emittern är liten under mätsträckan vilket innebär att α är liten och/eller mätsträckan är kort i förhållande till emitteravståndet. Det är också i dessa fall som triangulering baserad på grov riktningsmätning behöver stöd med avståndsinmätning.



Figur 6.13 Genom att analysera hur den mottagna effekten förändras under en mätsträcka kan avståndet till emittern estimeras utan kännedom om aktuell ERP. Användbarheten finns framförallt när emittern ligger i flygriktningen, det vill säga i mätsträckans förlängning. Då är en liten mätbas exponerad mot emittern, vilket medför att ren triangulering ger dålig avståndsnoggrannhet.

Noggrannhetsjämförelse

Jämfört med avståndsmätning baserad på kännedom om emitterns ERP försvinner med den här metoden ett antal felkällor, däribland osäkerheten i ERP-data. Även kraven på sis-systemet minskar till följd av att effekttäthetsmätningen inte behöver ha absolut noggrannhet eftersom endast relativa förändringar studeras. I gengäld tillkommer ett antal nya felkällor på grund av att mätmetoden inte är momentan. Exempel på detta är osäkerhet vad gäller att samma antennförstärkningar är aktuella vid de olika mätningarna.

En stor skillnad mellan de två metoderna är att fel av en viss storlek inverkar olika mycket. Sen tidigare kunde konstateras att ett 1 dB-fel med den ERP-baserade metoden ger ett avståndsfel som är cirka 11 % av det korrekta avståndet. Med metoden som mäter effektskillnader inverkar motsvarande 1 dB-fel olika beroende på hur lång mätsträckan är i förhållande till avståndet till emittern. Detta är ganska uppenbart med tanke på att denna kvot bestämmer den nominella effektskillnaden i de två mätpunkterna.

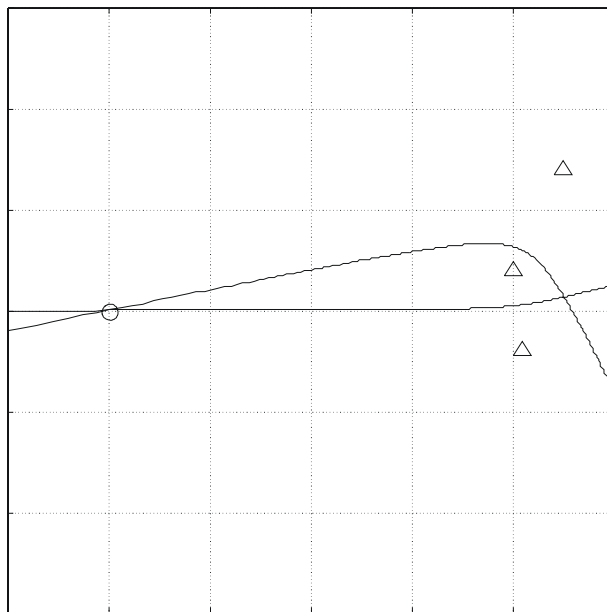
En sammanfattande bedömning av möjligheterna att utnyttja effektmätningar som stöd vid lägesbestämning av en emitter är att potentialen är mycket begränsad. Endast när ingen eller mycket liten mätbas exponeras i riktningen mot emittorn bedöms effektmätningar vara användbara för att minska osäkerheten i lägesbestämningen.

6.4 TDOA – mätning av skillnad i ankomsttid

En sis-utrustning kan, till skillnad mot en radar, inte mäta avståndet till en emitter med hjälp av gångtiden eftersom tiden när signalen lämnade emittorn är okänd. Med tillgång till två eller flera mottagare kan dock skillnaden i gångtid bestämmas – i vart fall om vågformen är lämplig. Skillnaden i gångtid är lika med skillnaden i ankomsttid (TOA – *Time Of Arrival*) och metoden benämns normalt TDOA – *Time Difference Of Arrival*. Även benämningen *Range Difference Location* har förekommit.

Den uppmätta tidsskillnaden mellan två inmätare motsvarar en skillnad i gångväg som – i det tvådimensionella fallet – definierar en så kallad hyperbelgren. Hyperbelgrenen binder samman alla tänkbara emitterpositioner som resulterar i den aktuella tidsskillnaden. För att bestämma ett emitterläge momentant måste minst tre inmätare användas, varvid det estimerade emitterläget återfinns i skärningen mellan hyperbelgrenar, se figur 6.14.

Principen kan beskrivas som ett hyperbelnavigeringssystem typ LORAN och OMEGA. I dessa fall är dock en mottagarposition sökt medan ett antal (minst tre) sändarpositioner är kända.



Figur 6.14 Principbild som visar lägesbestämning baserad på TDOA utförd med tre sis-system eller radarvarnare. De uppmätta skillnaderna mellan signalens ankomsttider till de tre inmätarna ger upphov till hyperbelgrenar som idealt skär varandra i det korrekta emitterläget. I figuren syns även en andra skärningspunkt vilket innebär att det i det här fallet finns två möjliga emitterlägen att välja på.

TDOA är definitivt en metod som har potential att lägesbestämma emitternar med god noggrannhet. De teoretiska egenskaperna är väl undersökta och dokumenterade – se exempelvis Bergdal m.fl. [5]. Det finns även såväl flyg- som markbaserade operativa sis-system som utnyttjar TDOA. Ett exempel på det senare är det tjeckiska ELINT-systemet VERA-E.

Eftersom TDOA som lägesbestämningsprincip kräver flera separerade sis-mottagare är den i flygsammanhang endast aktuell när flera flygplan med radarvarnare eller sis-system intimt samverkar. TDOA som metod förutsätter att minst två – och vanligtvis tre – inmätande flygplan blir momentant belysta av emittorn. Med emittor som utnyttjar en smal lob ställer detta krav på god systemkänslighet hos de deltagande radarvarnar- eller radarsis-systemen. Eftersom flygplanen oftast inte blir belysta samtidigt av emitterns huvudlob måste inmätning kunna ske i emitterns sidolober.

I projekt VMS Flyg har inriktningen inom radarsis-verksamheten varit att studera möjligheten att förbättra lägesbestämningsförmågan hos ett enskilt flygplan varför TDOA inte har bearbetats. TDOA-avsnitten i den här rapporten är av detta skäl begränsade till sin omfattning. I de nuvarande planerna för projekt VMS NBF ingår dock att från 2003 studera olika aspekter på att utnyttja TDOA från flera samverkande flygplan.

Noggrannhet vid lägesbestämning med TDOA

Ett antal parametrar inverkar på den resulterande lägesnoggrannheten vid flygbaserad TDOA.

- Den aktuella geometrin, det vill säga flygplanens inbördes positioner samt emitterns läge i förhållande till dessa.
- Kvaliteten vad avser tidsskillnadsmätningen. Denna påverkas bland annat av:
 - sis-systemens förmåga att vara tidssynkrona
 - signalens vågform och signal/brus-förhållandet i respektive inmätningseenhet
 - egenskaperna hos förbindelselänkarna mellan enheterna. Dessa inverkar även på möjligheterna att producera resultat i nära realtid.
 - vågutbredningen
- Kvaliteten avseende positionsbestämningen av de inmätande flygplanen, vilken påverkas av egenskaperna hos navigeringssystemen i kombination med flygplanens rörelse.

Traditionellt har de sökta tidsdifferenserna mätts upp med utgångspunkt från den aktuella signalens pulsflanker. Detta innebär att vågformer som utnyttjar pulser med korta stig- och falltider ger potential till bättre tidsskillnadsmätning.

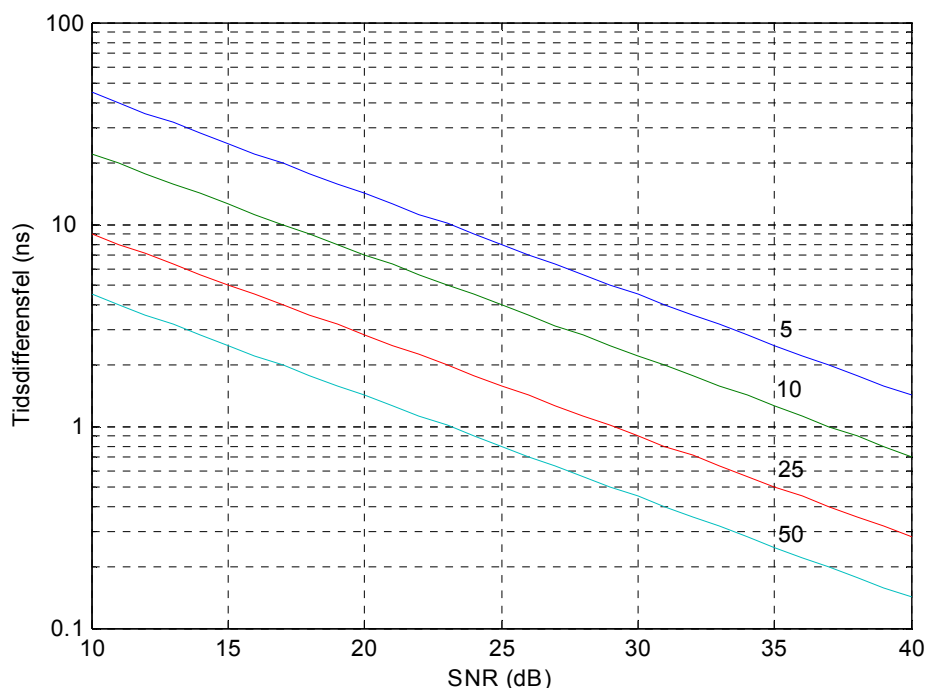
För att utnyttja potentialen måste naturligtvis den bandbredd som signalen utnyttjar bevaras i sis-systemets mottagare. I ett TDOA-mätande system som utnyttjar pulsflanker för att bestämma skillnaden i ankomsttid kan – enligt Bergdal m.fl. [5] – den inverkan videobandbredd B_v och signal/brus-förhållandet SNR har på standardavvikelsen beskrivas med nedanstående samband. Detta illustreras i figur 6.15.

$$\sigma_{TDOA} = \frac{1}{B_v \sqrt{2} \cdot SNR} \quad (6.13)$$

Den grundläggande osäkerhet som finns i tidsskillnaden enligt sambandet beror på brus och kan på vanligt sätt minskas genom att medelvärdesbilda ett antal mätningar. Det är dock viktigt att påpeka att ett antal av de fel som bidrar till den totala osäkerheten vid

tidsskillnadsmätningarna har en offsetkomponent som inte försvinner vid medelvärdesbildning. Ett speciellt område att studera är hur bra tidssynkronism som kan realiseras mellan de separerade sis-systemen. Det tidigare nämnda systemkonceptet AT3 från USA strävar här mot 5 ns.

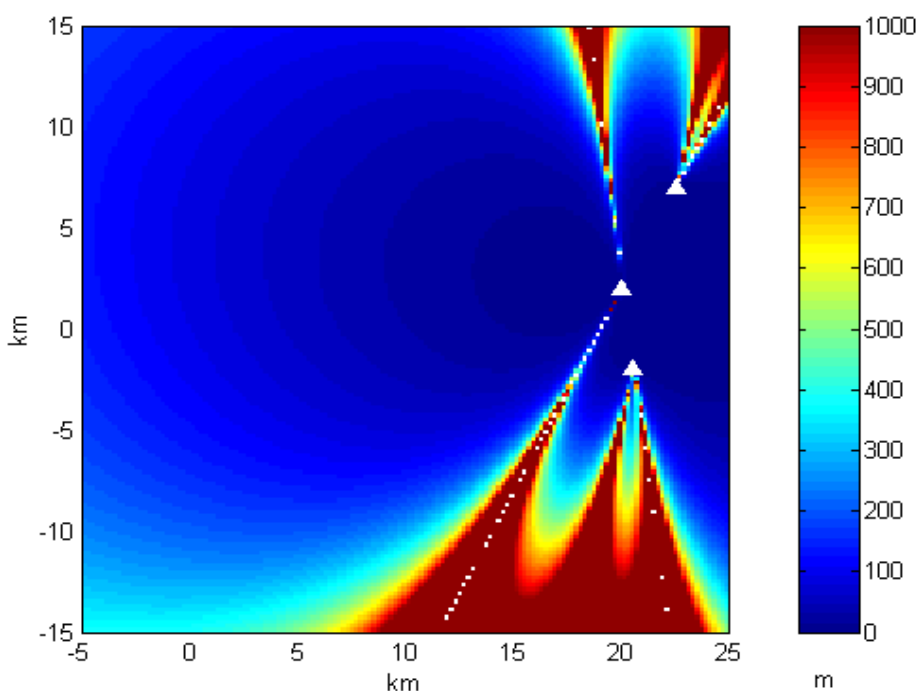
Ett modernare sätt att mäta tidsdifferenser är att korskorrelera digitaliserade signaler från de inmätande sis-systemen. Med hjälp av korskorrelationen kan även signalens relativa fasläge användas till att ge en bättre tidsupplösning än det tidsintervall som ges av sampeltakten. En fördel med denna metod är också att radarsignalens eventuella modulationer – utöver ren pulsmodulation – förbättrar möjligheterna för sis-systemen. En nackdel är dock att det ställer högre krav på den länk som används för kommunikation mellan plattformarna, eftersom datamängden ökar.



Figur 6.15 Diagrammet visar det brusberoende tidsdifferensfellets standardavvikelse som funktion av videosignalens signal/brus-förhållande, enligt ekvation 6.13. De fyra linjerna motsvarar olika videobandbredder, där den översta linjen har videobandbredden 5 MHz och den undre 50 MHz. I ett verkligt system kommer andra felkällor att i många fall vara begränsande.

För att ge en bild av vilka prestanda som teoretiskt kan erhållas när tre flygplan lägesbestämmer emitterar med TDOA-metoden är Cramér-Rao-gränsen ett användbart verktyg. En Cramér-Rao-analys som bygger på samma scenario som övriga figurer i detta avsnitt ger ett resultat som i figur 6.16. I figuren syns det tydligt att noggrannheten är dålig i de tre mätbasernas förlängningar.

Samma diagram används även i kapitel 7 som beskriver kombinationsmetoder för lägesbestämning. Vid en eventuell jämförelse av respektive noggrannhet bör beaktas att den här presenterade TDOA-baserade lägesbestämningen är momentan medan de andra genomförs av ett flygplan som flyger upp en mätbas. De senare utnyttjar därför ett stort antal inmätningar – cirka 400 stycken.



Figur 6.16 Efter en momentan ankomsttidsmätning gjord från tre flygplan kommer TDOA som lägesbestämningsmetod att under givna förutsättningar ge den lägesfelsbild som presenteras i figuren. I närheten av mätbasernas förlängning är felet som synes stort, vilket är väntat – se exempelvis Bergdal m.fl. [5]. Felet som presenteras är längden av den största halvaxeln i de felellipser som genereras genom Cramér-Rao-analys. Standardavvikelsen i de mätta ankomsttiderna är 5 ns. Vid en jämförelse med motsvarande figurer för exempelvis DDOA bör noteras att färgskalan för felstorleken skiljer sig och framför allt att DDOA lägesbestämningen bygger på cirka 400 frekvensmätningar under 20 sekunder, medan denna TDOA-figur bygger på ankomsttidsmätningar som är gjorda vid ett tillfälle.

Mångtydighet vid lägesbestämning med TDOA

Liksom hos många andra principer för lägesbestämning besväras TDOA under vissa förhållanden av att ett entydigt emitterläge inte kan fastställas. Det finns två orsaker till att lägesbestämningen vid TDOA kan vara mångtydig.

- Minst en av tidsskillnadsmätningarna är mångtydig
- Den aktuella geometrin ger flera skärningspunkter

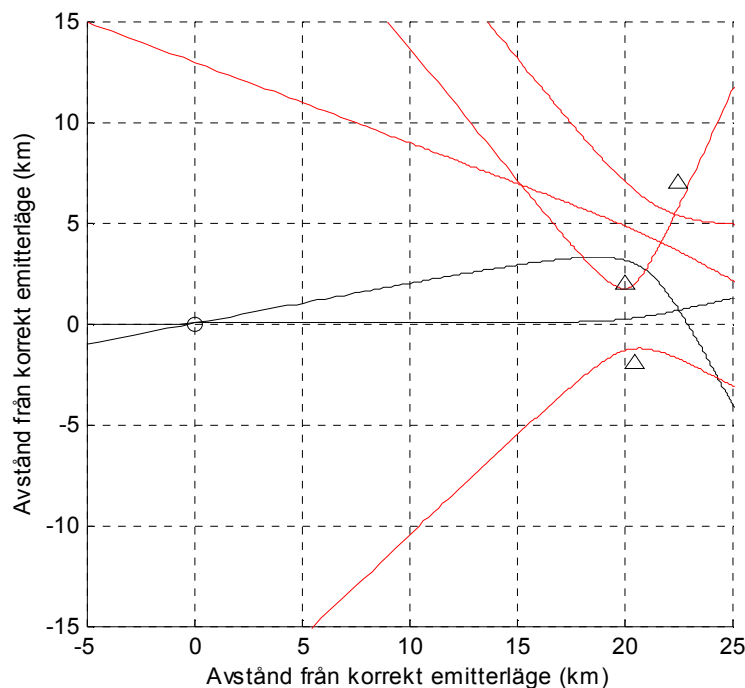
Tidsskillnaden kan bli mångtydig om emitterns vågform är sådan att den upprepar sig. Med en pulsad radarsignal kan mångtydighet inträffa om exempelvis ett fast pulsrepetitionsintervall PRI är så kort att tidsskillnaden av misstag kan mätas mellan mottagna pulser som inte har sitt ursprung i en och samma utsända puls.

Med stabilt PRI är villkoret för att mätningen av tidsskillnad inte ska kunna bli mångtydig att signalens gångtid mellan inmätarna inte överstiger halva tiden mellan två pulser. Med 100 kHz PRF³ resulterar detta i ett maximalt avstånd av 1,5 km.

³ Pulsrepetitionsfrekvens

Detta innebär samtidigt att radarn själv momentant har motsvarande mångtydigheter i avståndsled, vilket är normalt med hög PRF. För att skapa en entydig avståndsmätning är det därför vanligt att radarn i detta fall växlar PRF ofta. När så är fallet har även TDOA-lägesbestämningen förutsättningar att lösa upp mångtydigheten i tidsskillnadsmätningen, enligt figur 6.17.

TDOA är en olämplig metod mot radarer som använder helt omodulerad vågform – CW⁴. I princip är detta – liksom att radarn själv inte kan mäta avstånd med denna vågform – en konsekvens av att vågformens autokorrelationsfunktion är periodisk på samma sätt som vågformen själv.



Figur 6.17 I de fall där pulsrepetitionsfrekvensen är så hög att det blir svårt att identifiera rätt tidsdifferenser existerar hyperbelgrenar som pekar ut felaktiga lägen. I figuren är pulsrepetitionsfrekvensen 100 kHz vilket ger pulsavståndet 3 km. Detta avstånd är för kort i förhållande till avståndet mellan de inmätande flygplanen vilket ger flera möjliga hyperbelgrenar tvärs respektive mätbas. Svarta hyperbelgrenar svarar mot sanna tidsdifferenser, röda svarar mot falska. Rund svart ring indikerar sant emitterläge vid den ena av de svarta hyperbelgrenarnas två skärningspunkter.

Lägen bestämda med TDOA-metoden kan även bli mångtydiga på grund av att inmätningens enheters inbördes geometri är olämplig. Placeras exempelvis tre inmätningens enheter på en linje kan ingen så kallad sidobestämning ske, vilket innebär att ett falskt emitterläge återfinns symmetriskt placerat på den felaktiga sidan om den linje som förbinder inmätande enheter. Detta falska emitterläge förskjuts när en vinkel mellan de två mätbaserna införs som i figur 6.17.

Med tre inmätningens enheter är den inbördes geometrins samt emitterläget i förhållande till inmätningens positionerna styrande för om en enstaka mätning blir entydig eller om ett falskt emitterläge existerar. Den mångtydighet som förorsakas av de geometriska

⁴ Continuous Wave

förhållandena bedöms vara relativt hanterlig genom att det falska emitterläget i många fall är väl avståndsseparerat från det korrekta läget.

Med fyra samverkande inmätningenheter i en lämplig geometrisk gruppering kan mångtydigheter undvikas. Detta alternativ medför även att områden med dålig noggrannhet kan undvikas eftersom två mätbaser som inte har emittern i sin förlängning då kan väljas.

TDOA för riktningsmätning

Den hyperbelgren som genereras vid TDOA har egenskapen att den asymptotiskt närmar sig en rät linje dragen genom emittern från mätbasens mittpunkt när avståndet från emittern till mätbasen ökas. När avståndet till emittern är mycket större än mätbasen kan därför TDOA betraktas som en metod för att bestämma en signals ankomstriktning. Detta är exempelvis fallet när TDOA används mellan två antenner på ett flygplan.

TDOA för riktningsmätning skiljer sig egentligen inte från interferometri på annat sätt än att tidsskillnaden där bestäms genom att mäta fasskillnad. En fördel med TDOA är att riktningsmätningen blir entydig till skillnad mot interferometri som ger mångtydigheter om mätbasen är längre än en halv våglängd.

Riktningsmätning baserad på TDOA mellan signaler mottagna av separerade antenner på ett flygplan ingår i systemkonceptet PLAID – *Precision Location And IDentification* – som numera benämns ALR-69 Update. Andra komponenter som utnyttjas av detta systems lägesbestämning är DDOA och långbasinterferometri.

6.5 DDOA – mätning av dopplerskillnad

En modern lägesbestämningsprincip med potential att ge attraktiva prestanda är DDOA – *Doppler Difference Of Arrival*. Metoden kan användas av ett enskilt flygplan som gör frekvensmätningar längs sin flygbana eller av flera flygplan som samverkar – den senare varianten benämns ibland FDOA - *Frequency Difference Of Arrival*.

En förutsättning för att DDOA ska kunna användas är att emittern sänder med en stabil bärvågsfrekvens eller att den vid exempelvis frekvenshopp återkommer till samma frekvens ett antal gånger så att frekvensförändringar som enbart beror av sis-antennens rörelse kan analyseras. Enligt Becker [10] kan även emitterar med en konstant drift i bärvågsfrekvensen hanteras. Detta har inte studerats inom VMS Flyg.

DDOA lämpar sig bäst för att lägesbestämma radarstationer som mäter målens hastighet med hjälp av dopplerprincipen – så kallad dopplerradar. DDOA kan dock även användas mot äldre typer av radar och utnyttjar då dopplerförskjutningen hos en stabil puls-repetitionsfrekvens.

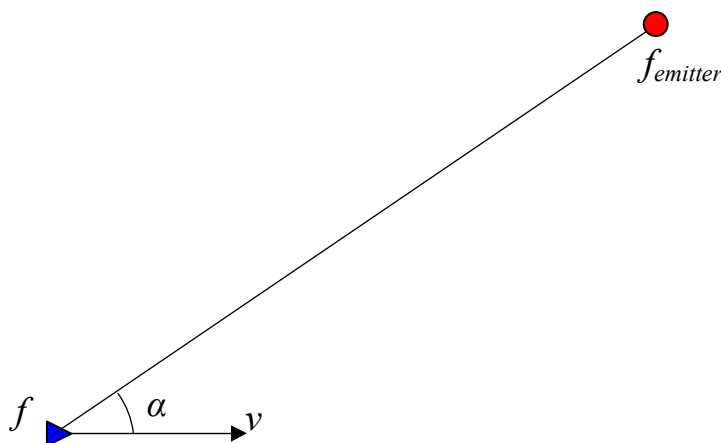
Generellt gäller att rörelse hos emittern är en komplikation. En eventuell rörelse minskar även värdet av precisionsinmätta lägen eftersom vapeninsats oftast sker med fördröjning. I kombination med andra lägesbestämningsmetoder kan DDOA eventuellt bidra till att såväl hastighet som läge för en rörlig emitter kan följas. Inom projekt VMS Flyg har inriktningen dock varit mot markbaserade emitterar som är mobila men som antas orörliga när de sänder.

Den fysikaliska effekt som utnyttjas vid DDOA är att den frekvens som kan mätas av radarvarnarens eller sis-systemets mottagare är summan av emitterfrekvensen och den för tillfället aktuella dopplerfrekvensen enligt ekvation 6.14.

$$f = f_{emitter} + f_{doppler} \quad (6.14)$$

Dopplerfrekvensen beror i sin tur på emitterfrekvensen och mottagarantennens radiella hastighet mot emittern. I ekvation 6.15 och figur 6.18 är v beloppet på mottagarantennens hastighet, c ljushastigheten och α vinkeln mellan hastighetsvektorn och riktningen till emittern.

$$f = f_{emitter} + f_{emitter} \cdot \frac{v}{c} \cdot \cos \alpha \quad (6.15)$$



Figur 6.18 Den frekvens som sis-systemet eller radarvarnaren mäter ges av emitterfrekvensen och mottagarantennens radiella hastighet mot emittern. Maximal positiv respektive negativ dopplerfrekvens fås när rörelsen är rakt mot respektive bort från emittern. När emittern finns tvärs rörelseriktningen är dopplerfrekvensen noll.

Som framgår av ovanstående samband kan varje frekvensmätning omvandlas till en infallsriktning om den egna hastigheten och emitterfrekvensen är känd. I detta osannolika fall är det således inte aktuellt att vid lägesbestämningen gå omvägen via frekvensskillnader. Istället handlar det om triangulering baserad på riktningsmätningar med hög noggrannhet.

I ett typfall där den maximala dopplerfrekvensen är 10 kHz – vilket exempelvis fås vid 10 GHz emitterfrekvens och 300 m/s flyghastighet – och osäkerheten i frekvensmätningen är 10 Hz blir den relativa osäkerheten i mätningen av dopplerfrekvensen 1 promille. Detta motsvarar att den resulterande vinkelosäkerheten tvärs hastighetsvektorn är 1 mrad det vill säga cirka 0,06°. Potential till mycket bra lägesnoggrannhet finns uppenbarligen vilket illustreras av figur 6.20.

Tyvärr är normalfallet för ett sis-system eller en radarvarnare att emitterfrekvensen är okänd, eller i vart fall inte känd med den noggrannhet som önskas vid DDOA. Om emitterfrekvensen är stabil är lösningen att analysera hur frekvensen för den mottagna signalen förändras längs den egna flygbanan.

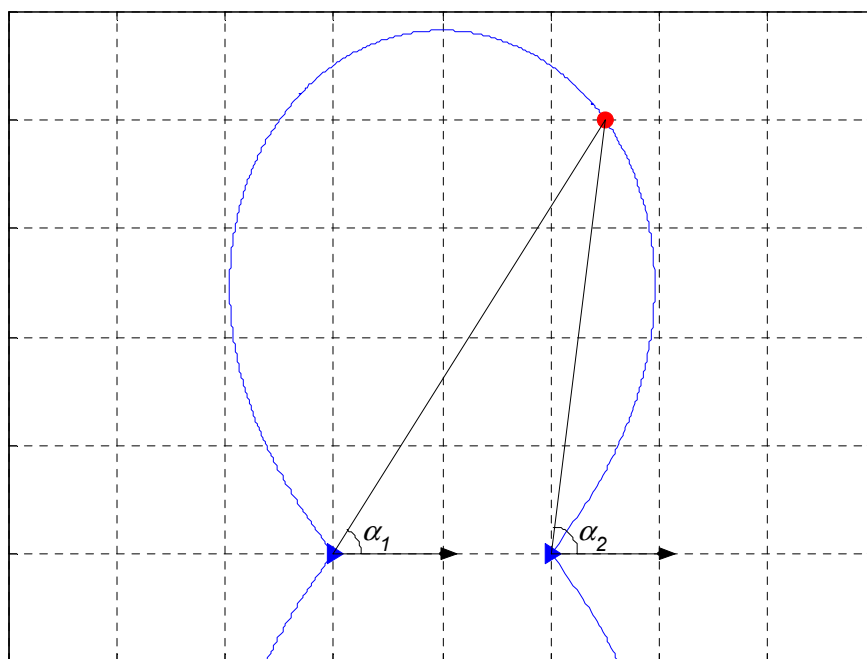
En praktisk DDOA-lägesbestämning söker det emitterläge som bäst överensstämmer med de frekvensmätningar som görs längs flygbanan. Vid en sådan optimering – som exempelvis beskrivs i Andersson m.fl. [1] – erhålls den mest sannolika kombinationen av emitterläge och emitterfrekvens.

För att illustrera hur den – vid okänd emitterfrekvens – nödvändiga vägen via frekvensskillnader försämrar egenskaperna på grund av att även emitterfrekvensen måste estimeras kan ett enkelt exempel med endast två frekvensmätningar studeras.

I exemplet antas det inmätande flygplanet gå på rak kurs med konstant hastighet. Som tidigare är även emitterfrekvensen konstant. Frekvensskillnaden mellan de två inmätningarna överensstämmer därför med den aktuella dopplerskillnaden. Den kan lätt härledas ur ekvation 6.15.

$$\Delta f = f_{emitter} \cdot \frac{v}{c} \cdot (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) \quad (6.16)$$

Som framgår av figur 6.19 är α_1 respektive α_2 vinklarna mellan hastighetsvektorn och riktningen till emittern i inmätningsspunkt 1 respektive 2.



Figur 6.19 Principbild som visar exempel på en så kallad isodopplerskillnadslinje vid DDOA. Linjen sammanbinder alla emitterlägen som kan resultera i den uppmätta frekvensskillnaden. Som synes ligger det verkliga emitterläget på bågen. Notera också att bågen är speglad i den raka flygbana som används.

I figuren finns ett tänkt korrekt emitterläge markerat. Den blå bågen – som kan benämnas isodopplerskillnadslinje – binder samman alla tänkbara emitterlägen som ger exakt samma frekvensskillnad som det korrekta emitterläget. Med endast två frekvensmätningar – en skillnad – kan uppenbarligen inget emitterläge bestämmas om enbart

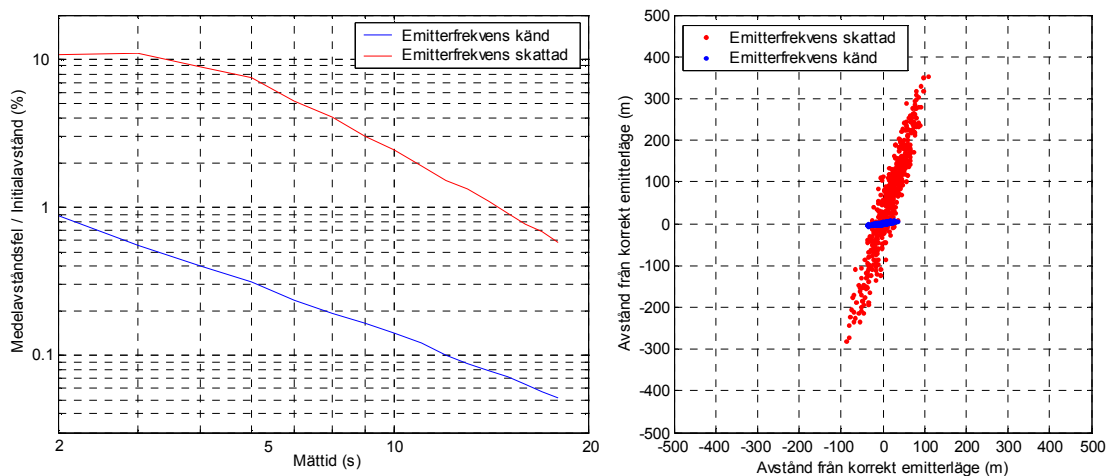
DDOA utnyttjas. Formen på bågen bestäms i det aktuella fallet av inmättningspositionernas inbördes avstånd och av att uttrycket inom parenteserna i ekvation 6.16 ska vara konstant. Till varje vinkel α_1 hör därför en vinkel α_2 som ger denna konstanta skillnad.

Utöver att isodopplerskillnadslinjen representerar emitterlägen som ger samma frekvensskillnad kan den även sägas motsvara en frekvensaxel för den estimerade emitterfrekvensen. Orsaken är att olika emitterlägen längs linjen motsvarar olika emitterfrekvenser för att både den uppmätta frekvensskillnaden och de uppmätta frekvenserna ska stämma. (Detta synsätt belyser återigen att känd emitterfrekvens medför att DDOA ”omvandlas” till triangulering.)

Formen på isodopplerskillnadslinjen vid DDOA blir mer komplex när hastighetsvektorerna i de två mätpunkterna är olika till riktning eller belopp vilket beskrivs i Andersson m.fl. [1]. I många fall är dock formen sådan att lägesfelet minskar när DDOA kombineras med andra metoder, vilket beskrivs längre fram i rapporten.

DDOA-principen kan dock utan stöd av andra metoder generera lägesbestämningar när fler än två frekvensmätningar görs. Som framgår av exemplet i figur 6.20 når prestanda inte den noggrannhet som är möjlig när emitterfrekvensen är känd.

Priset av att gå från estimering av ett tvådimensionellt emitterläge till att estimerar tre parametrar är således försämrade noggrannhet. Framförallt ökar spridningen i tvärsled (längs isodopplerskillnadslinjerna) som vi tidigare har konstaterat motsvarar en frekvensaxel för den estimerade emitterfrekvensen.



Figur 6.20 DDOA är en lägesbestämningsprincip med stor potential vad gäller noggrannhet, framförallt i avståndsled vilket normalt är radarvarnarens svaga sida. Som framgår av diagrammen genererar samma frekvensmätningar en betydligt högre noggrannhet om emitterfrekvensen är känd, vilket måste bedömas som mindre troligt i realistiska fall. I den högra figuren visas skattningar av emitterläget baserade på 18 sekunders mättid för typfallet Rakbana som beskrivs i bilaga A.

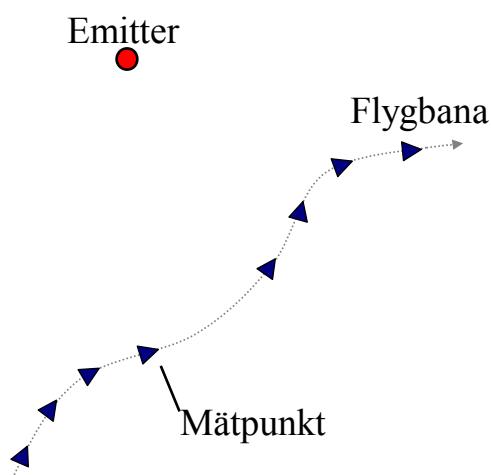
Parametrar som inverkar på lägesnoggrannheten vid DDOA

Vid lägesbestämning av en markbaserad emitter med hjälp av en flygande sis-sensor som utnyttjar DDOA kan ett antal parametrar som inverkar på den resulterande lägesnoggrannheten identifieras. Dessa kan delas in i tre grupper. Den första innehåller parametrar avseende det faktiska geometriska förhållandet mellan sis-antenn och emitter. Därefter kommer en grupp som innehåller parametrar avseende kvaliteten hos de

förekommande mätvariablerna och slutligen en grupp som innehåller själva lägesbestämningsmetoden. Sammanställs de identifierade parametrarna erhålls följande lista.

- *Den dynamiska geometrin* som är bestämd av:
 - sis-antennens rörelse och emitterns position relativt denna
 - antalet inmätningpunkter i vilka frekvensmätning sker, samt hur dessa är fördelade längs antennens rörelsebana
- *Kvalitet* vad avser:
 - noggrannhet vid frekvensmätning
 - kännedom om antennens position och hastighet
- *Lägesbestämningsmetoden*

Betydelsen av respektive parameter beskrivs ingående i Andersson m.fl. [1]. Här ges därför endast en kort sammanfattning.

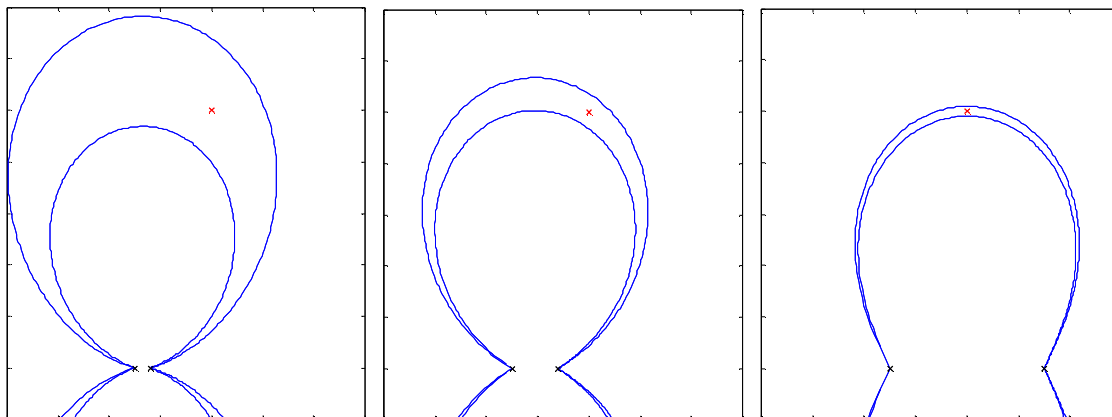


Figur 6.21 Vid lägesbestämning med DDOA påverkas noggrannheten av antalet inmätningpunkter och hur dessa är fördelade längs flygbanan, sis-antennens hastighet i dessa punkter, samt emitterns läge i förhållande till inmätningpunkterna. Det är även viktigt att känna sis-antennens position och hastighet i inmätningpunkterna vilket ställer krav på navigeringssystemet.

Sis-antennens rörelse och emitterns position relativt denna

Vid lägesbestämning baserad på DDOA är, liksom vid triangulering, den mätbas som flygbanan exponerar mot emittern av stor betydelse. Högre hastighet genererar på kortare tid en användbar geometrisk mätbas och är därför önskvärd. Vid DDOA förstärks värdet av en hög hastighet eftersom dopplervariationen också ökar. Av samma orsak är dessutom förändringar av hastighetsvektorn generellt gynnsamma för att minska lägesbestämningsfelet. Generellt gäller att bästa noggrannhet finns tvärs rörelseriktningen.

Sammantaget är betydelsen av flygbanan – eller egentligen mottagarantennens rörelse relativt emitterns position – vid lägesbestämning där DDOA ingår avsevärt svårare att genomskåda än vid triangulering.



Figur 6.22 Principbild som visar betydelsen av geometrisk mätbas vid DDOA. Med den antagna frekvensosäkerheten ger frekvensskillnadsmätningen mellan två punkter isodopplerband som inkluderar det korrekta emitterläget. Av sekvensen framgår att ökande flygsträcka reducerar dopplerbågens bredd.

Frekvensmätningarnas antal och fördelning längs flygbanan

Som framgått av ovanstående resonemang kan flygbanan ha stor inverkan på noggrannheten vid estimering av en emitters läge med hjälp av DDOA. Det är dock viktigt att konstatera att det bara är mottagarantennens position och hastighet på de ställen i flygbanan (egentligen antennens rörelsebana) där inmätningar av den mottagna signalen sker som är av betydelse för slutresultatet.

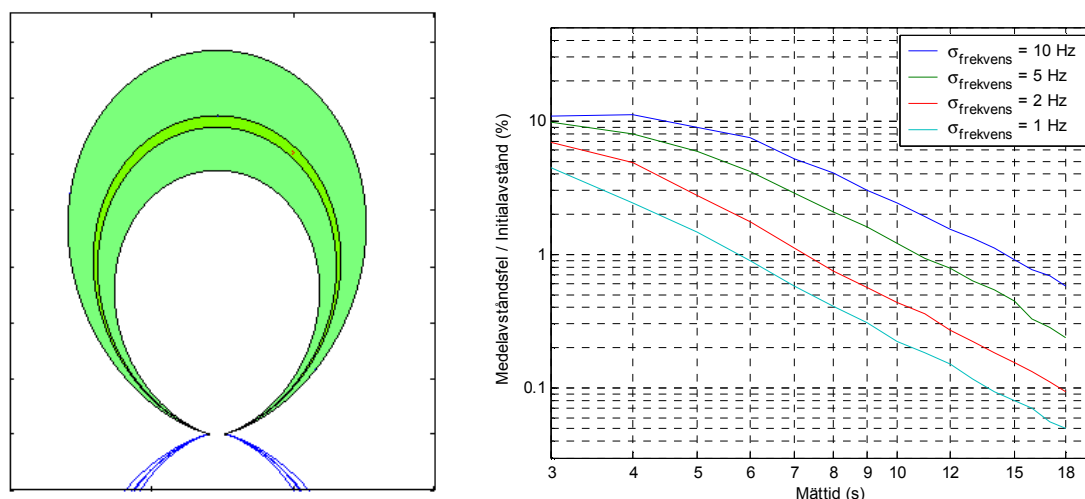
Generellt finns förutsättningar för ett bättre lägesestimat om antalet frekvensmätningar längs en given flygbana ökas. I ett verkligt scenario är dock inmätningstakten inte bara bestämd av sis-systemet utan även av exempelvis emitterns antennavsökning och vågutbredningen.

Noggrannhet vid frekvensmätning

Eftersom sis-systemets egenskaper avseende frekvensmätning är så centrala för all lägesbestämning där DDOA ingår, har relativt omfattande insatser genomförts inom VMS Flyg med syfte att öka kunskapen om vilka parametrar som inverkar på frekvensmät-noggrannheten och på vilket sätt detta sker. Detta arbete beskrivs utförligt i Andersson m.fl. [1].

Figur 6.23 visar principiellt hur bristande frekvensnoggrannhet vidgar de tidigare presenterade isodopplerskillnadslinjerna till band vilket naturligtvis försämrar lägesnoggrannheten. För att ge önskad lägesnoggrannhet bör frekvensnoggrannheten vara i storleksordningen 10 Hz om emitterfrekvensen är 10 GHz. Den relativa frekvensnoggrannheten är i detta fall 10^{-9} , vilket endast är möjligt att nå om radarsignalen har lämplig vågform och självklart måste radarsis-systemet utnyttja digital mottagning och frekvensmätning.

Kraven på sis-systemets frekvensmätning lindras något av att ganska stora frekvensoffsetfel kan accepteras på grund av dessa i huvudsak leder till felskattning av emitterfrekvensen. Skattningen av emitterläget påverkas endast marginellt.



Figur 6.23 Principbilden till vänster visar betydelsen av att mäta frekvens med stor noggrannhet. De färgade banden anger med vilken relativ noggrannhet frekvensen mäts. För det inre bandet gäller den relativa frekvensnoggrannheten 10^{-9} och för det yttre 10^{-8} , vilket innebär att om emitterfrekvensen har varit 10 GHz har frekvensen mätts med 100 respektive 10 Hz noggrannhet. I diagrammet till höger ges ett exempel på hur lägesnoggrannheten förbättras med tiden under simulering av typfallet Rakkbana. Frekvensnoggrannheten har som synes stor inverkan på prestanda. Diagrammet är baserat på Monte-Carlo-simuleringar.

Kännedom om antennens position och hastighet

Flygbanans inverkan liksom var inmätningar av frekvens sker längs denna har berörts ovan. Det är dock inte bara betydelsefullt vilken hastighet och position sis-antennen har vid inmätningarna utan även att lägesbestämningsfunktionen ges korrekt information om dessa parametrar. Här handlar det således om förmågor som associeras med flygplanets navigeringssystem, men även flygplanets strukturstabilitet inverkar eftersom navigeringssystemets mätvärden ska omräknas för att motsvara vad som gäller för inmätande antenner. Denna problematik berörs ytterligare i avsnitt 8.5.

Även navigeringssystemets uppdateringsfrekvens måste beaktas. Om det är glest mellan mätningarna kan den interpolering som är nödvändig för att erhålla navigeringsdata för tidpunkter som motsvarar sis-inmätningarna införa ytterligare fel, speciellt om flygplanet manövrerar.

Det kan konstateras att offsetfel i positionsdata, som är konstanta under hela lägesbestämningen, direkt överförs till motsvarande offsetfel i lägesestimeringen. Denna typ av fel har betydelse när det inmätta emitterläget överförs till andra plattformar. Felet är dock av mindre betydelse när läget används av andra system på flygplanet om dessa utnyttjar samma navigeringssystem.

Lägesbestämningmetoden

Slutligen inverkar även lägesbestämningmetoden på lägesbestämningens prestanda. Ett etablerat sätt att undersöka hur väl metoden utnyttjar tillgängliga mätdata är att jämföra uppnådd standardavvikelse vid ett stort antal lägesbestämningar med vad som kan nå enligt Cramér-Rao-gränsen. Denna visar vilken standardavvikelse som är teoretiskt möjlig att nå vid ett stort antal lägesbestämningar med samma förutsättningar. En enstaka lägesbestämning kan naturligtvis råka bli helt felfri.

6.6 LBI – Långbasinterferometri

Grunderna när interferometri används för riktningmätning har beskrivits översiktligt i avsnitt 6.1. Bland annat konstaterades att avståndet mellan antennelementen i en tvåelements interferometer har en avgörande betydelse både för den resulterande vinkelnoggrannheten och för egenskaperna avseende entydighet.

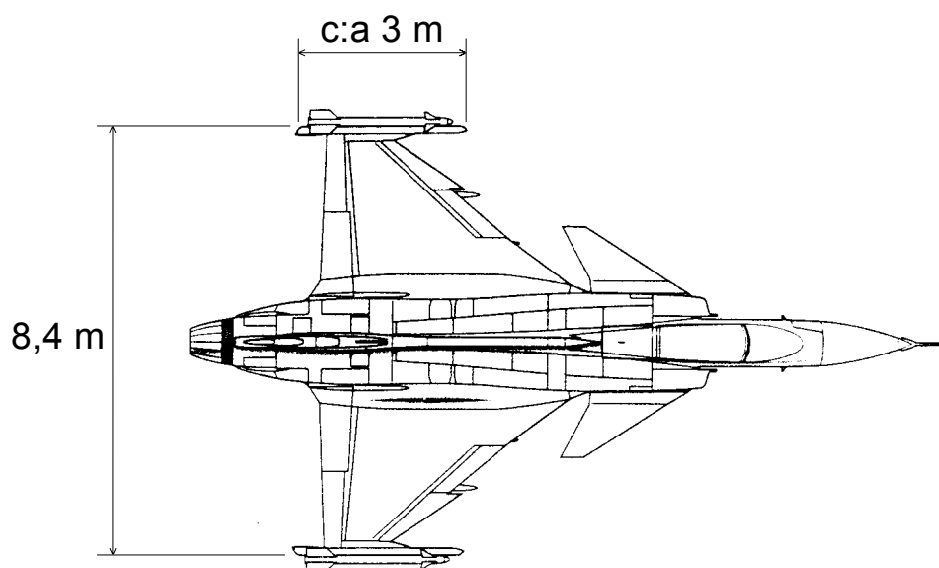
När krav på bredbandighet finns kompliceras entydighetsproblematiken av att den antennstorlek som ges av de lägsta frekvenserna medför att avståndet mellan elementen inte klarar kravet på att vara separerade högst en halv våglängd vid den högsta frekvensen.

En elegant och väletablerad lösning som ger såväl bredbandighet som entydighet och noggrannhet är att använda flera antennelement placerade med lämpligt inbördes avstånd. Entydighet blir i detta fall möjlig genom att använda fasskillnader från samtliga mätbaser medan noggrannheten i vinkelmätningen i huvudsak fås genom den längsta mätbasen. Till priset av fler antennelement och mottagarkanalerna kan konceptet användas för att nå en stor mätbas mellan de yttre elementen.

Långbasinterferometri – LBI – är en variant av interferometri där en många våglängder lång mätbas används. Kravet på momentan entydighet har släppts för att minska på komplexiteten men den potentiellt höga riktningnoggrannheten kvarstår. Långbasinterferometri blir genom detta egentligen inte en metod för att bestämma en signals infallsriktning utan är mer att betrakta som en lägesbestämningsprincip.

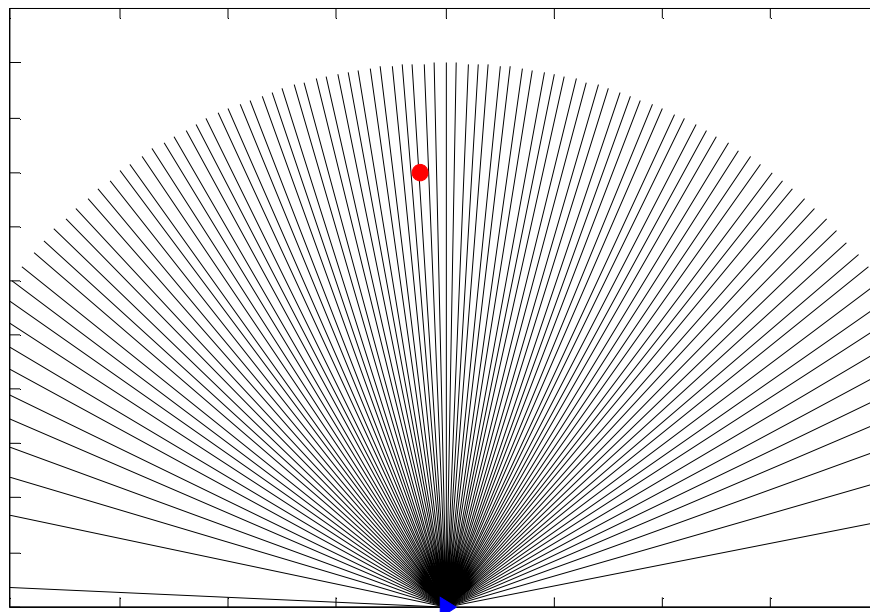
Som framgår nedan har LBI funktionellt många likheter med DDOA. Principerna delar även den egenskapen att de ofta kan utnyttja de varnarantennerna och kablage som sen tidigare finns i ett flygplan. Av detta skäl har tillverkare av radarvarnarsystem marknadsfört metoderna som lämpliga kandidater för att vässa lägesbestämningsprestanda vid exempelvis halvtidsupgraderingar.

Utnyttjas befintliga varnarantennerna på JAS 39 på detta sätt enligt figur 6.24 är de resulterande mätbaserna cirka 3 m respektive 8,4 m.



Figur 6.24 Används JAS 39 befintliga varnarantennerna för lägesbestämning med långbasinterferometri är de aktuella mätbaserna cirka 3 och 8,4 m.

Inom hela det aktuella frekvensområdet är vinkelmätning med interferometri i hög grad mångtydig, även med den kortare av de två mätbaserna. Figur 6.25 ger ett exempel på den solfjäder av alternativa riktningar som skapas när mätbasen är 50 våglängder vilket med 3 m mätbas inträffar vid 5 GHz.



Figur 6.25 Med 3 m antennmätbas och emitterfrekvensen 5 GHz (våglängden 6 cm) är antalet riktningar som producerar samma fasskillnad cirka 100 stycken. Denna omfattande mångtydighet är skälet till att långbasinterferometri inte bör betraktas som en teknik för riktningsmätning.

Förutsättningen kompliceras ytterligare av att solfjäders absoluta inriktning inte kan förutsättas vara kalibrerbar över hela frekvensområdet. Problemet inkluderas om ekvation 6.1 som ger den sanna fasskillnaden ψ kompletteras med en okänd fasoffset ψ_{offset} som dock antas vara konstant och oberoende av infallsriktningen.

$$\psi = 2\pi \cdot \frac{d}{\lambda} \cdot \cos \alpha + \psi_{offset} \quad (6.17)$$

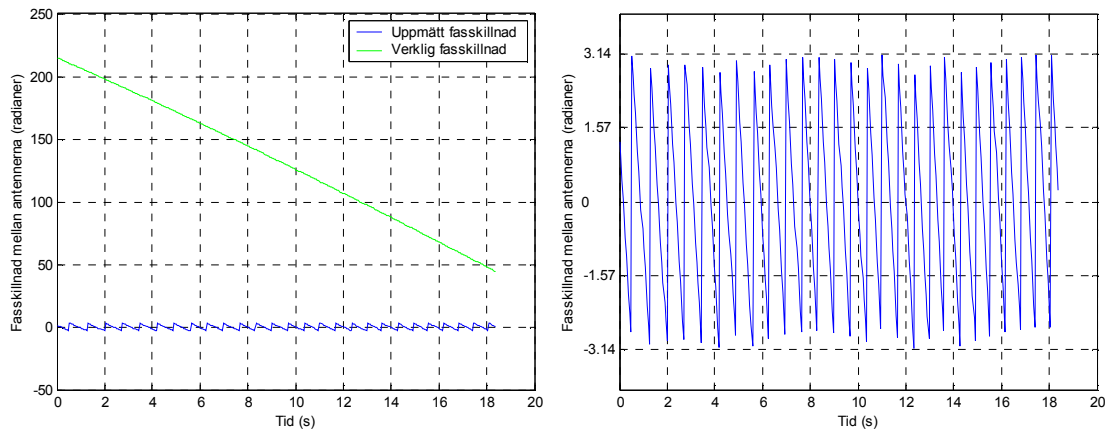
I sambandet motsvarar d avståndet mellan de två antennelementen, α vinkeln mellan antennmätbasen och riktningen till emittern samt λ signalens våglängd.

Sammanfattningsvis kan således konstateras att en enskild fasskillnadsmätning inte kan ge någon information om avståndet eller riktningen till emittern. Hur kan då denna typ av mätningar användas för att ge en noggrann lägesbestämningmetod?

Svaret är att fasskillnaden mäts upprepande gånger under flygplanets rörelse. Den förändring som kan observeras är bland annat beroende av det sökta emitterläget. Principen påminner därmed i hög grad om DDOA där istället frekvensförändringen analyseras.

En komplikation vid långbasinterferometri är att analysen av fasskillnadsförändringarna endast har tillgång till de av mottagaren uppmätta fasskillnaderna. Dessa ligger samtliga i

ett 2π -intervall medan de sanna fasskillnaderna som återfinns på mottagaringången kan vara magnituder större. Analysen måste därför inkludera en fasrekonstruktion av de sanna fasskillnaderna enligt figur 6.26.



Figur 6.26 Fasrekonstruktion är viktigt vid långbasinterferometri. I högra figuren ges ett exempel på hur mottagaren uppfattar fasskillnaden vid ett typfall. För att undvika grova lägesbestämningsfel måste den verkliga fasskillnaden i den vänstra figuren återskapas korrekt. Svårigheten att göra detta ökar om det exempelvis är glest mellan mätningarna.

Som tidigare nämnts kan förändringen hos den uppmätta fasskillnaden, som erhålls till följd av plattformens förflyttning, användas för att lägesbestämma emittern. Den kan sägas svara mot lutningen hos den gröna kurvan i figur 6.26. Fasrekonstruktionen behöver därför inte syfta till att återskapa den sanna fasskillnaden mellan antennerna utan det är fullt tillräckligt att kompensera för de fashopp som återfinns i signalen, det vill säga återskapa det relativa förhållandet mellan mätningarna.

Om fasrekonstruktionen lyckas kan LBI-principen beskrivas med ett likartat resonemang som användes i DDOA-avsnittet. När antennmätbasen på flygplanet är parallell med rörelseriktningen är likheten så stor att resultatet kan bli identiskt.

Den sanna (fasrekonstruerade) fasskillnaden i respektive mätpunkt ges av ekvation 6.17. Om emitterfrekvens och fasoffset är konstanta blir skillnaden mellan de två mätningarna:

$$\Delta\psi = 2\pi \cdot \frac{d}{\lambda} \cdot (\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2) \quad (6.18)$$

Om våglängd ersätts med frekvens erhålls ekvation 6.19, som är mer bekant eftersom den i stort överensstämmer med ekvation 6.16, som gäller för DDOA.

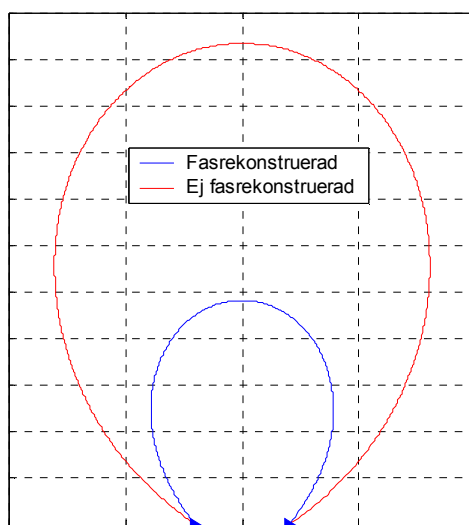
$$\Delta\psi = 2\pi \cdot f \cdot \frac{d}{c} \cdot (\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2) \quad (6.19)$$

Slutsatsen är att antennmätbasen vid LBI motsvarar hastigheten vid DDOA vilket är logiskt eftersom frekvensmätningen inte är momentan utan tar en viss del av mätsträckan i anspråk. Om exempelvis hastigheten är 300 m/s och frekvensen mäts under 10 ms blir den "lokala" mätsträckan vid varje frekvensmätning 3 m. Detta motsvarar väl mätbasen mellan antennerna i JAS 39 vingspetspod.

Utöver att hastigheten vid DDOA motsvarar antennavståndet vid långbasinterferometri är naturligtvis hastigheten betydelsefull för båda metoderna genom att den genererar den geometriska mätbasen.

Analys och simuleringar har visat att med ”lämplig” relation mellan osäkerheten i frekvensmätningen respektive fasskillnadsmätningen blir lägesnoggrannheten för de två metoderna identisk om antennmätbasen är parallell med hastighetsvektorn i respektive inmätningsspunkt. Det högra diagrammet i figur 6.23 skulle därför i detta fall lika gärna kunna visa lägesnoggrannheten för olika fasosäkerhet vid LBI. Detta gäller självklart bara om fasrekonstruktionen varit framgångsrik.

En misslyckad fasrekonstruktion resulterar i de flesta fall i ett stort lägesfel vilket är uppenbart om figur 6.27 studeras.

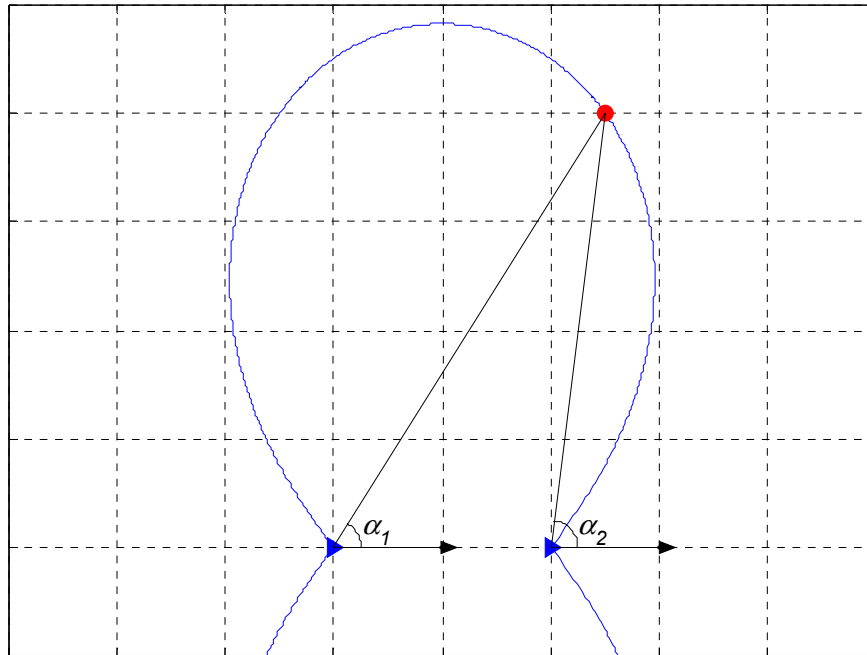


Figur 6.27 Felaktig fasrekonstruktion kan ge upphov till stora lägesfel. I det aktuella exemplet har skillnaden mellan två fasskillnadsmätningar uppmätts till π medan den i själva verket varit 7π . Det får som synes stor påverkan på uppfattningen om avståndet till emittern.

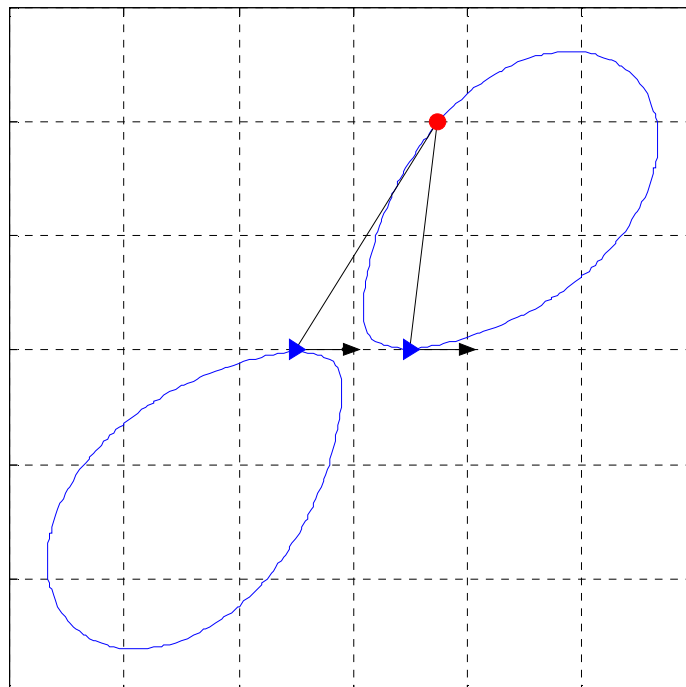
Ett antal egenskaper som exempelvis beror av signalens vågform skiljer dock LBI och DDOA, även när LBI-mätbasen är parallell med hastighetsvektorn. Av detta skäl kan det vara fördelaktigt att kombinera metoderna vilket diskuteras i kapitel 7.

En fundamental skillnad mellan LBI och DDOA är att LBI kan utnyttja en antennbas som är vinkelrät mot rörelseriktningen vilket inte har någon motsvarighet vid DDOA där motsvarigheten till antennbasen – hastighetsvektorn – naturligtvis alltid pekar i rörelseriktningen.

Av figur 6.29 framgår hur annorlunda linjen som sammanbinder möjliga emitterlägen ser ut när antennmätbasen ligger i tvärsled på flygplanet. Inmätningsspunkterna och emitterläget är identiska med det tidigare exemplet. Lägesnoggrannheten är till beloppet likartad med fallet där antennbasen är parallell med hastighetsvektorn men eftersom linjerna i figur 6.28 respektive 6.29 skär varandra förhållandevis vinkelrätt vid emittern finns anledning att förmoda att felellipserna är nästan ortogonala. Detta antyder att noggrannheten kan förbättras väsentligt om metoderna kombineras. Denna förmodan bekräftas i nästa kapitel.



Figur 6.28 Figuren illustrerar principen för lägesbestämning med långbasinterferometri när antennmätbasen är parallell med rörelseriktningen. Samma verkliga fasskillnad mellan inmätningpunkterna gäller för samtliga punkter på bågen. Infallsvinkeln för signalen i de två inmätningpunkterna är α_1 respektive α_2 . Notera att även för LBI finns den fundamentala mångtydigheten som resulterar i att bågen speglas i flygbanan då rak flygbana används.



Figur 6.29 Förutsättningarna är de samma som i figur 6.28 med den skillnaden att antennmätbasen istället placerats vinkelrätt mot rörelseriktningen. Den blå kurvan, som utgörs av de emitterlägen som ger upphov till samma skillnad i inmätta värden, får som synes ett helt annat utseende än då antennmätbasen placerats parallellt med rörelseriktningen. Värt att notera är också att kurvan passerar den verkliga emitterpunkten med en riktning som är nära nog ortogonal jämfört med situationen i figur 6.28. Det antyder att det finns prestanda att vinna genom att kombinera de båda antennplaceringarna.

7. Kombinerade lägesbestämningsmetoder

I detta kapitel diskuteras vilka egenskaper som fås då olika lägesbestämningsmetoder kombineras. Inledningsvis kommenteras kombinationseffekterna i allmänna termer för att sedan följas av mer konkreta beskrivningar av ett antal kombinationer av lägesbestämningsmetoder. En principiell beskrivning av de enskilda lägesbestämningsmetoderna återfinns i kapitel 6.

7.1 Allmänt om att kombinera metoder

Att kombinera två eller flera grundläggande metoder för lägesbestämning kan resultera i en betydande prestandaförbättring. Exempelvis kan en viss lägesnoggrannhet nås på kortare tid eller en högre slutgiltigt lägesnoggrannhet erhållas än för de enskilda metoderna. En förbättrad noggrannhet kan dels bero på att antalet mätvärden ökar, dels på att en metod kan kompensera för en annans svaghet. Det är det senare som ger den mest gynnsamma kombinationseffekten.

Ett liknande resonemang kan föras avseende möjligheten att klara av att hantera olika signaltyper. Ur detta perspektiv kan det vara viktigt att kombinera metoder för att lägesbestämningsalgoritmen ska få bred användbarhet.

En kombination av olika metoder kan även ge en minskad risk för felaktiga beslut i samband med mångtydigheter jämfört med om en enskild metod används. Som exempel kan nämnas att säkerheten i fasrekonstruktionen för långbasinterferometri kan ökas då denna kombineras med någon annan metod.

Dessutom finns ofta problematiken med den fundamentala mångtydigheten som innebär att det finns två alternativa och lika sannolika emitterlägen. Dessa befinner sig ofta på var sin sida av mätbasen eller flygbanan och är ibland vid raka mätbaser rena speglingar. Exempel på speglingar som kan ge upphov till falska emitterlägen återfinns i bland annat figur 6.28 och 6.29. För att lösa problemet behövs kompletterande information exempelvis från en metod som antingen är entydig i sig eller i kombination med den första metoden blir entydig.

7.2 DDOA och riktningsmätning

Lägesbestämning baserad på en kombination av riktningsmätning och noggrann frekvensmätning (DDOA) kan ge många fördelar, även om riktningsinformationen är grov. Kombinationen är dessutom naturlig eftersom momentan riktningsmätning är nödvändig för att pulssorteringen ska fungera i täta signalmiljöer. DDOA kan inte tillfredsställa detta behov.

Lägesbestämning baserad på en kombination av DDOA och momentan riktningsmätning har därför bedömts vara ett intressant alternativ och har studerats relativt ingående under projektiden. Delar av arbetet finns beskrivet i Anderson m.fl. [1].

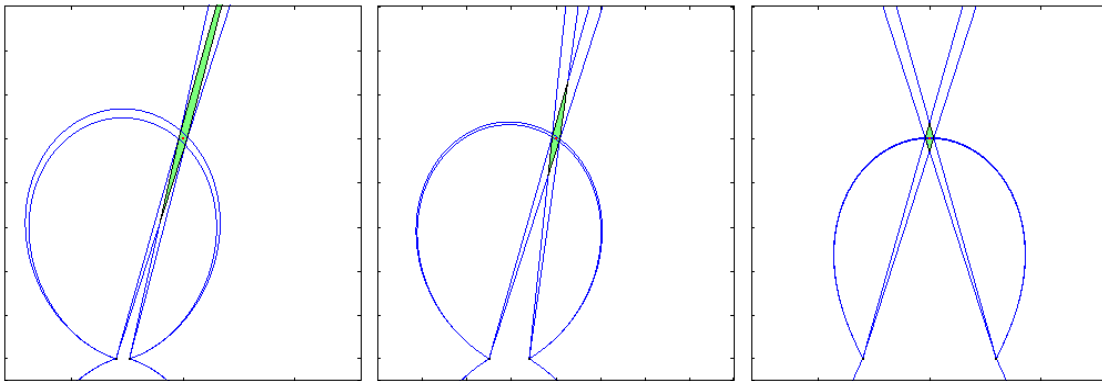
Resterande del av avsnittet kommer att ägnas åt exempel och kommentarer rörande simuleringsresultat. Syftet är att såväl peka på prestandapotentialen som att illustrera fördelen med att kombinera frekvensmätningar och riktningsmätningar vid estimeringen av emitterläget.

Riktningsmätningen kan bland annat behövas för sidobestämning eftersom lägesbestämning baserad på enbart DDOA inte alltid klarar av att sidobestämma en emitter. Så

är fallet när sis-plattformen flugit en cirkulär bana (konstant radie) eller en rakbana (specialfall av cirkulär bana, oändlig radie). I det senare fallet är det uppenbart att samma dopplerskift erhålls oavsett på vilken sida om flygbanan som emittern befinner sig. För en cirkelbana med ändlig radie gäller att emitterlägen på samma sida som cirkelcentrum blir entydiga om de ligger längre bort än cirkelcentrum. Om avståndet till emittern är kortare än cirkelradien erhålls ett falsk emitterläge på andra sidan flygbanan. Om flygbanan består av två cirkulära bandelar med olika cirkelcentra, exempelvis en cirkulär med ändlig radie och en rakbanedel, är sidobestämning möjlig. På ena sidan om flygbanan ger cirkulär bandel och rak bandel samma läge (sant läge) och på andra sidan var sitt läge (båda falska).

En anledning att komplettera DDOA med riktningmätningar är att de har olika starka och svaga sidor. Exempelvis ger lägesbestämning baserad på enbart riktningmätningar (triangulering) ett resultat med stor osäkerhet i avståndsled om den exponerade mätbasen är kort. Med lägesbestämning baserad på DDOA finns den största osäkerheten väsentligen orienterad längs de bågformade kurvorna som metoden ger upphov till. I gynnsamma fall är osäkerheterna hos triangulering och DDOA orienterade i olika riktningar, vilket ger ökad noggrannhet då metoderna kombineras. Generellt kan sägas att för att ett bra resultat ska nås måste egenskaperna hos varje metod för sig i sin ledd vara kända och hålla viss kvalitet.

Figur 7.1 illustrerar situationen med mätningar av både riktning och frekvens vid två olika tidpunkter. I den vänstra delfiguren är avståndet mellan mätpunkterna 600 meter, i den mellersta 3,6 km och i den högra delfiguren 6 km. Det framgår tydligt att vid triangulering är avståndsosäkerheten med kort mätbas stor. I den vänstra delfiguren ryms inte felområdet (grönmarkerat) inom figurens gränser. Denna osäkerhet minskar dock då mätbasen ökar. Det är en effekt av att kryssvinkelns spetsighet minskar.



Figur 7.1 Principbild som visar situationen med två mätningar av riktning och frekvens. Inmätningarna är gjorda med olika inbördes avstånd. Det framgår tydligt att triangulering och DDOA har sina respektive noggrannheter i olika dimensioner. Det finns med andra ord en del att vinna på att kombinera dessa båda metoder.

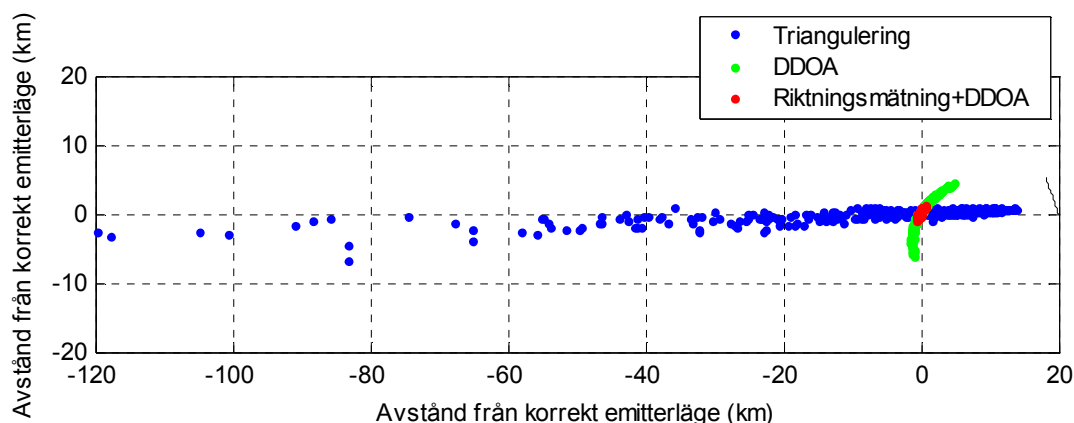
Mätningarna av frekvens resulterar till följd av frekvensosäkerheten i ett band där emittern kan ligga. Som synes är detta band smalt redan i den vänstra delfiguren. Det smalnar dessutom ytterligare då mätbasen ökar. Osäkerheten i riktningens led är dock stor. Det verkar alltså rimligt att kombinationen av mätningarna kan ge bättre totalprestanda, både med avseende på noggrannhet och snabbhet (kortare flygbana för att nå viss noggrannhet) för funktionen lägesbestämning.

I figur 7.1 betraktas vinsten av att kombinera riktningmätning och DDOA då endast två inmätningar utnyttjas. Dessutom bör tilläggas att riktningselet i figuren valts till ett lågt värde. Med mer rimliga värden på riktning- och frekvensspridning samt ett ökat antal inmätningpunkter fås en annan situation, vilket beskrivs i figur 7.2-7.4.

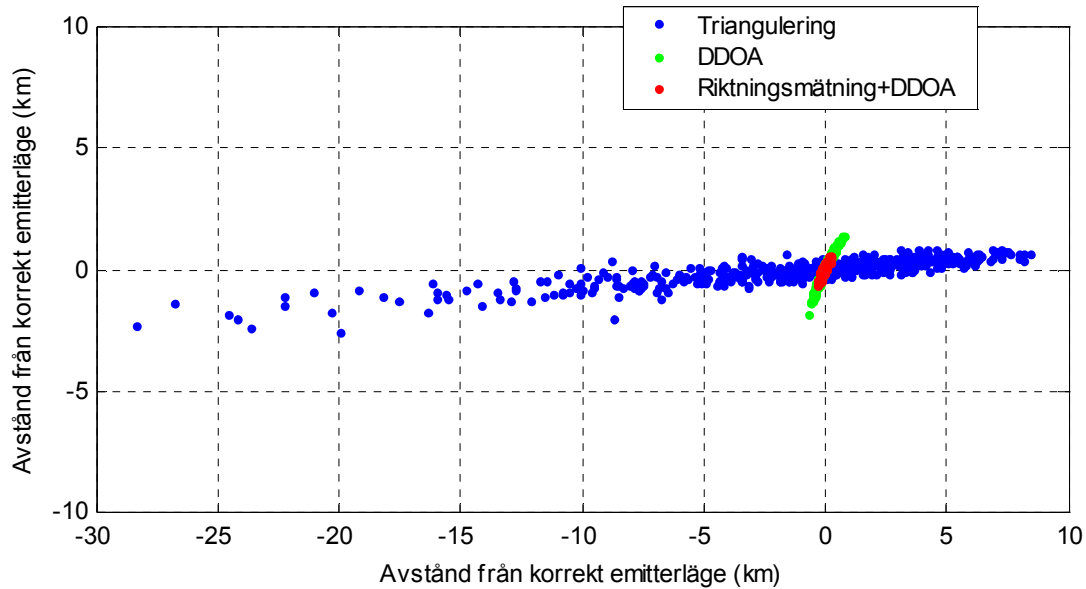
Simuleringarna som redovisas i figur 7.2-7.4 har genomförts under följande förutsättningar:

- σ_{riktning} : 10°
- σ_{frekvens} : 10 Hz
- Hastighet: 300 m/s
- Mättakt: ~ 20 Hz
- Emittterfrekvens: 10 GHz
- Typfall: Rakbana enligt bilaga A
- Antal Monte-Carlo-simuleringar: 500 st

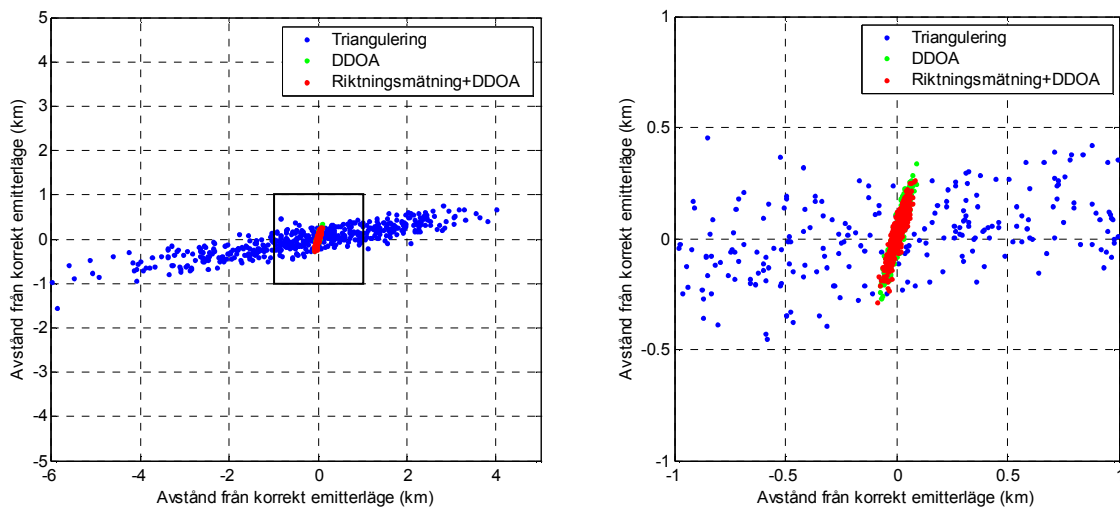
Det visar sig att vinsten av kombinationen framförallt erhålls för korta mättider. Riktningmätning och DDOA kompletterar då varandra bra vilket leder till ett bättre slutresultat. För längre mättider kan frekvensmätningarna sägas stå för hela noggrannheten medan riktningmätningarnas enda uppgift blir att svara för sidobestämning. Notera att det typfall som omnämns finns beskrivet i bilaga A.



Figur 7.2 Lägesestimat baserade på mätningar under de fem första sekunderna av typfallet Rakbana. Som synes är estimaterna från triangulering (blå) väldigt osäkra i avståndsled. Omnämns bör att cirka 15 % av lägesestimaterna ligger till vänster utanför bildområdet. Lägesestimaterna baserade på frekvensmätningar (gröna) har större noggrannhet i avstånd medan osäkerheten i vinkelled är större än för trianguleringsestimaterna. Det är tydligt att vinsten av att kombinera vinkelmätningar och frekvensmätningar är stor eftersom lägesestimaterna för den kombinerade lägesbestämningmetoden är betydligt mer sammanhållna. I höger bildkant syns hela flygbanan i form av en svart linje. Notera att avståndsfelen från trianguleringen i många fall är större än avståndet mellan flygbana och emitter.



Figur 7.3 Lägesestimat baserade på mätningar under de tio första sekunderna av typfallet Rakbana. Efter tio sekunder har trianguleringen förbättrats avsevärt. Flygbanan ligger nu utanför bilden vilket även gäller för ett antal lägesestimaten. Trots att bilden är förstorad relativt figur 7.2 har den andel som ligger utanför bildens vänsterkant nu minskat till 1 %. Värt att notera är också att den kombinerade metoden fortfarande är bättre än metoden som är baserad enbart på frekvensmätningar. Den relativa skillnaden har dock minskat.

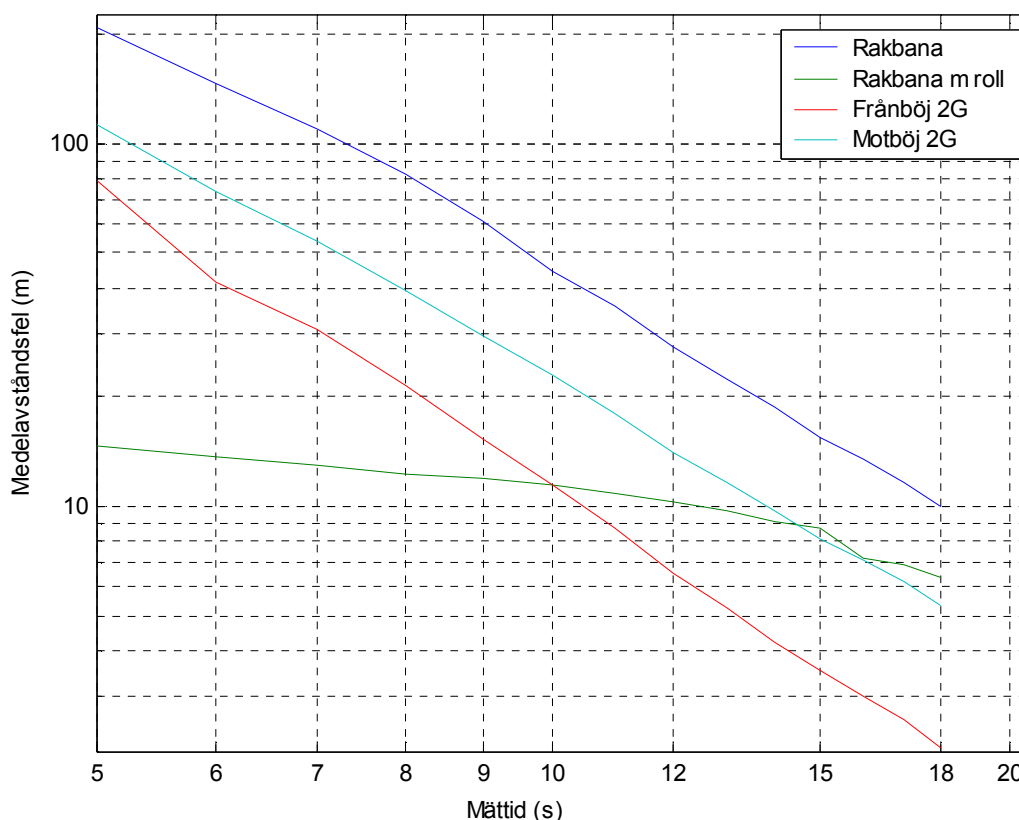


Figur 7.4 Lägesestimat baserade på mätningar under tjugo sekunder av typfallet Rakbana. Trianguleringen har nu förbättrats kraftigt som följd av den ökade mätbasen. Även estimaten baserade på frekvensmätningarna har förbättrats och är nu nästan lika bra som estimaten från den kombinerade metoden. Den högra delen av figuren visar en förstorad version av det markerade området i den vänstra, där det tydligare framgår att skillnaden mellan kombinationsmetoden och DDOA minskat. I detta fall ger vinkelmätningarna väldigt litet bidrag till estimaten. Det betyder i sin tur att frekvensmätningarna i princip står för hela noggrannheten.

Ett annat sätt att studera prestanda är att jämföra vilken noggrannhet som kan erhållas för olika flygbanor som funktion av mättiden. Figur 7.5 visar medelavståndsfelet, det vill säga medelvärdet av lägesestimaten avstånd från den verkliga emitterläget, som funktion

av mättiden för ett antal typfall. Dessa finns definierade i bilaga A. Med det aktuella emitterläget visar figuren att den raka flygbanan är den minst gynnsamma medan de flygbanor som är krökta är bättre. Det beror på att vridningar av hastighetsvektorn ger en större dopplervariation. Värt att notera är att den raka flygbanan med roll blir bra tidigt. Det beror på att den första rollen, som ger stora dopplervariationer, görs redan efter en sekunds flygning.

Av figuren framgår inte att Frånböj 2G är mycket sämre än övriga vid mycket korta mättider. Det beror på att den initialt har den spetsigaste anflygningsvinkeln mot emitttern. Följden blir att den exponerade mätbasen växer långsammare än för övriga flygbanor. Slutsatsen bör därför vara att både dopplervariation och exponerad geometrisk mätbas är viktiga för att uppnå en noggrann lägesbestämning.



Figur 7.5 Resultat från datorsimuleringar av lägesbestämning baserad på kombinationen DDOA och riktningmätning. Diagrammet visar hur medelavståndsfelen beror av flygbanan och mättiden. Standardavvikelsen vid simuleringarna har varit 10° för riktningmätningarna och 1 Hz för frekvensmätningarna. Notera speciellt att den tidiga rollen i "Rakbana med roll" ger upphov till noggrannhet även för korta mättider. De olika typfallen är beskrivna i bilaga A.

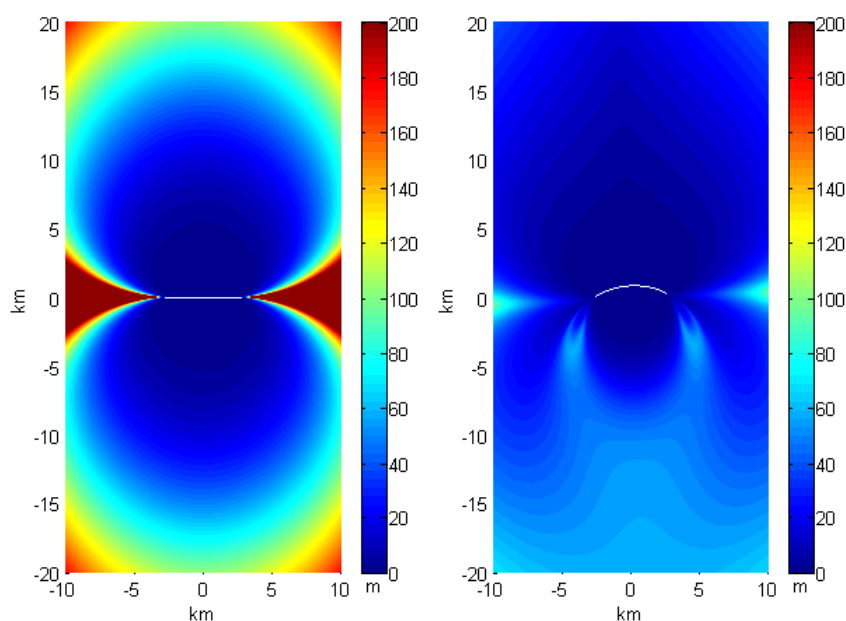
Simuleringarna som redovisas i figur 7.5 har genomförts under följande förutsättningar:

- σ_{riktning} : 10°
- σ_{frekvens} : 1 Hz
- Hastighet: 300 m/s
- Mättakt: ~ 20 Hz
- Emitterfrekvens: 10 GHz
- Antal Monte-Carlo-simuleringar: 500 st

En nackdel vid Monte-Carlo-simuleringar är att lägesbestämningsmetodens prestanda endast kan studeras för en specifik kombination av emitterposition och flygbana i taget. Då fler kombinationer ska studeras krävs motsvarande antal simuleringar vilket är tidsödande. För att få uppfattning om prestanda för ett större antal emitterpositioner kan istället exempelvis den så kallade Cramér-Rao-gränsen användas. En utförligare beskrivning av denna återfinns i kapitel 3.

Om Cramér-Rao-gränsen ska användas för att bedöma en metod är det viktigt att veta hur väl denna speglar metodens verkliga prestanda. I Becker [11] används en metod baserad på minstakvadrat-minimering med kombinationer av riktningmätningar och frekvensmätningar. Enligt Becker når denna metod ner till Cramér-Rao-gränsen, vilket gör det möjligt att beräkna spridningen hos skattningen analytiskt. Minstakvadrat-minimering innebär att mätdata jämförs med data beräknade utifrån en modell. I modellen återfinns parametrar som exempelvis emitterns position och den emitterade frekvensen. Dessa parametrar varieras stegvis så att avvikelsen mellan mätdata och modellberäknade data minskar för varje steg. Då avvikelsen nått under en viss gräns avbryts beräkningen och de parametervärden som erhållits antas spegla de verkliga värdena. Notera att de simuleringar som presenteras i detta avsnitt också uteslutande använder sig av minstakvadrat-minimering.

Figur 7.6 visar Cramér-Rao-gränsen i omgivningen av en rakbana och en 2G-sväng. Krökningsradien för 2G-svängen är densamma som för typfallen Frånböj 2G och Motböj 2G, enligt bilaga A.



Figur 7.6 Cramér-Rao-gränsen beräknad i en större omgivning kring en rakbana och en 2G-sväng. Som synes ger den krökta flygbanan större möjlighet till noggrann lägesbestämning än den raka flygbanan gör. Det beror på att dopplervariationen är större i många punkter då hastighetsvektorns riktning förändras. Det ger i sin tur lägesbestämningen ökad noggrannhet. Beräkningarna är genomförda med emitterfrekvensen 10 GHz. Både frekvensfel och riktningfel antas vara normalfördelade med medelvärde noll. Standardavvikelsen hos frekvensmätningarna är 10 Hz och hos riktningmätningarna 10° .

Vid beräkningen av Cramér-Rao-gränsen har lägesbestämningen betraktats som ett tvådimensionellt problem vilket medför att analysen ger en felellips i varje emitterposition. Ellipsens orientering och excentricitet är beroende av emitterpositionen vilket bilden inte kan illustrera. I figuren presenteras endast ellipsens största halvaxel – det vill säga den maximala spridning – med färgkod. Eftersom den största osäkerheten presenteras förskönas inte möjliga prestanda.

Vid analysen av Cramér-Rao-gränsen enligt figur 7.6 har signal/brus-förhållandet varit konstant oavsett emitterpositionen vilket exempelvis innebär att effekten av utbredningsdämpningens avståndsberoende inte ingår i beräkningen.

Av figuren framgår att den möjliga lägesnoggrannheten vid 2G-svängen är påtagligt bättre än vid rakbanan inom stora områden. Anledningen är framförallt att manövreringen är gynnsam för att generera dopplervariationer.

Beräkningarna som redovisas i figur 7.6 har genomförts under följande förutsättningar:

- σ_{riktning} : 10°
- σ_{frekvens} : 10 Hz
- Hastighet: 300 m/s
- Antal mätpunkter: 380 st
- Emitterfrekvens: 10 GHz
- Flygtid: 18,4 s

7.3 Långbasinterferometri och riktningsmätning

För att LBI ska fungera som lägesbestämningsmetod krävs, som tidigare nämnts, någon typ av fasrekonstruktion, en process där uppmätt fasskillnad omsätts till en entydig sann fasskillnad. Då LBI kombineras med entydig riktningsmätning ökar möjligheten att bestämma en entydig sann fasskillnad.

I Kaplan [12] anges två möjliga metoder. Båda dessa använder en entydig interferometer för att genomföra den entydiga riktningsmätningen.

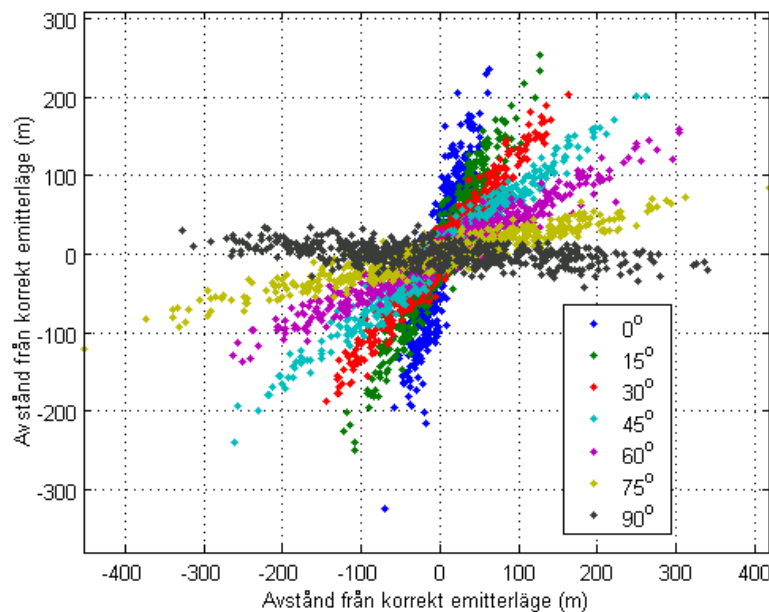
Fortsättningsvis i detta avsnitt antas att problemet med fasrekonstruktion är löst. Det innebär att följande simuleringar och slutsatser gäller då perfekt relativ fasrekonstruktion åstadkommit.

I kapitel 6 gjordes en jämförelse mellan DDOA och LBI. Slutsatsen var att metoderna för vissa specifika val av parametrar i princip har samma egenskaper avseende lägesnoggrannhet. En av förutsättningarna är att långbasinterferometerns två antenner monteras parallellt med rörelseriktningen. Eftersom antennerna i teorin kan placeras på valfritt sätt kan det vara intressant att studera vad som händer då antennplaceringen varierar.

I figur 7.7 redovisas ett exempel på simuleringsresultat då vinkeln mellan hastighetsvektorn och antennmätbasen varierats från 0° till 90° i steg om 15° . En effekt av att vrida antennparet relativt rörelseriktningen är att simuleringsresultatens orientering också vrids sig. Storleken hos vridningen är dock inte identisk med antennparets vridning.

Värt att notera är att antennparets orientering även inverkar på hur stor spridningen av de estimerade emitterlägena blir. I det aktuella fallet är den resulterande spridningen störst då vinkeln mellan antennparet och rörelseriktningen är 75° . Orsaken är att interferometern då är placerad så att den har sämst vinkelkänslighet i den riktning

emittern befinner sig. Som senare framgår av figur 7.8 är inverkan av antennparets orientering på lägesosäkerhetens storlek i hög grad beroende av emitterpositionen.



Figur 7.7 Simuleringsresultat då antennmätbasens orientering varierats från helt parallell med (0°) till helt vinkelrät mot (90°) rörelseriktningen. Intressant att notera är att även punkthoparnas orientering vrider. Vinkeln mellan hastighetsvektorn och antennmätbasen påverkar även lägesosäkerheten vilket kan konstateras genom att utsträckningen hos ansamlingarna av lägespunkter förändras. Simuleringarna är genomförda med typfallet Rakbana, se bilaga A.

Simuleringarna som redovisas i figur 7.7 har genomförts under följande förutsättningar:

- σ_{riktning} : 10°
- $\sigma_{\text{fäskillnad}}$: 36°
- Hastighet: 300 m/s
- Antennmätbas: 3 m
- Antal mätpunkter per typfall: 380 st
- Emitterfrekvens: 10 GHz
- Flygbana: Tidsintervallet 0-18,4 s av typfallet Rakbana enligt bilaga A
- Antal Monte-Carlo-simuleringar per antennplacering: 500 st

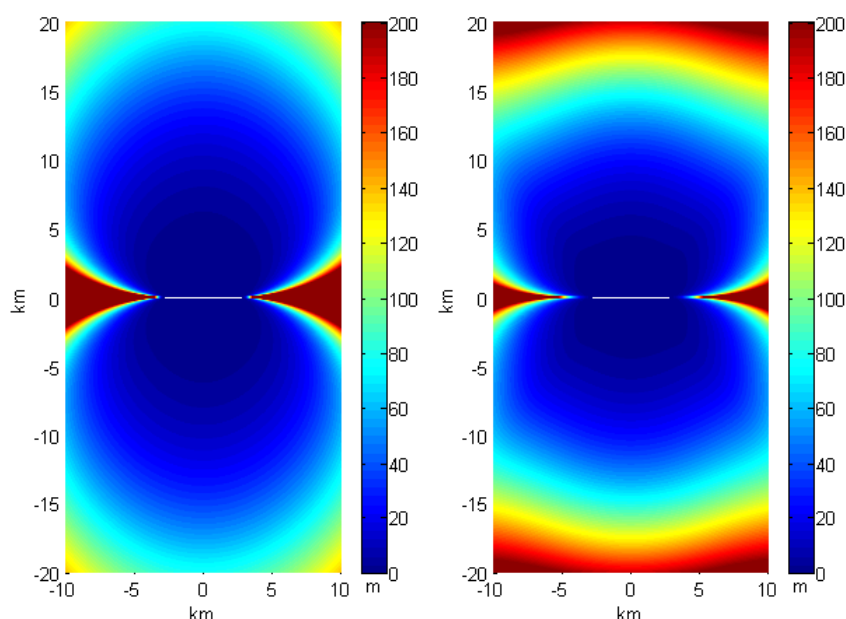
Liksom för kombinationen av DDOA och riktningsmätning kan det vara intressant att analysera vilken lägesnoggrannhet som teoretiskt kan nås för olika emitterpositioner i förhållande till en given flygbana. Som tidigare utnyttjas Cramér-Rao-analys för ändamålet. Vid kombinationen långbasinterferometri och riktningsmätning kan analysen genomföras för olika orienteringar av antennparet.

I figur 7.8 redovisas två situationer som båda är beräknade med en rakbana som grund. I den vänstra är antennerna placerade parallellt med rörelseriktningen och i den högra ortogonalt mot densamma.

Då figuren studeras ser lägesnoggrannheten inte ut att skilja sig åt speciellt mycket för de två alternativa antennorienteringarna. Då antennparet placeras parallellt med

hastighetsvektorn nås något bättre noggrannhet tvärs flygbanan än då antennparet är placerat ortogonalt mot hastighetsvektorn. Den ortogonala placeringen av antennparet ger däremot ett lite bättre noggrannhetsområde längs flygbanan.

Som visades i figur 7.7 för ett utvalt emitterläge är orientering hos lägesosäkerheten beroende av antennparets orientering. Denna effekt framgår även av Cramér-Rao-beräkningarna som ligger bakom figur 7.8. Som tidigare visar dock färgkoden enbart beloppet av felellipsens största halvaxel.



Figur 7.8 Cramér-Rao-gränsen beräknad för ett stort antal emitterpositioner i en omgivning kring en rakbana. I den vänstra bilden är antennparet parallellt med hastighetsvektorn och i den högra är antennparet ortogonalt mot hastighetsvektorn. Notera att orienteringen hos noggrannheten inte framgår av bilderna. Beräkningarna är genomförda med emitterfrekvensen 10 GHz och antennavståndet 3 meter. Standardavvikelsen hos fasmätningarna är 36° och hos riktningmätningarna 10° .

Beräkningen som redovisas i figur 7.8 är genomförd under följande förutsättningar:

- σ_{riktning} : 10°
- $\sigma_{\text{fasskillnad}}$: 36°
- Hastighet: 300 m/s
- Antennmätbas: 3 m
- Antal mätpunkter: 380 st
- Emitterfrekvens: 10 GHz
- Flygtid: 18,4 s

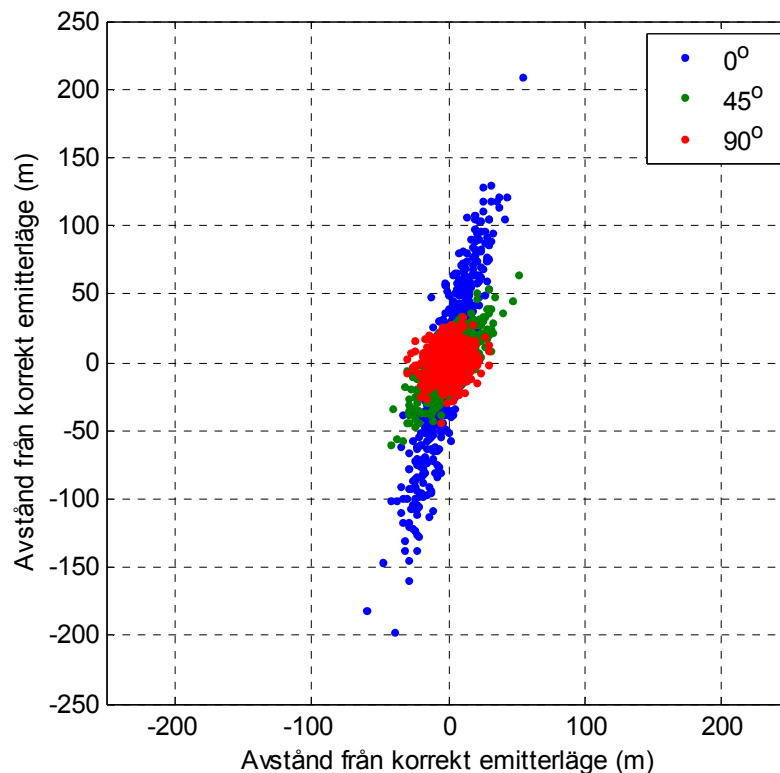
Att felellipsernas orienteringen i en och samma emitterposition påverkas av långbasinterferometerens antennbasorientering innebär att lägesfelen kan minskas om två ortogonala mätbaser utnyttjas tillsammans. I nästa avsnitt beskrivs hur resultatet på detta sätt förbättras när DDOA kombineras med riktningmätning och en långbasinterferometer som har antennparet tvärs flygriktningen.

7.4 DDOA, LBI och riktningsmätning

Vid kombination av DDOA, LBI och riktningsmätning finns ytterligare några synergivinster att göra jämfört med de kombinationer av två mätyper som beskrivits ovan.

En fördel är att vågformer som är oanvändbara vid DDOA kan vara lämpliga för LBI och vice versa. En annan fördel är att den fasrekonstruktion som LBI kräver förbättras ytterligare om frekvensmätningar också används.

Kombinationen av DDOA, LBI och grov riktningsmätning kan också vara gynnsam för att nå en liten lägesosäkerhet. I avsnitt 7.3 redovisades kopplingen mellan antennmätbasens orientering och den resulterande felellipsens orientering. Då LBI kombineras med DDOA kan skärningen mellan respektive felellips göra att resultatet förbättras avsevärt. Den grova riktningsmätningen bidrar då väldigt lite om ens alls till noggrannheten men kan under vissa förutsättningar vara viktig för sidobestämningen samt ge ökade förutsättningar för prestanda då mättiden är kort.



Figur 7.9 Simuleringsresultat från lägesbestämningmetoden som kombinerar LBI, DDOA och grov riktningsmätning. Vid simuleringarna har vinkeln mellan antennmätbasen och hastighetsvektorn varierats. Det framgår tydligt att spridningen hos de beräknade emitterlägena minskar då vinkeln ökar. Det beror på att felellipsens orientering för LBI förändras och med antennmätbasen vinkelrätt mot hastighetsvektorn (90°) kompletterar DDOA och LBI varandra på ett effektivt sätt.

I figur 7.9 återfinns exempel på simuleringsresultat då antennmätbasens orientering varierats. Som synes nås betydligt lägre spridning då antennmätbasen för LBI varit ortogonal mot rörelseriktningen, än då den varit parallell med densamma. Det beror på att DDOA och LBI, i den aktuella geometrin och med antennmätbasen vinkelrät mot hastighetsvektorn, har nära nog ortogonala felellipser.

Simuleringarna som redovisas i figur 7.9 är genomförda under följande förutsättningar:

- σ_{riktning} : 10°
- $\sigma_{\text{fäskillnad}}$: 36°
- σ_{frekvens} : 10 Hz
- Hastighet: 300 m/s
- Antennmätbas: 3 m
- Antal mätpunkter: 380 st
- Emitterfrekvens: 10 GHz
- Flygbana: Tidsintervallet 0-18,4 s av typfallet Rakbana enligt bilaga A

En generell slutsats är att det är väldigt gynnsamt att kombinera olika metoder när emittern ligger i områden där respektive osäkerhetsområde har en uttalad ellipsform och felellipsernas orientering skiljer mellan metoderna.

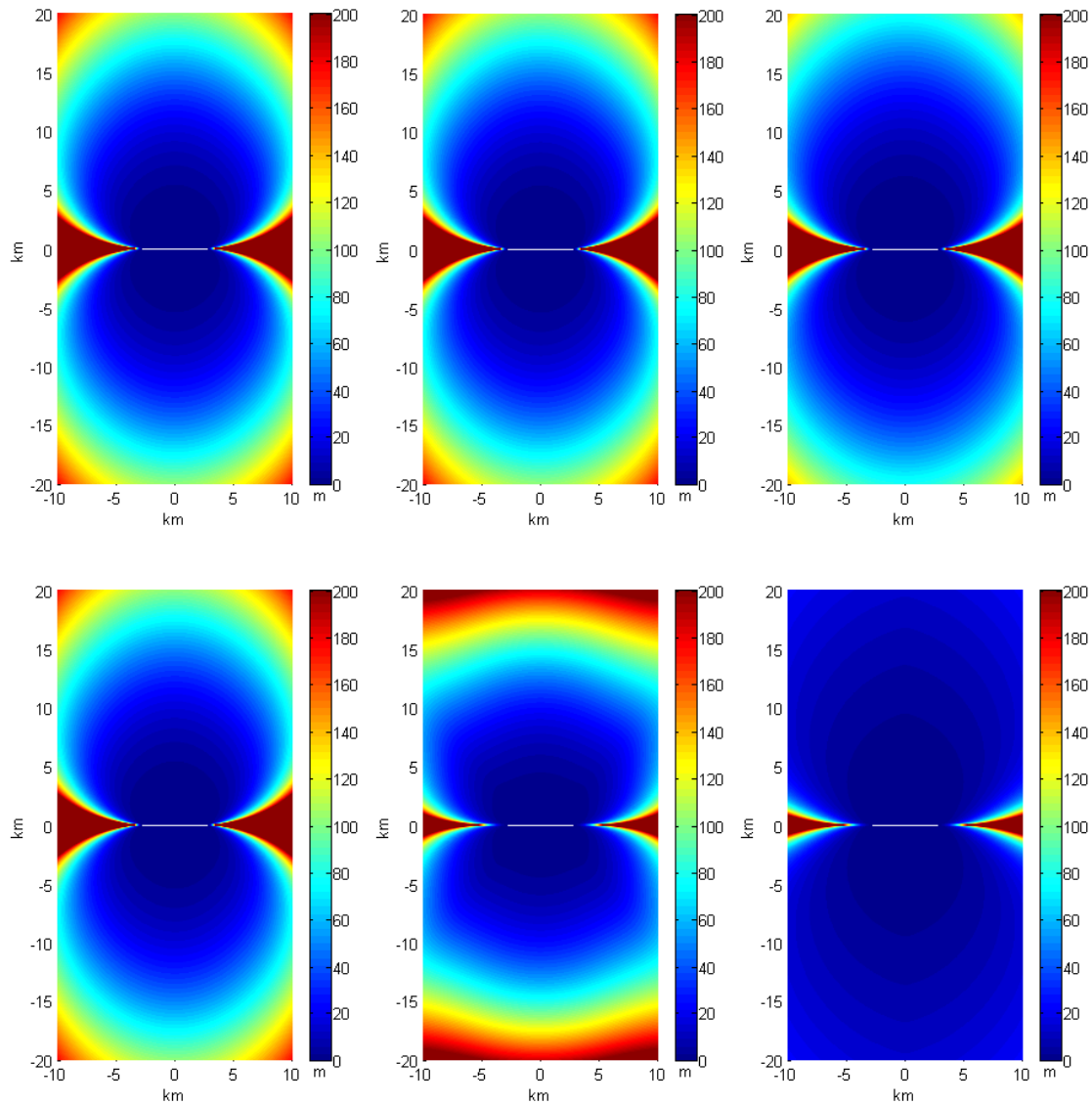
För att erhålla en bättre uppfattning om möjliga prestanda i ett större antal emitterpositioner kan Cramér-Rao-gränsen beräknas även för den sammansatta metoden. Figur 7.10 visar resultatet från olika kombinationer av DDOA, LBI och riktningsmätning. Dessa beräkningar är, med ett undantag, baserade på samma förutsättningar som gäller för figur 7.9. Undantaget gäller flygbanan som i detta fall inte kan sägas vara ett tidsavsnitt av typfallet Rakbana. Skälet till det är att beskrivningen av typfallen i bilaga A fokuserar på geometriskt förhållande mellan flygbana och ett enskilt emitterläge medan resultaten i figur 7.10 gäller för ett stort antal emitterlägen. För att beskrivningen ska bli fullständig bör dock nämnas att flygbanan i figur 7.10 är en 18,4 sekunder lång rakbana.

I den övre raden har antennen varit parallellt med hastighetsvektorn och i den undre raden har antennen varit ortogonalt mot hastighetsvektorn. Den vänstra kolumnen visar prestanda från kombinationen av DDOA och riktningsmätning. Kolumnen i mitten visar prestanda då LBI kombinerats med riktningsmätning. I den högra kolumnen återfinns resultatet då samtliga tre kombinerats. Notera att både den vänstra och mittersta kolumnen presenterats i föregående avsnitt. Det är således bara den högra kolumnen som är ny.

Då den övre raden studeras, det vill säga då antennmätbasen är orienterad parallellt med hastighetsvektorn, kan noteras att prestanda endast förbättras marginellt då alla tre mätningarna används. Det beror i sin tur på att DDOA och LBI har sin lägesnoggrannhet i samma riktning. Den lilla förbättring som trots allt erhålls beror på att antalet mätningar är fler i den högra bilden.

Den undre raden uppvisar ett helt annat slutresultat. Den högra bilden är betydligt bättre än de båda andra. Förklaringen till detta är att DDOA och LBI har sin noggrannhet i olika riktningar, vilket omnämnts i föregående avsnitt. Vid kombineringen görs i detta fall två vinster. Dels ger det ökade antalet mätningar, precis som innan, en liten noggrannhetsförbättring och dels ger de olika orienteringarna en avsevärd lägesförbättring.

En annan fördel som erhålls vid kombination av DDOA och LBI är att ytterligare emitterparametrar kan skattas. Enligt Fowler [13] kan kombinationen skatta såväl emitterläge som emitterns hastighet. Detta är inte verifierat med egna analyser.



Figur 7.10 Cramér-Rao-gränsen för kombinationer av DDOA, LBI och riktningsmätning. I den övre raden är antennmätbasen parallell med hastighetsvektorn och i den undre raden är antennmätbasen vinkelrät mot hastighetsvektorn. Den vänstra kolumnen visar kombination av DDOA och riktningsmätning, den mittersta kombination av LBI och riktningsmätning samt den högra kombination av DDOA, LBI och riktningsmätning. Speciellt värt att notera är att en kraftig lägesnoggrannhetsförbättring erhålls för trippelkombinationen då antennmätbasen är vinkelrät mot hastighetsvektorn. I samtliga fall är flygbanan en rakbana.

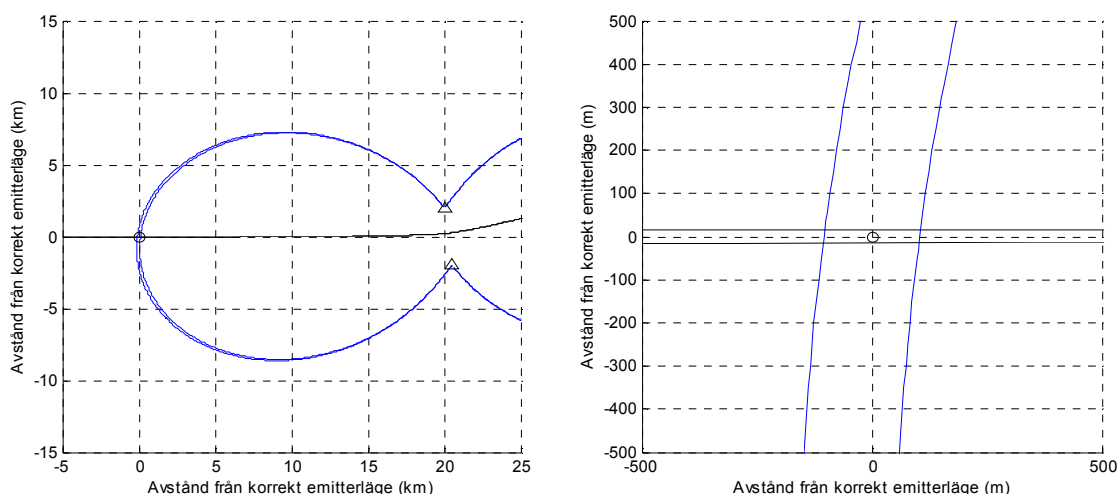
7.5 TDOA och DDOA

Tidsdifferensmätningar kan användas på två sätt i kombination med DDOA. Det ena är att kombinera DDOA med TDOA-mätningar lokalt på flygplanet (kortbas-TDOA) – vilket motsvarar DDOA i kombination med riktningsmätning och därmed inte kommer att beröras närmare i det här avsnittet. Kombinationen kortbas-TDOA och DDOA används exempelvis av det tidigare nämnda systemet PLAID.

Det andra är i ett multiplattformsscenario där två eller fler flygplan samverkar med TDOA-mätningar enligt avsnitt 6.4. DDOA-mätningarna kan då också ske med hjälp av flera flygplan varför en momentan lägesbestämning är möjlig redan vid två samverkande flygplan till skillnad från det fall då DDOA-lägesbestämning utförs från ett enda flygplan och momentan lägesbestämning inte är möjlig.

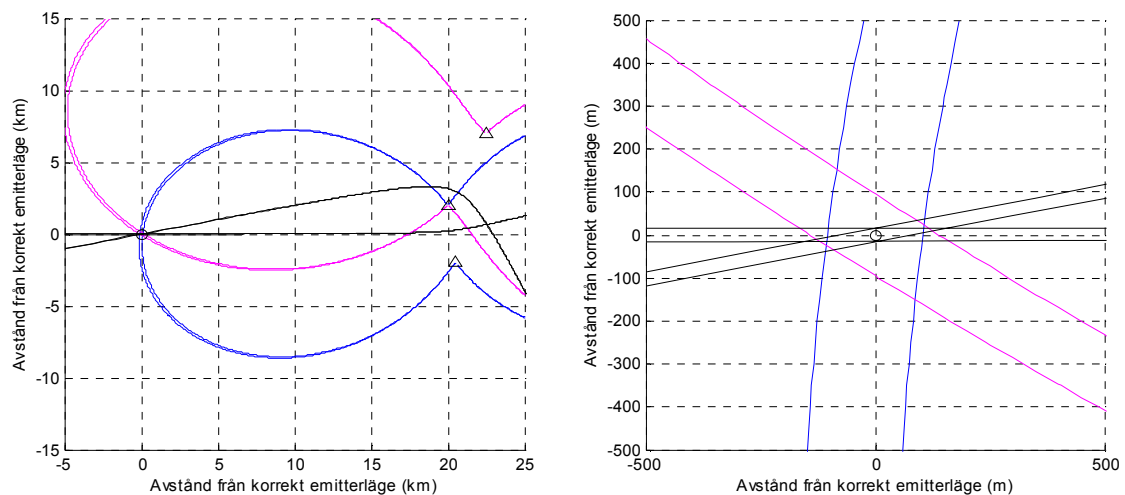
I det fundamentala fallet med två flygplan görs i varje plattform en ankomsttidsmätning och en frekvensmätning. Den förra mätningen måste gälla för samma del av vågformen från emittern – exempelvis en viss puls – och den senare mätningen måste ske samtidigt i de två flygplanen. Med hjälp av mätdata beräknas dels en tidsdifferens som ger en hyperbelgren och dels en frekvensdifferens som ger en isodopplerskillnadskurva (DDOA-båge). Skärningspunkterna mellan hyperbelgrenen och DDOA-bågen ger möjliga emitterlägen, se figur 7.11.

När endast två plattformar används har kombinationsmetoden ingen möjlighet att momentant skilja det verkliga emitterläget från eventuella falska. För att kunna reda ut vilket emitterläge som är riktigt kan en enkel riktningsbestämning med ett befintligt varnarsystem användas. Alternativt görs fler mätningar som i fallen med egen-triangulering eller DDOA, vilket också har fördelen att lägets noggrannhet blir bättre, men då handlar det inte längre om momentan lägesbestämning.



Figur 7.11 Kombination av TDOA och DDOA med två flygplan som rör sig rakt uppåt i figuren med en hastighet av 300 m/s. Skärningen mellan TDOA-hyperbelgrenen och DDOA-kurvan är ur noggrannhetssynpunkt näst intill optimal då den är nära 90°. Figuren bygger på en enda mätning av frekvens- respektive tidsdifferens. Felet i de ingående mätningarna är ± 10 ns i tidsdifferensen och ± 10 Hz i frekvensdifferensen. Emitters bärfrekvens är 10 GHz.

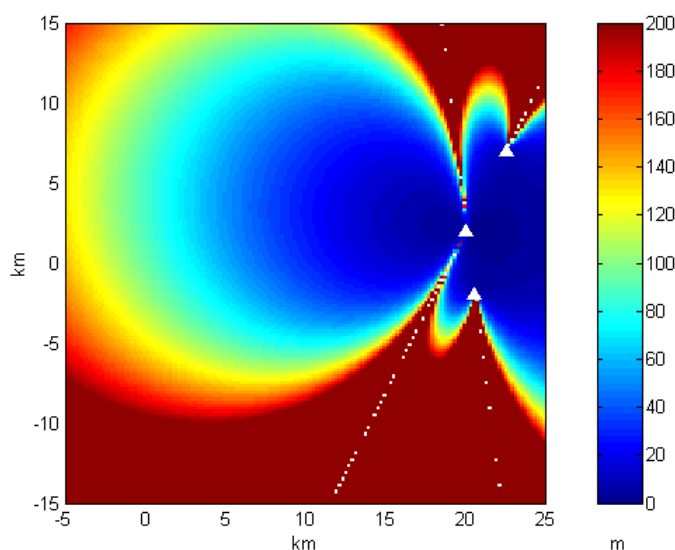
Används tre plattformar vid lägesbestämningen kan det räcka med enbart DDOA- eller TDOA-mätningar för att bestämma ett läge med god noggrannhet – men med risk för mångtydigheter och därmed alternativa emitterlägen. Att kombinera metoderna tillför då information som bland annat löser dessa mångtydigheter, se figur 7.12. Genom att använda en kombination av de båda metoderna ökar även robustheten då stora fel i tidsdifferenserna kan kompenseras av frekvensdifferenserna och tvärt om. Dylika fel kan exempelvis uppstå då den av emittern utsända vågformen passar den ena metoden bättre än den andra.



Figur 7.12 Kombination av TDOA och DDOA från tre flygplan som rör sig uppåt i figuren med en hastighet av 300 m/s. Hyperbelgrenarna från TDOA skär varandra i två områden men endast ett av dessa pekas ut av isodopplerskillnadskurvorna varför kombinationsmetoden i det aktuella scenariot är entydig. Felet i frekvensdifferensen är ± 10 Hz, bärfrekvensen är 10 GHz och tidsdifferensfelet i TDOA mätningen är ± 10 ns. Även här gäller att mätningen är momentan.

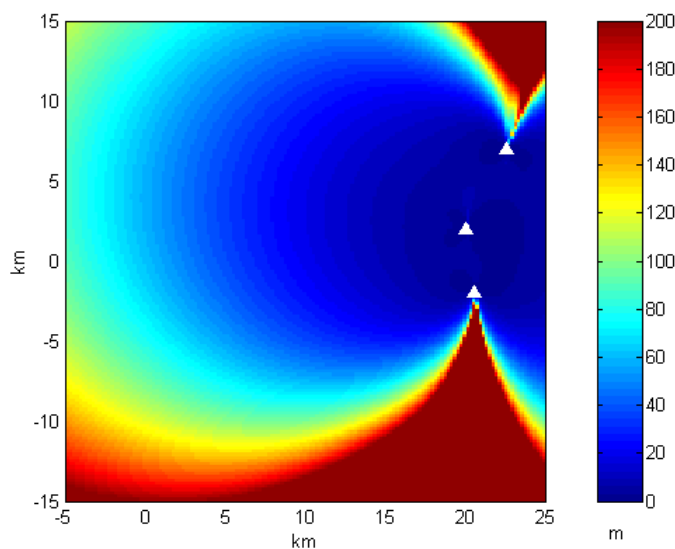
För att få en uppfattning av vad som är teoretiskt möjligt med kombinationen av TDOA och DDOA används Cramér-Rao-analys. Resultatet – som presenteras för enbart TDOA i figur 7.13 och kombinationen av tidsdifferens och dopplerdifferens i figur 7.14 – är en nedre gräns för den felspridning som är möjligt att åstadkomma. Som alltid gäller för Cramér-Rao-gränsen att det inte finns garantier för att en verklig implementation ger samma goda resultat – även om det kan vara möjligt. De ingående felet, som har beaktats vid beräkningar vilka ligger till grund för figurerna, är endast tids- och frekvensfel. Dessa är i ett praktiskt fall endast en delmängd av de fel som påverkar osäkerheten i lägesbestämningen.

Då kombinationen TDOA och DDOA medger momentan lägesbestämning – vilket är en följd av att tids- och frekvensdifferenser mellan flera inmätande flygplan beräknas – har de figurer som ingår i avsnittet beräknats med utgångspunkt från endast en mätning av frekvens respektive ankomsttid i varje flygplan. Därmed är det resulterande lägesfelet större än det som tidigare har presenteras för DDOA och som bygger på ungefär 400 mätningar av frekvens. Utnyttjas en längre tids mätningar i kombinationsmetoden TDOA/DDOA är förutsättningarna goda för att få ett emitterläge med hög noggrannhet.



Figur 7.13 Cramér-Rao-gräns för lägesfel med TDOA utförd med tre flygplan. Standardavvikelsen i felet i ankomstidsmätningarna är 5 ns. Det här är samma bild som figur 6.16 med skillnaden att färgskalan för felstorleken är annorlunda.

Jämförs den teoretiska noggrannheten från lägesbestämning med enbart TDOA som syns i figur 7.13 med noggrannheten från kombinationsmetoden – TDOA och DDOA – enligt figur 7.14 visar den senare en förbättring. Området med en felstorlek mindre än 200 m har ökat och osäkerhetsområdena kring mätbasernas förlängningar vid flygplanet i mitten har försvunnit.



Figur 7.14 Cramér-Rao-gräns för lägesfelet med en kombination av TDOA och DDOA. De tre inmätande flygplanen flyger med 300 m/s rakt uppåt i bilden och mäter var sin ankomsttid och mottagen frekvens. Mätningen av ankomsttid måste gälla för samma del av vågformen – exempelvis en viss puls – och mätningen av frekvens måste ske samtidigt i de tre flygplanen. Den insamlade informationen används sedan för lägesbestämning. Färgkodningen anger längden av den största halvaxeln på felellipserna som kan bildas i varje punkt. Standardavvikelse i de mätta värdena är för ankomsttiderna 5 ns och för frekvens 10 Hz. Emitterfrekvensen är 10 GHz.

Med tre flygplan som använder en kombination av TDOA och DDOA är det möjligt att utöver positionen även bestämma hastigheten momentant hos en rörlig emitter i planet. Ökas antalet inmätare till fyra borde såväl momentan läges- som hastighetsbestämning vara möjlig i rummet, vilket skulle kunna skapa en klarare omvärldsbild.

TDOA och DDOA från flygplan kan mycket väl kombineras med tids- och frekvensmätningar från markbaserade system. Med ett sådant koncept kommer – under förutsättning att kvaliteten på mätningarna är jämn – noggrannheten och säkerheten i lägesbestämningarna öka, eftersom sannolikheten ökar för att fler plattformar ser emittenterna samtidigt. Robustheten i systemet bör också öka då ett flertal mätbaser med olika riktningar samverkar för att ge en god täckning av det område man vill spana av.

För att ett multiplattformsbaserat system för lägesbestämning med tids- och dopplerdifferenser som bas ska fungera krävs att plattformarna kan kommunicera mätdata mellan varandra och att en gemensam uppfattning om tid – och därmed om frekvens – råder mellan dem.

Då det huvudsakliga syftet med radarsis-delen av projekt VMS Flyg har varit att undersöka metoder för att förbättra lägesbestämningsprestanda hos ett enskilt flygplan med radarsis-sensor, har multiplattformsmetoder såsom TDOA inte genomgått mer än en ytlig analys. Dessa metoder passar dock bra i ett NBF-koncept med fler samverkande plattformar.

8. Några prestandapåverkande faktorer

I det här kapitlet ges en genomgång av faktorer som inverkar på vilka prestanda som kan nås vid lägesbestämning av mikrovägsemittrar med hjälp av flygburen radarsis-utrustning. Genomgången är strukturerad för att täcka kedjan från emitter och signalmiljö till inmätaren och dess plattform men gör inte anspråk på att vara komplett. I varierande grad kommenteras inverkan från emitteregenskaperna, signalmiljön, radarsis-systemet och den inmätande plattformen. Dessutom beskrivs kort inverkan av länkförbindelsen vid samverkande flygplan.

8.1 *Emitteregenskaperna*

Emitterrörelsen

Lägesbestämning av rörliga emitter är ur olika aspekter annorlunda än lägesbestämning av emitter som är stationära under sis-systemets inmätningstid. Allmänt medför naturligtvis rörelsen att ett noggrant läge snabbt förlorar i aktualitet. Dessutom gäller speciella förutsättningar om lägesbestämningen baseras på enbart DDOA och de observerade dopplervariationerna är genererade av en kombination av rörelse hos den inmätande sis-antennen och en okänd rörelse hos emittern.

När en rörlig emitter lägesbestäms med DDOA och en modell används där emittern förutsätts vara stationär, kommer emitterhastigheten att förorsaka ett lägesfel. Storleken på detta lägesfel är detsamma som när samma hastighetsfel finns i uppfattningen om den inmätande sis-antennens rörelse.

Det senare felet kan reduceras genom att införa en accelerometer på den inmätande sis-antennen vilket berörs senare i detta kapitel. Det förra felet är svårare att hantera men eventuellt kan emittermodellen utvidgas så att lägesbestämningen även hanterar rörliga emitter. Om en enskild lägesbestämningsmetod används bör modellen dock begränsas så att endast enkla emitterrörelser, exempelvis konstant hastighetsvektor, behandlas.

Även med relativt låga emitterhastigheter bedöms felbidraget från emitterrörelsen kunna vara dominerande. Ett sätt att åtminstone bli medveten om att en genomförd lägesbestämning besväras av denna feltyp är att använda sis-systemets emitteridentifiering för att avgöra om den aktuella emittern kan sända samtidigt som förflyttning sker. Genom att värdera avvikelser mellan modellberäknade data och mätdata kan även algoritmen som lägesbestämmer – åtminstone i gynnsamma fall – ge ett visst underlag för bedömning om huruvida resultatet försämrats till följd av emitterrörelse.

När flera inmätande sis-system samverkar sker lägesbestämning av rörliga emitter med fördel genom att kombinera DDOA med exempelvis TDOA. Medger emittersns vågform både noggrann frekvensmätning och noggrann mätning av ankomsttid till respektive inmätande sis-system kan såväl emittersns läge som hastighet bestämmas.

En intressant fråga är huruvida antennrotation hos emittern kan generera en dopplermodulation som är besvärande vid DDOA. Avgörande för modulationens storlek är förutom rotationshastigheten hur väl antennens fascentrum överensstämmer med dess rotationscentrum. En likartad fråga är hur DDOA fungerar mot ett stillaliggande fartyg som rullar på grund av sjögång.

Emittersignaturen

Hos en radar är vågformen anpassad för att ge önskade mätegenskaper bland annat avseende entydighet och noggrannhet i avstånd och hastighet. Radar som vill mäta målets hastighet entydigt använder ofta hög PRF och koherent integration. Integrationstiden ligger vanligen i intervallet 1-10 ms. På grund av den höga pulsrepetitionsfrekvensen är många pulser samtidigt i luften vilket medför att vågformen ger mångtydig avståndsmätning om inte så kallad PRF-växling sker.

Konsekvensen för radarsis-systemet när radarn använder hög PRF är att lägesbestämning baserad på DDOA kan ge entydiga lägen medan TDOA i många fall ger mångtydigheter. Det omvända gäller vid låg PRF där radarn ger entydiga avstånd men mångtydiga hastigheter. Här har radarsis-system som använder TDOA inte några svårigheter att mäta entydig tidsskillnad medan DDOA-baserade metoder måste kunna hantera att dopplervariationen kan överstiga pulsrepetitionsfrekvensen.

Sammantaget kan konstateras att det är radarns val av vågform som avgör vilka prestanda radarsis-systemets lägesbestämning kan uppnå. Vågformen bestämmer dessutom vilken lägesbestämningsmetod som är bäst lämpad för tillfället. En ytterlighet är ren CW som är idealisk för DDOA men som inte kan hanteras av TDOA. Eftersom radarsis-system bör kunna hantera de flesta typer av emittersignaler är lägesbestämning som baseras på kombinationer av olika metoder att föredra.

Allmänt

Generellt gäller att en hög ekvivalent utsänd effekt hos en emitter bidrar positivt till att signal/brus-förhållandet blir högt vilket är gynnsamt för att hålla nere lägesfelet oavsett vilken metod radarsis-systemet använder för lägesbestämning. Vidare gäller allmänt – som tidigare har konstaterats – att en emitters sändningstid är avgörande för vilken noggrannhet som kan nås när endast en inmätare används.

8.2 Signalmiljön

En besvärlig signalmiljö kan försvåra lägesbestämningen, dels genom att upptäckten försenas, dels genom att inmätningen av de parametrar som lägesestimeringen utnyttjar blir sämre på grund av bristande separation eller dynamik. I täta signalmiljöer med många emitterar som ska lägesbestämmas kan även beräkningskapaciteten vara otillräcklig för att hantera samtliga parallellt. En bra prioriteringsförmåga är därför önskvärd. Styrande för prioriteringen kan vara klassificeringen och identifieringen tillsammans med den närliggande bedömningen av hotnivån. Prioriteringsfunktionen tar lämpligen även hänsyn till en eventuell grov indikation på emitterläget.

8.3 Vågutbredningen

Alla lägesbestämningsmetoder påverkas av vågutbredningen mellan emitterns och sis-systemets antenner. Dels sker inverkan genom att utbredningsdämpningen är en av de faktorer som avgör vilket signal/brus-förhållande som blir aktuellt vid sis-systemets inmätningar. Inverkan sker även genom att bland annat reflektioner distorderar de inparametrar som de olika lägesbestämningsmetoderna använder, exempelvis infallsriktning eller skillnad i ankomsttid.

Eftersom inparametrarna varierar med respektive lägesbestämningsmetod är en rimlig bedömning att inverkan är beroende av såväl aktuell vågutbredningssituation som använd lägesbestämningsmetod.

8.4 Radarsis-systemet

I det här avsnittet kommenteras hur några av radarsis-systemets delar inverkar på lägesbestämningens prestanda samt vilka krav olika lägesbestämningsmetoder medför på delsystemen.

Antenner

Det är vanligt att flygburna radarvarnare använder fyra antennelement med boresight-riktningarna centrerade i respektive kvadrant i vingplanet. Såväl DDOA, långbasinterferometri som TDOA kan införas på ett flygplan utan att modifiera denna antennlösning. Jämfört med de antennkonfigurationer som krävs för att åstadkomma entydig interferometri är den klassiska antennkonfigurationens enkelhet definitivt en av de stora fördelarna med lägesbestämningsmetoderna DDOA, LBI och TDOA.

Studeras vilka antennvinster som är aktuella vid olika metoder gäller förutsättningen att DDOA momentant endast kräver signal från en antenn varför den med för tillfället bäst inriktning kan utnyttjas. Samma sak gäller när TDOA används genom samverkan mellan flera flygplan. Med den klassiska antennlösningen som beskrivs ovan innebär det att infall i vingplanet alltid är inom en 90°-sektor runt boresight för någon av de fyra antennerna. Denna sektorstorlek motsvarar normalt ungefär antennens lobbredd.

Vid långbasinterferometri används två antenner och med klassisk antennkonfiguration är den ena antennen – på grund av de två antennernas inbördes vridning – alltid belyst i intervallet 45-90° från boresight när emittern återfinns i vingplanet. Sker lägesbestämning med långbasinterferometri kan det dessutom vara lockande att använda två ortogonala antennpar. Vinsten är framförallt att de resulterande felellipseernas orientering är olika varför en sammanvägning minskar felet enligt beskrivningen i tidigare kapitel. (Denna synergi kan i vissa fall även nås med kombinationen DDOA/LBI.)

Långbasinterferometri använder minst tre antenner för att åstadkomma två mätbaser. Med ovanstående antenninriktningar innebär detta att två av antennerna är diametralt riktade varför den sektor där antennvinsten hos alla tre antennerna är anständig kan förväntas vara ganska begränsad.

Eventuellt bristande matchning mellan mottagarantennernas och det belysande fältets polarisationer reducerar signal/brus-förhållandet och påverkar därför lägesbestämningens prestanda oavsett vilken metod som används. Dessutom är bristande polarisationsmatchning en felkälla vid lägesbestämningsmetoder som baseras på jämförelser av signaler från flera antenner på grund av att dessa är sämre matchade när polarisationen avviker från den nominella. Som konsekvens av detta försämrar exempelvis noggrannheten vid långbasinterferometri när radarsis-systemet lägesbestämmer en emitter som har varierande polarisation. En anledning till att den infallande vågens polarisation varierar kan vara att radarns sidlobber utnyttjas.

En tänkbar utveckling är att framtida flygburna radarsis- och radarvarnarsystem använder bredbandiga gruppantenner med elektriskt styrda lobber. Antennernas riktverkan ökar systemkänsligheten och för ett givet emitteravstånd erhålls en förbättring i signal/brusförhållande och därmed potential för ökad lägesnoggrannhet. Olägenheten med bristande polarisationsmatchning kvarstår dock.

Mottagaren och signalbehandlingen

Mottagaren är den del i sis-utrustningen som kommer närmast efter antennerna. Dess uppgift är att upptäcka nya signaler samt att mäta in parametrar för dessa och tidigare

upptäckta signaler. Inmätningen ska ske på ett sätt som ger den önskvärda noggrannheten även vid närvaro av brus och andra signaler vilket exempelvis ställer krav på mottagarens känslighet, dynamik och separation. En mer utförlig beskrivning av sis-mottagare finns i Bergdal m.fl. [4] och Bergdal m.fl. [5].

En flygburen radarvarnare bör ha goda upptäcktsegenskaper vilket normalt uppnås genom stor momentan täckning i såväl vinkel som frekvens. En funktion för noggrann lägesbestämning kan av resursskäl sannolikt inte användas för alla signaler som mottagaren hanterar. Av denna anledning är det aktuellt att realisera lägesbestämningen som en smalbandig funktion som in visas av den bredbandiga konventionella radarvarnardelen.

Ett etablerat sätt att selektera ut ett smalt frekvensområde för vidare signalbehandling är att utföra nedtransponering och filtrering i en så kallad superheterodyn mottagare. De lokaloscillator/klock-signaler som denna mottagartyp använder vid nedblandning och digitalisering skapas ur någon form av referenssignal. För att möjliggöra den noggranna frekvensmätning som önskas för bland annat DDOA måste ett antal villkor vara uppfyllda. Bland annat krävs att referensoscillatorn är väl specificerad så att dess frekvens är noggrann och stabil oavsett de förhållanden som gäller i omgivningen. Vidare måste de med hjälp av referensoscillatorn skapade lokal- och klocksignalerna också vara i hög grad noggranna och stabila. Ett exempel på hur skiftande g-belastning kan påverka en oscillator kan ses i Andersson m.fl. [1].

De höga krav på frekvensnoggrannhet som DDOA ställer förutsätter i praktiken även att frekvensmätningen utförs med digitala signalbehandlingsmetoder. Olika signalmodulationer kräver sannolikt olika angreppssätt avseende frekvensmätning då det förmodligen inte finns någon generell metod som klarar av exempelvis både CW och LIFMOP⁵-signaler. Det kan därför vara lämpligt att någon form av modulationsklassificering sker innan noggrann mätning av frekvens utförs.

De metoder för emitterlokalisering som behandlas i rapporten ställer olika krav på antalet mottagarkanaler. Används TDOA eller dopplerbaserade metoder finns det i princip inte behov av fler kanaler än en per flygplan. Vid interferometri jämförs fasen hos signal mottagen i minst två antenner varför mottagaren måste vara flerkanalig. De olika kanalerna i mottagaren bör dessutom ha samma faspåverkan på signalen, det vill säga vara fasmatchade. Det sistnämnda påverkar inte bara mottagaren utan även kablaget mellan antenner och mottagare. LBI kräver liksom interferometri fler mottagarkanaler men kravet på fasmatchning är mindre då metoden inte påverkas av fasoffset mellan kanalerna.

Biblioteksaspekter

Som tidigare har berörts i detta kapitel är emitteregenskaperna en av de faktorer som påverkar lägesbestämningens prestanda. I signalspaningssystemets emitterbibliotek kan det vara lämpligt att införa information om vilken lägesbestämningss metod som i första hand bör användas mot respektive emittertyp eller emittermod. Även bibliotekets uppgifter om hotnivåer kan användas om det finns behov av att prioritera vilka inmätta emitterar som ska lägesbestämmas med resurskrävande metoder.

De krav DDOA-metoden ställer på radarsis-systemets frekvensmätning ökar möjligheterna att identifiera emitterar av samma typ som olika individer. Detta framgår bland

⁵ Linear Frequency Modulation On Pulse

annat i beskrivningar av systemet PLAID från USA där förkortningen ska uttydas *Precision Location And IDentification*. För att införa den funktionaliteten krävs att emitterbiblioteket beskriver parametrarna bärvågsfrekvens och/eller pulsrepetitionsfrekvens med god upplösning samt att biblioteket har kapacitet för att hantera olika individer separat. Ett alternativ kan vara att överlämna individbestämningen till den analys som sker på marken efter genomfört flygpass.

8.5 Den inmätande plattformen

Även den inmätande plattformens egenskaper inverkar på olika sätt på lägesbestämningens prestanda. Vid all radarsis-baserad lägesbestämning med enskilda flygplan är förmågan att färdas med hög hastighet av stor betydelse för att snabbt generera en geometrisk mätbas. Används lägesbestämning med DDOA är även hög egen hastighet och manövrering gynnsam för att generera stora dopplervariationer vilket ökar lägesnoggrannheten.

Andra parametrar hos den inmätande plattformen som inverkar på lägesbestämningens prestanda är bland annat:

- Navigeringssystemets noggrannhet och uppdateringstakt
- Strukturstabiliteten
- Tidsreferensens noggrannhet
- Skuggeffekter i plattformens närvaro
- Andra system på plattformen

Navigeringssystemets noggrannhet avser alltid position samt – beroende på använd lägesbestämningssmetod – eventuellt även attityd eller hastighet. Samtliga är tredimensionella storheter.

Som exempel på krav på navigeringssystemet och tidsreferensen kan nämnas att DARPA⁶ strävar mot att plattformarna som ingår i det framtida TDOA/DDOA-baserade radarsis-systemet AT3 ska få en noggrannhet av 3 m avseende position och 0,03 m/s vad gäller hastighet. För osäkerheten i egen tidsuppfattning anges 5 ns.

Reduktion av plattformens inverkan vid DDOA

Vid lägesbestämning baserad på DDOA är antennens rörelse en parameter som påverkar noggrannheten. Likaså inverkar hur väl denna rörelse är känd. Eftersom antennen i många fall är placerad i vingspetsen där strukturrörelser kan vara påtagliga ger inte ett centralt placerat GPS/INS⁷-system den kompletta bilden.

I Wu och Fowler [14] ges en genomlysning av problematiken och dessutom föreslås ett antal alternativa lösningar. Av artikeln framgår att osäkerheten i antenntpositionen på grund av strukturrörelser endast marginellt påverkar felet i det estimerade emitterläget. Antennens positionsfel bedöms högst vara i storleksordningen 0,01 % av emitteravståndet och som högst 10 % av noggrannheten hos GPS/INS-systemet.

Däremot kan den okända antennt rörelsen ske med hastigheter som är cirka 1 % av plattformens hastighet (några m/s) och som når 10000 % av noggrannheten hos GPS/INS-systemet. I artikeln hänvisas till en analys som visar att vinsten med att

⁶ Defense Advanced Research Projects Agency

⁷ Inertial Navigation System

reducera hastighetsosäkerheten är i storleksordningen 100 gånger större än motsvarande reduktion av osäkerheten i antenntpositionen.

Wu och Fowler föreslår en lösning som bland annat inkluderar att förse antennen med en lokal accelerometer vilket är möjligt med MEMS⁸-teknik. Den resulterande hastighetsosäkerheten hos antennen kan reduceras med 60 dB vilket medför att denna osäkerhet inte bidrar till att försämra noggrannheten i lägesbestämningen av emittern.

I den aktuella artikeln berörs ej att noggrannheten i frekvensmätningen påverkas av de varierande g-krafter som belastar mottagarens oscillatorer. En rimlig slutsats kan vara att en lokalt placerad, MEMS-baserad, accelerometer även här kan bidra till att öka noggrannheten genom att den skapar möjlighet att införa korrektion i frekvensmätningen för den g-påverkan som vid mättillfället gäller.

8.6 Länkförbindelserna

Med lägesbestämningsmetoder som utnyttjar samverkan mellan flygplan kan i många fall den nödvändiga länkförbindelsen vara en begränsande faktor. Eftersom inriktningen inom VMS Flyg avseende lägesbestämning av emittrar har fokuserat på förmåga hos enskilda flygplan har inga insatser som relaterar till länkproblematiken genomförts.

Som ett mindre försteg inför VMS NBF där flera inmätande flygplan blir aktuella har dock ett antal artiklar som berör datakompression på länkar för lägesbestämning av emittrar identifierats.

Inom andra delprojekt i VMS Flyg har dessutom framgångsrik verksamhet inom bredbandiga aktiva gruppantennor genomförts. Verksamheten har primärt fokuserat på störtillämpningar men kunskapen är av stor vikt även inom området multifunktionsantennor – MFA. Denna MFA-utveckling är bland annat av stor betydelse för att framtida flygburna sis-system ska kunna erbjudas länkförbindelser med hög kapacitet baserade på riktbara antennlobor.

⁸ MicroElectroMechanical Systems

9. Sammanfattning och slutsatser

Den tidigare genomgången visar att det finns flera alternativa vägar att förbättra lägesbestämningsfunktionen hos flygburna radarvarnare och radarsis-system.

Med interferometri kan riktningsnoggrannheter i storleksordningen 1° realiseras. Sker lägesbestämningen med triangulering förbättras prestanda påtagligt jämfört med konventionella system som riktningsbestämmer med amplitudmonopuls. Nackdelen är en högre kostnad genom att komplexiteten ökar på såväl antenn- som mottagarsidan.

Accepteras ytterligare högre komplexitet kan interferometri användas för riktningsmätning i två dimensioner. Härigenom finns möjligheten att via vertikal triangulering momentant lägesbestämma mark- och ytbaserade emitterar från ett enskilt flygplan. En ytterligare fördel med noggrann riktningsbestämning i en eller två dimensioner är att varnarens eller sis-systemets pulssortering ges gynnsamma förutsättningar att fungera robust även i täta signalmiljöer. En emitter har inte möjlighet att manipulera infallsriktningen till skillnad mot övriga parametrar som kan varieras från puls till puls.

För precisionsinmätning av emitterlägen på relativt stora avstånd är triangulering baserad på interferometri med korta mätbaser otillräcklig. TDOA, DDOA och långbasinterferometri är metoder som alla har potential att i många fall lägesbestämma emitterar med en noggrannhet som är i storleksordningen en magnitud bättre än vad som kan åstadkommas med triangulering baserad på interferometri.

Det finns stora fördelar med att kombinera flera av metoderna. Såväl TDOA som DDOA och långbasinterferometri kan enskilt ge mångtydigheter i lägesbestämningen. Tillsammans, och i kombination med riktningsmätning, är förutsättningarna för entydighet betydligt större. Även prestanda i termer av snabbhet och noggrannhet förbättras när flera metoder kombineras. Anledningen är bland annat att metoderna var för sig ger lägesosäkerheter som har olika orientering, vilket innebär att felområdet i många fall kan minskas väsentligt om metoderna utnyttjas tillsammans. En annan anledning är att respektive metods prestanda i hög grad påverkas av signalens vågform. TDOA är oanvändbart vid vissa signaler där DDOA fungerar mycket bra, och vice versa. I grunden beror detta på om radarns vågform är anpassad för att ge bra avstånds- eller hastighetsmätning.

Det finns anledning att sträva mot att varje enskilt flygplan ska ges förmåga att snabbt lägesbestämma emitterar med god noggrannhet. För att möta de korta sändningstider som kan vara aktuella när exempelvis LV-system konfronteras ger dock samverkan mellan flera inmätande flygplan eller UAV:er potentiella fördelar. Detta är även i linje med Försvarens inriktning mot ett nätverksbaserat försvar.

I grunden är det enskilda radarvarnarens och signalspaningssystemets oförmåga att momentant mäta avståndet till en emitter som begränsar ett enskilt flygplans möjligheter att snabbt genomföra noggranna lägesbestämningar. Undantaget är komplexa system med noggrann tvådimensionell riktningsmätning som med hjälp av vertikal triangulering och en terrängdatabas kan peka ut markbaserade emitterar. Den yta inom vilken hög noggrannhet kan nås är dock i hög grad beroende av aktuell flyghöjd. Yttäckningen hos denna typ av system är därför relativt begränsad.

De prestandafördelar som hägrar när flera inmätande flygplan samverkar motiverar att framtida insatser inriktas mot att bearbeta frågeställningar som förknippas med denna typ av lägesbestämning. Vilka möjligheter finns exempelvis att med separerade flygplan

kunna verka med en gemensam tids- och frekvensreferens? Vilka krav ställs på länkförbindelsen mellan inmätarna?

Sammantaget bedöms enskilda flygplan – som utnyttjar lämpliga kombinationer av DDOA, långbasinterferometri och riktningsmätning – på i storleksordningen 10-20 sekunder i många fall kunna lägesbestämma emitterar med en noggrannhet som medger insats med precisionsvapen. Om denna förmåga ska nås snabbare bör samverkan mellan flera geografiskt spridda flygplan vara ett naturligt alternativ. Med en begränsad momentan yttäckning kan vertikal triangulering från ett enskilt flygplan erbjuda likartade prestanda. Detta förutsätter dock tvådimensionell riktningsmätning med hög kvalitet.

10. Referenser

- [1] Andersson Börje, Henriksson Daniel, Lindgren Björn, "Flygburen passiv lägesbestämning baserad på noggrann frekvensmätning", FOI-R--0329--SE, december 2001.
- [2] Ternblad Sten, "SEAD i ett operativt sammanhang – internationella erfarenheter", bilaga till delrapport 2 i studie FTK02218S "SEAD/DEAD förmåga hos luftstridskrafterna", FTK 21 120: 714 08.
- [3] Dahlin Raoul, "Noggrann estimering av frekvensen hos en pulsmodulerad sinussignal i brus", FOA-R--98-00724--SE, januari 1998.
- [4] Bergdal Hans, Andersson Börje, Gustavsson Rolf, Nagy Peter, Oscarsson Fredrik, "Signalspaningsteknik del 1, Grunder samt radiosignalspaning", FOI, 2001.
- [5] Bergdal Hans, Andersson Börje, Lindgren Björn, "Signalspaningsteknik del 2, Radarsignalspaning", FOI, 2002.
- [6] Schleher D. Curtis, "Electronic Warfare in the Information Age", Artech House, 1999, ISBN 0-89006-526-8.
- [7] Barton David K., "Radar System Analysis", Artech House, 1985, ISBN 0-89006-043-6.
- [8] Vaccaro Dennis D., "Electronic warfare receiving systems", Artech House, 1993, ISBN 0-89006-543-8.
- [9] Wiley Richard G., "Electronic Intelligence: The Analysis of Radar Signals", Artech House, 1993, ISBN 0-89006-592-6.
- [10] Becker Klaus, "Passive Localization of Frequency-Agile Radars from Angle and Frequency Measurements", IEEE. Transactions on Aerospace and Electronic System, vol. 35, No. 4, October 1999.
- [11] Becker Klaus, "An Efficient Method of Passive Emitter Location", IEEE. Transactions on Aerospace and Electronic System, vol. 28, No. 4, October 1992.
- [12] Kaplan Albert, "Passive Ranging Method and Apparatus", United States Patent No. 4734702, Mar 29 1988.
- [13] Fowler Mark L., "Air To Air Passive Location System", United States Patent No. 5870056, Feb 9 1999.
- [14] Wu N. Eva & Fowler Mark L., "Application of MEMS for Improved Emitter Location Accuracy", IEEE International Conference on Sensors, Orlando, FL, Jun 12-14 2002, sida 843-848

Bilaga A - Beskrivning av använda typfall

I följande avsnitt ges en beskrivning av de typfall som förekommer i delar av rapporten. Tyngdpunkten ligger på beskrivning av geometriska förhållanden mellan emitter och sisplattform.

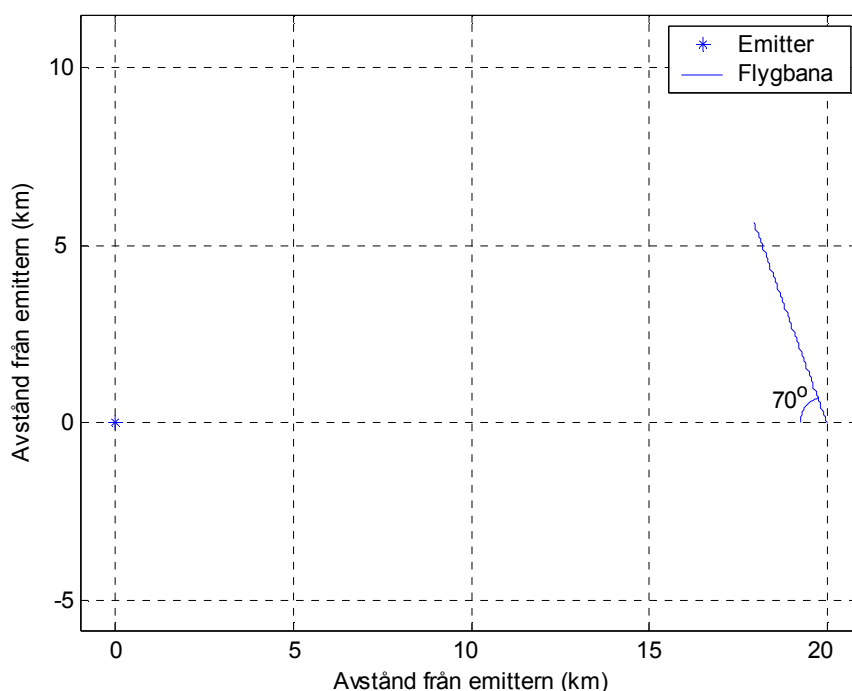
1. Allmänt

Typfallen är konstruerade för att kunna användas i en testbänk som tagits fram i projektet. De tre ursprungliga fallen var Rakbana, Frånböj 2G och Motböj 2G. Dessa tre beteckningar avser flygbanor i ett horisontalplan där emittern också antas befinna sig. Samtliga dessa flygbanor genomflygs med en till beloppet konstant hastighet (300 m/s). För Motböj 2G och Frånböj 2G gäller att respektive flygbana är cirkulär med en radie som är anpassad till det konstanta hastighetsbeloppet så att accelerationen blir 2G. Vid Motböj 2G befinner sig emittern på samma sida om flygbanan som cirkelcentrum och vid Frånböj 2G på andra sidan. Samtliga dessa typfall bedöms vara relevanta situationer och anses därför intressanta.

Utöver de tre första fallen har dessutom typfallet Rakbana med roll tillkommit. Syftet med detta fall var att studera effekten av kortvariga stora dopplervariationer.

Syftet med typfallen var att studera vilka prestanda som kan erhållas vid lägesbestämning med DDOA. Att de sedan har använts även för LBI beror mest på att det varit intressant att jämföra resultaten mellan de båda metoderna. För en utförlig beskrivning av prestandamöjligheterna vid DDOA för de olika typfallen hänvisas till Andersson m.fl. [1].

Utöver de rent geometriska variablerna finns ytterligare några parametrar som måste bestämmas för att simuleringar ska kunna genomföras. Till dessa hör bland annat emitterfrekvensen och noggrannheten med vilken den mäts. Frekvensnoggrannheten kan förändras dels genom att signal/brus-förhållandet varieras och dels genom att ett värde på standardavvikelsen hos frekvensmätningarna ansätts.



Figur A.1 Beskrivning av det geometriska förhållandet mellan plattform och emitter i typfallet Rakbana.

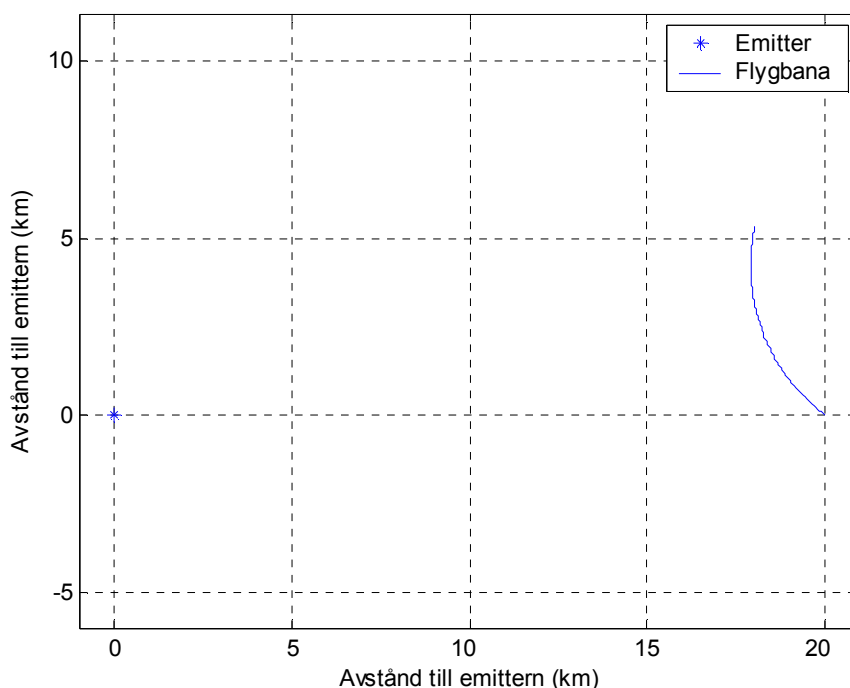
2. Rakbana

Det sis-försedda flygplanet flyger i detta fall en ren rakbana i 20 sekunder med hastigheten 300 m/s vilket ger 6 km mätsträcka. Emittern befinner sig på en position som är 20 km från flygbanans startpunkt. I denna punkt är vinkeln mellan hastighetsvektorn och riktningen till emittern 70 grader. I figur A.1 återfinns en grafisk beskrivning av typfallets geometriska förhållanden.

3. Frånböj 2G

Emitterpositionen och flygplanets startpunkt är identiska med vad som gäller i föregående fall men här flyger plattformen medurs på en cirkelbåge med radien 5,3 km, vilket ger belastningen 2G vid hastigheten 300 m/s – samma som för Rakbana.

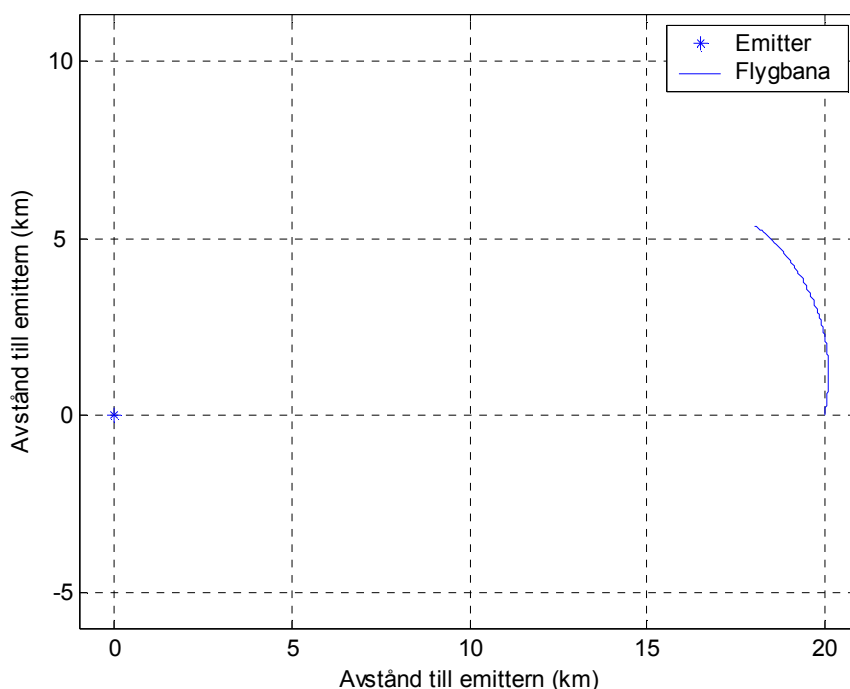
Aktuell hastighet motsvarar en ”omloppstid” av knappt 111 sekunder, varför hastighetsvektorn under simuleringstiden – 20 sekunder – vrider cirka 65°. Flygbanan är placerad så att start- och slutpunkt ligger på den rakbana som beskrevs tidigare, vilket innebär att hastighetsvektorn efter halva flygningen är parallell med rakbanan. Notera att flygbanans längd är 6 km, men att flygbanans slutpunkt ligger ca 5,7 km från startpunkten om kortaste avståndet mäts. Följden blir alltså att mätbasen är något kortare än i fallet Rakbana. Geometrin beskrivs i figur A.2.



Figur A.2 Beskrivning av det geometriska förhållandet mellan plattform och emitter i typfallet Frånböj 2G.

4. Motböj 2G

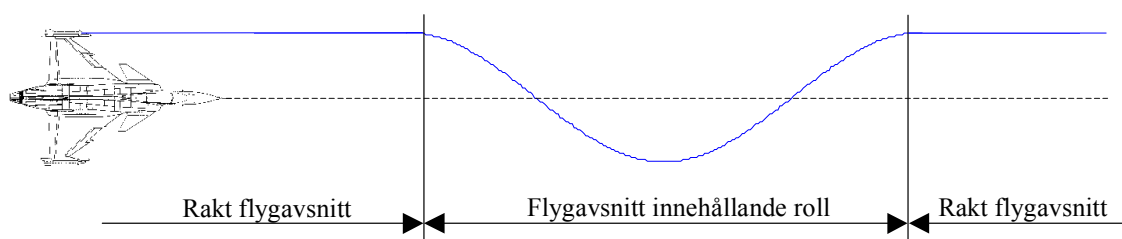
Emitterposition, hastighet, G-belastning och flygplanets start- och slutpunkt är identisk med vad som gäller i Frånböj 2G, men här flyger flygplanet istället moturs på en cirkelbåge enligt figur A.3.



Figur A.3 Beskrivning av det geometriska förhållandet mellan plattform och emitter i typfallet Motböj 2G.

5. Rakbana med roll

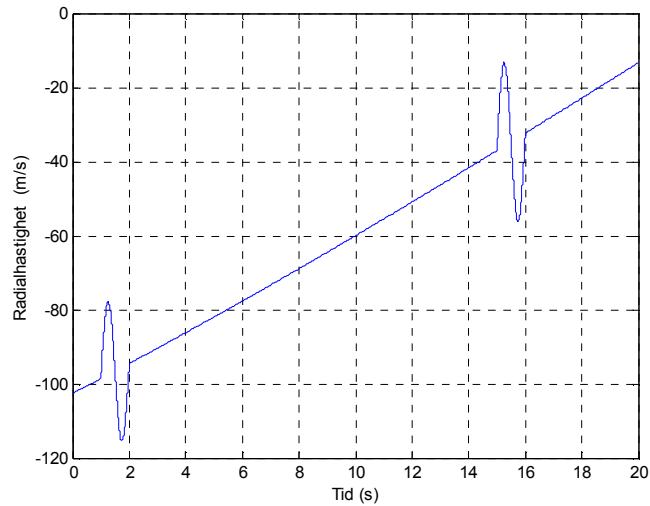
Geometrin i flygfallet Rakbana med roll är identiskt med geometrin i Rakbana. Det som skiljer dessa båda fall åt är att flygplanet i Rakbana med roll genomför två separata hel-roller under flygningen. Antennen är placerad 3,78 meter ut från rotationscentrum och får till följd av rollrörelsen en kraftig vektoriell hastighetsvariation. Notera att antennens rörelse i rollen är beräknad i tre dimensioner och därefter är projicerad till en tvådimensionell geometri. Figur A.4 visar principutseendet för Rakbana med roll i en liten omgivning kring en av rollarna. Notera att antennen, som placerats i ena vingen, till följd av rollen beskriver en period i en cosinuskurva då det tvådimensionella fallet studeras.



Figur A.4 Illustration av antennens rörelse till följd av rollen under typfallet Rakbana med roll. Den blå kurvan motsvarar antennens rörelsebana. Notera att figuren är en principbild och att de geometriska proportionerna inte är korrekta. Typfallet Rakbana med roll innehåller två separata hel-roller. Den första påbörjas efter 1 sekunds flygtid och den andra efter 15 sekunders flygtid. Båda pågår i vardera en sekund. Partierna före, mellan och efter rollarna utgörs av en rak flygbana.

Figur A.5 visar relativa hastigheten mellan emitter och antenn, det vill säga den hastighetskomponent som ger upphov till dopplervariationerna.

Den första rollen påbörjas efter 1 sekund och den andra efter 15 sekunder. Båda dessa pågår i 1 sekund vardera. Flygplanet rollar med en konstant vinkelhastighet. Ingången och utgången ur rollen är något ofysikalisk eftersom den sker momentant. Syftet med typfallet är dock att ge en bild av vilken prestandaförbättring som erhålls i typfall som innehåller kortvariga men stora dopplervariationer. Eftersom likheten med typfallet Rakbana är stor kan de förändringar i prestanda som erhålls direkt knytas till dopplervariationerna som introduceras av de två hel-rollarna.



Figur A.5 Figuren visar den relativa hastigheten mellan sis-systemets antenn och emittern, det vill säga den hastighetskomponent som bestämmer dopplerfrekvensens storlek. De två kraftiga hastighetsvariationerna är en effekt av att flygplanet rollar.