



Jan Kjellgren

## SAR/GMTI – detektering av rörliga markmål

TOTALFÖRSVARETS FORSKNING SINSTITUT

Sensorteknik

Box 1165

581 11 Linköping

FOI-R--0973--SE

Oktober 2003

ISSN 1650-1942

**Underlagsrapport**

Jan Kjellgren

## SAR/GMTI - detektering av rörliga markmål

<b>Utgivare</b> Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Sensorteknik Box 1165 581 11 Linköping	<b>Rapportnummer, ISRN</b> FOI-R--0973--SE	<b>Klassificering</b> Underlagsrapport
	<b>Forskningsområde</b> 4. Spaning och ledning	
	<b>Månad, år</b> Oktober	<b>Projektnummer</b> E7779, E3029, E3048
	<b>Verksamhetsgren</b> 5. Uppdragsfinansierad verksamhet	
	<b>Delområde</b> 41 Ledning med samband och telekom och IT-system	
<b>Författare/redaktör</b> Jan Kjellgren	<b>Projektledare</b> Fredrik Lantz, Lars Ulander, Mats Pettersson	
	<b>Godkänd av</b>	
	<b>Uppdragsgivare/kundbeteckning</b>	
	<b>Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig</b> Jan Kjellgren	
<b>Rapportens titel</b> SAR/GMTI - detektering av rörliga markmål		
<b>Sammanfattning (högst 200 ord)</b> <p>Detta arbete utgör ett underlag för modellering av radarfunktionen vid simulering av överordnade system. Det berör speciellt monostatisk syntetisk aperturradar, SAR, som arbetar i moden "Ground moving target indication" (GMTI-mod).</p> <p>I arbetet ges en kort introduktion till flygburen MTI och då speciellt SAR med DPCA (Displaced Phase Centre Antennas) och vidare görs uppskattningar av maximal koherenstid begränsad av den linjära rörelsen eller rotationen hos ett mål. Därutöver ges aspekter på användningsmoder och approximativa uttryck avseende vissa av mätgeometrin begränsade prestandaparametrar.</p> <p>Arbetet är i huvudsak finansierat av FMV-projektet NFFP3-427 (E7779).</p>		
<b>Nyckelord</b> GMTI, DPCA, målrörelse, koherenstid, prestanda		
<b>Övriga bibliografiska uppgifter</b>	<b>Språk</b> Svenska	
<b>ISSN</b> 1650-1942	<b>Antal sidor:</b> 38 s.	
<b>Distribution enligt missiv</b>	<b>Pris:</b> Enligt prislista	

<b>Issuing organization</b> FOI – Swedish Defence Research Agency Sensor Technology P.O. Box 1165 SE-581 11 Linköping	<b>Report number, ISRN</b> FOI-R--0973--SE	<b>Report type</b> Base data report
	<b>Programme Areas</b> 4. C4ISR	
	<b>Month year</b> October 2003	<b>Project no.</b> E7779, E3029, E3048
	<b>General Research Areas</b> 5. Commissioned Research	
	<b>Subcategories</b> 41 C4I	
<b>Author/s (editor/s)</b> Jan Kjellgren	<b>Project manager</b> Fredrik Lantz, Lars Ulander, Mats Pettersson	
	<b>Approved by</b>	
	<b>Sponsoring agency</b>	
	<b>Scientifically and technically responsible</b> Jan Kjellgren	
<b>Report title (In translation)</b> SAR/GMTI - ground moving target indication		
<b>Abstract (not more than 200 words)</b> <p>The aim of this study is to support the modelling of the radar function when simulating systems at higher levels. Especially it deals with monostatic synthetic aperture radar for "Ground Moving Target Indication" (GMTI).</p> <p>The study comprises a short introduction to airborne MTI and especially SAR with DPCA (Displaced Phase Centre Antennas) and further there are some estimations regarding the maximum coherency time when limited by linear and rotational movements of a target. Also there are some aspects on application modes and approximate expressions for some performance parameters limited by the measurement geometry.</p> <p>The financial source has mainly been the project NFFP-427 (E7779) from the Swedish Defence Materiel Administration.</p>		
<b>Keywords</b> GMTI, DPCA, target movements, coherency time, performance		
<b>Further bibliographic information</b>	<b>Language</b> Swedish	
<b>ISSN</b> 1650-1942	<b>Pages</b> 38 p.	
	<b>Price acc. to pricelist</b>	

## Innehållsförteckning

1.	Sammanfattning	5
2.	Radar mot markmål	6
3.	Kort beskrivning av DPCA för SAR-GMTI	8
4.	Översiktligt om signalbehandling	10
5.	Fokusering av rörliga mål	12
6.	Användningsmoder för SAR	20
7.	Uppskattning av vissa parametrar för SAR/GMTI	24
8.	Koherenstid för SAR mot rörliga markmål	31
9.	Resultat	37
10.	Referenser	38

## 1. Sammanfattning

Detta arbete utgör ett underlag för modellering av radarfunktionen vid simulering av överordnade system. Det berör speciellt monostatisk syntetisk aperturradar, SAR, som arbetar i moden "Ground moving target indication" (GMTI-mod). Arbetet är i huvudsak finansierat av FMV-projektet NFFP3-427. Detta projekt är i sin tur ett samarbete mellan Saab Aerospace och FOI rörande spaning och följning av fordon där FOI:s del betecknas som uppdrag E 7779. En viss del av arbetet, avsnitt 8, är dock utförda inom projekten "Signalbehandling för SAR och GMTI" E3029 och "Avancerade målsökarsystem och koordinatstyrning" E3048.

I arbetet ges en kort introduktion till flygburen MTI och då speciellt SAR med DPCA (Displaced Phase Centre Antennas) och vidare görs uppskattningar av maximal koherenstid begränsad av den linjära rörelsen eller rotationen hos ett mål. Därutöver ges aspekter på användningsmoder och approximativa uttryck avseende vissa av mätgeometrin begränsade prestandaparametrar.

## 2. Radar mot markmål

Målinmätning med radar bygger allmänt på en viss kännedom om förväntade mottagna radarreflexers egenskaper. Denna information a priori omfattar normalt en mer eller mindre grov statistisk beskrivning av aktuella målklassers och målomgivningars radarmålareor eller spridningsmatriser (polarimetrisk radar). Denna kännedom är bl. a. en förutsättning för att konstruera ett för en viss tillämpning lämpligt radarsystem. Det kan röra parametrar och funktioner som: utsänd effekt, våglängd, vågform, antenssystem, signalbehandling och informationsextraktion.

Att mäta in mål i markomgivning är komplicerat av flera skäl. En markbaserad radar ger ofta otillräcklig räckvidd beroende på att mål skymms av terränghöjder och vegetation. En flygburen radar erbjuder bättre insyn i målområdet och ger därmed större observationsavstånd och yttäckning. På större avstånd försämras emellertid upplösningen tvärs observationsriktningen. Det betyder att en s. k. upplösningcell domineras av reflexer från omgivningen. För att upptäcka ett mål fordras därmed att detta är väsentligt starkare än omgivningen dvs. har en betydligt högre specifik radarmålarea.

En metod att kringgå detta problem är att dimensionera radarsystemet för att arbeta i syntetisk aperturradar-mod eller SAR-mod. Det innebär att man under flygbanan bygger upp en syntetisk apertur som är så lång att den ger en tvärsupplösning som är lika med eller bättre än målets dimensioner. SAR-metoden finns kort beskriven i kapitel 21 i [1] medan en mer utförlig behandling ges i bl. a [2] och [3]. I det fall ett mål kan upplösas i många celler kan även mål som har mindre specifik radarmålarea upptäckas genom sin kontrast. Man kan också utöver radarreflexerna utnyttja radarskuggan från målet både för upptäckt och identifiering. Det är t. o. m. möjligt att upptäcka mål som har samma genomsnittliga specifika radarmålarea om den statistiska spridningsskillnaden ger tillräcklig kontrast.

Ett fast mål som observeras från en fast koherent radar ger upphov till en och samma signal från puls till puls medan ett rörligt mål ger upphov till en liten förändring mellan dessa, en dopplerförskjutning som beror på målets närmandehastighet. Detta förhållande kan utnyttjas för att undertrycka fasta objekt och framhäva rörliga. I ett fast radarsystem betecknas denna metod "Moving Target Indicator" eller MTI. I en markfast radar kommer reflexer från normal målomgivning att uppvisa små dopplerförskjutningar härrörande t ex från rörelser i vegetation. Det betyder att rörliga mål vanligen är lätta att upptäcka då de uppträder i klotterfria dopplerfällor.

I en flygburen koherent radar i s.k. pulsdoppler-mod kommer reflexer från olika riktningar vilket ger upphov till en spridning av klotterreflexerna i dopplerled. Detta beror på att olika markytelement har olika hastighet relativt radarsystemets dvs. flygplanets hastighetsvektor. Den totala utspridningen motsvarar i planflykt  $\pm$  flygplanets hastighet. Om den flygburna radarn arbetar i sk HPD-mod ("High PRF Pulse Doppler Mode"), dvs. med en entydig dopplermätning men med flertydig avståndsmätning, kan mål även i detta fall förekomma i klotterfria områden. Detta förutsätter dock att målets hastighet relativt radarsystemet är större än flygplanets egen hastighet, dvs att målet i sig självt är tillräckligt snabbt eller att målet ligger på kommande kurs i flygplanets framifrånsektor. Man brukar beteckna ett sådant mål som snabbt. För normala flygplanhastigheter och spanningsriktningar är markmål vanligen långsamma mål, dvs. de förekommer tillsammans med markreflexer. I detta fall brukar man också låta radarsystemet arbeta i MPD- eller LPD-mod ("Medium- respektive Low PRF Pulse Doppler-Mode"), dvs. med mångtydig mätning i dopplerled och mång- respektive entydig mätning i avståndsled. Valet av arbetsmod görs m.h.t. till upptäcktsprestanda och informationskvalitet.

Då radarantennen är riktad mot ett målområde är det av speciellt intresse att studera riktningarna inom huvudloben. Ett rörligt långsamt mål inom huvudloben kommer att konkurrera med markomgivning (klotter) på samma avstånd men från en riktning som motsvarar markelement med målets relativhastighet. Ligger denna riktning utom huvudloben kommer signalen från omgivande klotter att dämpas genom den lägre förstärkningen i antennens sidolober. Då radarn arbetar i MPD-

mod finns klotter i flera kombinationer av riktning- och avståndintervall som konkurrerar med målet. Om ett antensystem med flera delantennor används kan dominerande klotter och andra störsignaler undertryckas ytterligare genom s.k. "Space Time Adaptive Processing" eller STAP. Detta sker genom att medelst ingående delantennor kombinera filtrering i vinkelled med filtrering i tids- eller dopplerled. Denna teknik behandlas ingående bl. a. i [4]. Konventionell koherent radar i pulsdopplermod ger en begränsad vinkelupplösning som bestäms av den flygburna antennens storlek. Målriktningen kan normalt bestämmas inom en bråkdel av upplösningen beroende på förhållandet mellan mål- och olika störsignaler.

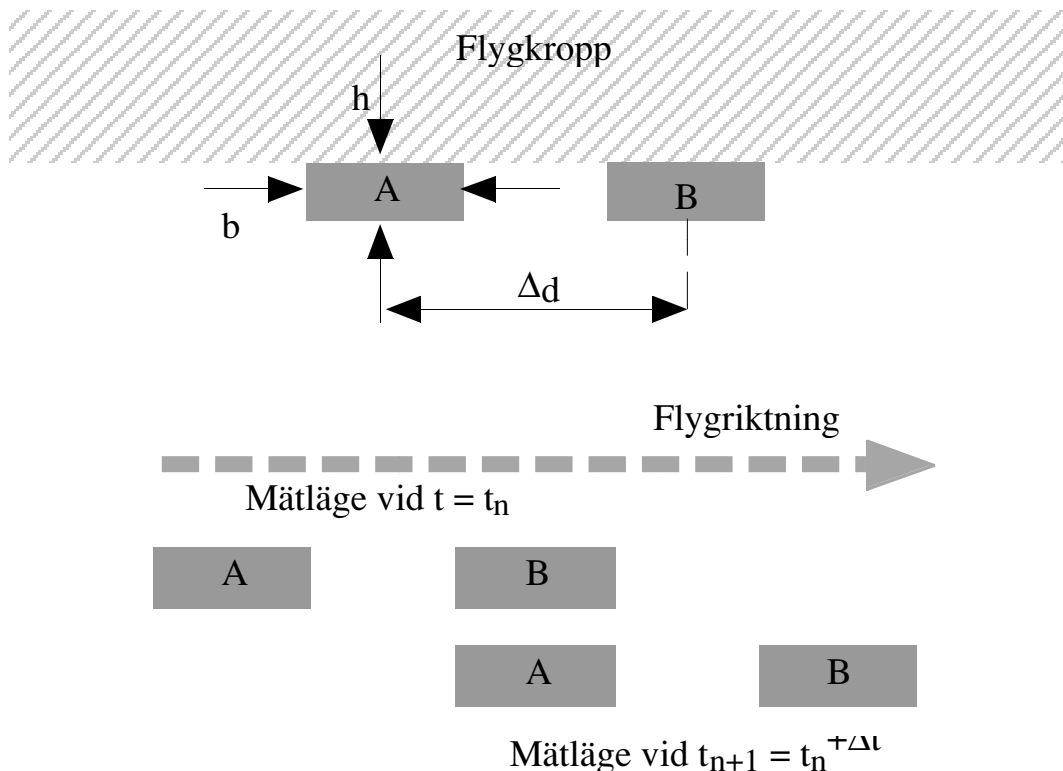
Även syntetisk aperturradar, SAR, kan utformas för detektering av rörliga markmål och dessa metoder betecknas ofta SAR-GMTI. I normala SAR-metoder tolkas en dopplerförskjutning väsentligen som en tvärskoordinat för markfasta reflexer varför rörliga mål, som ser ut som övriga fasta mål, får ett tvärsfel och hamnar vid sidan om sin normala omgivning. Rörliga mål kommer vidare att defokuseras i SAR och denna effekt förstärks vid högre mål hastighet, mer komplicerad målrörelse och längre observationstid. För att speciellt undertrycka fasta ekon från mark och upptäcka rörliga mål kan man i SAR utnyttja flera antenner skilda åt längs flygriktningen och därmed få flera på varandra följande observationer från samma position men skilda i tid. Radarsystem med två antenner i tandem betecknas ofta "Displace Phase Center Antenna", DPCA. I SAR-system med fler antenner kan man även tillämpa STAP (SAR-STAP), jämför [5].

En av flera skillnader mellan koherent realaperturradar i PD-mod och syntetisk aperturradar (alla moder) är den tid som krävs för alstringen av en målobservation. Normalt fordrar SAR-moder med god upplösning väsentligt längre observationstid än PD-moder vilket betyder att informationen ej kan uppdateras med lika hög takt som i PD-mod, en faktor som kan begränsa användningen i vissa tillämpningar.



### 3. Kort beskrivning av DPCA för SAR-GMTI

Ground Moving Target Indication radar eller kortare GMTI-radar betecknar radarsystem som från en rörlig plattform, t ex flygplan eller satellit, kan upptäcka rörliga markmål. För flygburen MTI och SAR-system finns en principiellt enkel metod föreslagen, betecknad "Displace Phase Centre Antenna" eller DPCA, jämför kapitel 16 [1]. Metoden innebär att man i ett rörligt radarsystem anordnar två antenner med identiska antennegenskaper så att två mätningar med en liten tidsskillnad kan genomföras från samma punkt i rummet. En principiellt enkel lösning vid flygburen radar är att montera antennerna i tandem under flygplanet parallellt med flygplanets hastighetsvektor under radaroperation, jämför figur 1. Att lösningen enbart är principiellt enkel avser det förhållandet att det är svårt att arrangera antennerna så att dessa erhåller exakt samma antenndiagram och att de båda mätningarna sker i exakt samma position. Vid praktiska experiment med en utvecklad variant av DPCA har markklotter undertryckts med ca 20 - 30 dB, jämför [6] och [7].



figur 1. Antenngeometri för DPCA

Genom att subtrahera signalerna från varandra erhålls en enkel MTI-funktion där fasta ekon elimineras medan rörliga ekon genom sin fasvariation kommer att passera. Om målshastigheten är begränsad kommer målen att synas i den SAR-bild som ges av skillnadssignalen och beräknas för en fast scen. Målen kommer dock att vara felaktigt lokaliserade. En viktig praktisk förutsättning för upptäckt och lokalisering av rörliga mål är att dess rörelse kan approximeras med en konstant hastighet längs en rät linje. Kravet på approximation innebär att avvikelsen från den räta linjen skall vara mindre än en viss del av en våglängd. Samma krav gäller den över tiden integrerade skillnaden mellan aktuell hastighet och medelhastighet under observationstiden. Snabba mål kommer att defokuseras i en SAR-bild beräknad för fasta mål och därmed kanske ej alls upptäckas. För att upptäcka snabba mål måste de MTI-filtrerade radardata processeras med hänsyn till hastigheter och kurser hos aktuella mål. I princip skulle man kunna tänka sig att processera data mot mål i mer komplicerade banor än linjär rörelse men signalbehandlingskomplexitet kommer då raskt att växa. Om en observation utförs under tillräckligt kort tid kommer alla mål att uppfylla villkoren för linjär rörelse, dvs avvikelsen från en rät linje är liten mätt i aktuell våglängd. Då ett rörligt mål är upptäckt kan radardata justerat för målets rörelse processeras på nytt och på så sätt ge en bättre

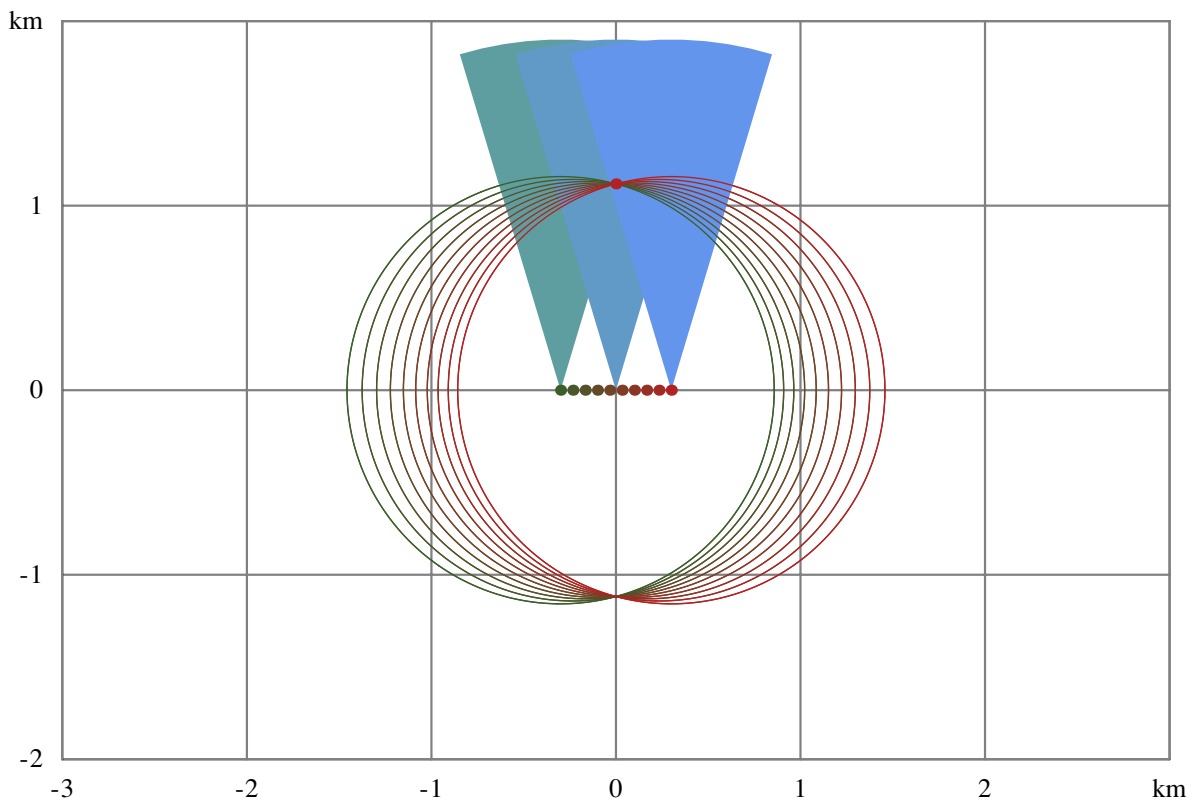
fokuserad målbild. Eventuellt kan även observationstiden och därmed målets relativa rotation utsträckas så att en ytterligare förbättrad upplösning erhålls.

I detta arbete studerar vi huvudsakligen mål under antagandet att kravet på linjär rörelse skall vara uppfyllt. Den typiska periodlängden under vilken ett rörligt mål uppfyller detta villkor begränsar i sin tur radarsystemets koherenstid. Denna tidsgräns beror på målets rörelser och observationens aktuella våglängd. Antagandet om linjär rörelse modifieras emellertid under avsnitt 8. Koherenstid tillsammans med ett radarsystems arbetsfrekvens eller våglängd, radarplattformens hastighet, spaningsriktning och lobform ger möjliga kombinationer av spaningsavstånd och upplösning.

## 4. Översiktligt om signalbehandling

Praktiskt användbara signalbehandlingsmetoder för SAR kan man betrakta som mer eller mindre goda approximationer av en i viss mening ideal metod som betecknas "Global Back Projection" (GBP). En uppräknig och mycket kort översikt av olika metoder i både frekvens- och tidsdomän återfinns i [5]. För att bedöma principiella möjligheter och begränsningar utgår vi i detta arbete från egenskaper rörande GBP.

Den i ett tids- eller avståndsintervall registrerade signalen utgörs av de reflekterade signalerna från ett tunt sfäriskt skal med en radie motsvarande tidsfördröjningen eller avståndet. De reflekterade signalerna härrör i allt väsentligt från skalets skärning med marken. Varje registrerad signal är en blandning av signaler från olika markpunkter för en sådan skärning. En viss markpunkt kommer att ge signalbidrag till en unik kombination av radier och positioner. Att från medelvärden av reflektiviteten över sfäriska skal beräkna reflektiviteten för punkter i ett bildplan är ett s. k. inverst problem där en ideal lösning är GPB.



figur 2. Illustration av mätgeometri.

En radar rör sig i en bana enligt tabell 1 och observerar en fast markpunkt med  $x$ ,  $y$ -koordinaterna  $(0, 1 \text{ km})$ . Markpunkten kommer att bidra till radarsignalen från sfäriska skal med radier som motsvarande det under observationen varierande avståndet. Det betyder att signalen från en markpunkt blandas med signalen från andra markpunkter. Data insamlas vanligen så länge som markpunkten är belyst med huvudloben. Bildkoordinaterna utgörs av radarbanans axel och avståndet till denna, dvs. de två cylindriska koordinaterna  $x$  och  $\rho$ .

"Global Back Projection" innebär i korthet att den processade signalen från en markpunkt fås som en viktad summa av retursignaler från en följd av radarpulser där tidsintervallet successivt justerats för den förändrade utbredningstiden mellan radar och mål. Denna justering måste utföras med en noggrannhet som korresponderar mot radarsystemets våglängd och under den tid den syntetiska aperturen alstras. Jämför även figur 2. Ett uttryck för den specifika reflektiviteten ges nedan enligt ekv. 1, jämför [8].

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma^{0(F,F)}[v,\omega] = \frac{1}{c} \sqrt{\frac{\pi}{2}} |v| \sqrt{v^2 + \omega^2} [r \cdot s_{rec}[r,x]]^{(H_{1,F})} [\sqrt{v^2 + \omega^2}, \omega]; \\ \text{där} \\ \sigma^{0(F,F)}[v,\omega] = 2\text{-dimensionella fouriertransformen av specifika radartvårsnittet } \sigma^0[\rho,x]. \\ \omega, v = \text{transformvariabler motsvarande } x\text{- resp. } \rho\text{- koordinaten} \\ r = \sqrt{x^2 + \rho^2} = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \\ s_{rec}[r,x] = \text{observerad signalamplitud för avstånd } r \text{ och bankkoordinat } x \\ \text{(medelvärde över sfäriskt skal).} \\ [r \cdot s_{rec}[r,x]]^{(H_{1,F})} = \text{funktionen } r \cdot s_{rec}[r,x] \text{ är hankel - transformerad och fouriertransformerad} \\ \text{m a p 1:a resp 2:a variabeln där hankeltransformen är av 1:a ordningen} \end{array} \right.$$

ekv. 1. Beräkning av reflektivitet från mätdata.

Detaljerade genomgångar av GBP och samt förslag på approximationer återfinns t ex i [8] och [9].

I ett första steg alstras en bild vars koordinater utgörs av reflexpunktens projektion på den ideala flygbanan samt avståndet från reflexpunkten till denna ( $x, \rho$ ) t ex enligt ekv. 1. I ett andra steg projiceras denna bild på ett antaget markplan eller på en markyta med kända höjddata.

För att alstra en SAR-bild på t ex 1000x1000 bildpunkter fordras motsvarande antal oberoende observationer ordnade så att man från 1000 lämpligt valda antennpositioner för varje position observerar radarsignalen i 1000 olika avståndsintervall. GBP fordrar 1000 summationer för varje bildpunkt eller  $10^9$  operationer. Det betyder att man vid alstring av större SAR-bilder ofta använder approximativa metoder med lägre beräkningsbörda. Relationen mellan beräkningskraven ges approximativt i ekv. 2, jämför även [9].

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{GBP} \propto O[n^3]; \\ N_{appr} \propto O[\log[n]n^2]; \end{array} \right.$$

eller  $\frac{N_{GBP}}{N_{appr}} \propto O\left[\frac{n}{\log[n]}\right];$

där

$$\left\{ \begin{array}{l} n = \text{antalet pixel i kvadratisk bild} \\ N_{GBP} = \text{antal operationer vid GBP} \\ N_{appr} = \text{antal operationer vid approximativ metod} \end{array} \right.$$

ekv. 2. Approximativ beräkningsbörda för SAR

Förhållandet mellan beräkningsalternativen växer med växande  $n$  och ger t ex för  $n = 1000$  en faktor av storleksordningen 100. För stora SAR-bilder och för att få korta beräkningstider tillämpas därför normalt någon approximativ metod vid signalbehandling och bildgenerering.

## 5. Fokusering av rörliga mål

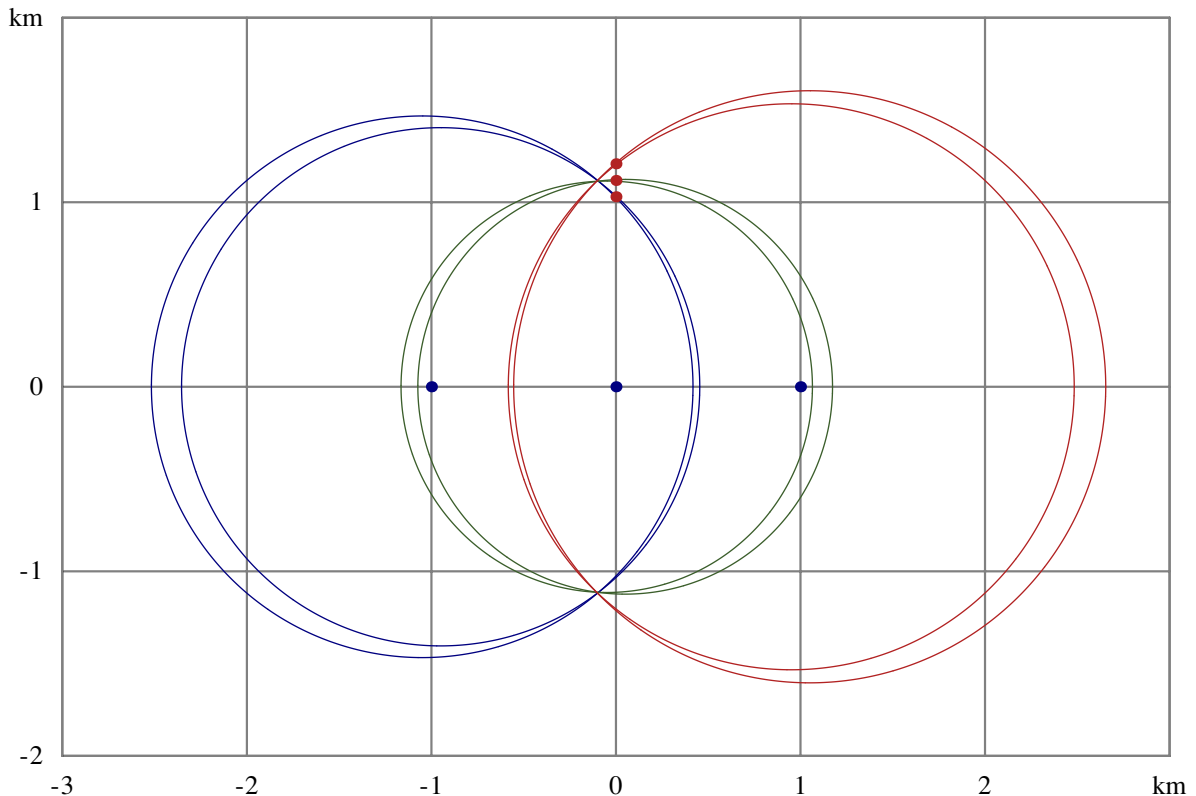
För att illustrera olika samband mm för ett rörligt mål utgår vi från en radar- och målbana enligt tabell 1. För att få tydliga figurer har vi i utgångsläget valt ett kort målavstånd med  $y_0 = 1000$  m.

$$\begin{cases} r[t] = \vec{r}_0 + t\vec{v}_r; \\ m[t] = \vec{m}_0 + t\vec{v}_m; \end{cases}$$

där r och m indikerar radar resp. mål

$$\begin{cases} \vec{r}_0 = \{x_0, y_0, z_0\} = \{0, 0, 500\}; & (\text{m}) \\ \vec{v}_r = \{v_x, v_y, v_z\} = \{v_x, 0, 0\} = \{100, 0, 0\} & (\text{m/s}) \\ \vec{m}_0 = \{\xi_0, \eta_0, \zeta_0\} = \{0, 1000, 0\}; & (\text{m}) \\ \vec{v}_m = \{v_\xi, v_\eta, v_\zeta\} = \{v_\xi, v_\eta, 0\} = \{0, 10, 0\} & (\text{m/s}) \end{cases}$$

tabell 1. Radar- och målparametrar för figurberäkningar



figur 3. Projektioner av sfäriska skal.

Projektioner av sfäriska skal på ett bildplan genom SAR-banan i två cylinderkoordinater. 3 par av skal innehållande ett rörligt mål med liten tidsskillnad, 1s, är uppritade omkring tiderna  $-10, 0$  och  $10$  s. Skenbara fokus erhålls omkring de två punkterna  $(-0.1, \pm 1.1)$  km. Aktuell punkt ges av antennriktningen. Radar- och målbparametrar enligt tabell 1.

Rörliga mål kan processas vid DPCA i ett första steg genom att subtrahera två SAR-bilder med identisk mätgeometri för en fast målscen men med förskjutet observationsintervall. Därmed försvinner signalen från alla fasta objekt medan ett rörligt mål syns genom den signalvariation rörelsen medfört under tidsintervallet. Dock kommer det rörliga målet att bli fellokaliserat i skillnadsbilden då denna processeras under hypotesen att en fix scen observeras.

En uppfattning om ett rörligt måls skenbara läge kan erhållas genom att betrakta två sfäriska skal vars radie ges av avståndet mellan radar och mål från två näraliggande tidpunkter. Skalens skärning, blir en cirkel med x-axeln som symmetriaxel. Denna ger i cylindriska koordinater efter projektion

på  $x$ - $\rho$ -planet en punkt som approximativt indikerar det skenbara läget, jämför figur 3. Ett rörligt måls skenbara läge kommer att förändras under observationstiden. Läget kan i ett visst ögonblick bestämmas genom att utgå från villkoren att avstånd och avståndsderivata till det rörliga målet skall överensstämma med ett fast målläge och därefter beräkna sistnämnda läge. Anta nu att ett mål rör sig linjärt i ett markplan och observeras från en radar som rör sig i en linjär bana på en fix höjd. Målets skenbara koordinater  $(x_m, \rho_m)$  kan beräknas från de verkliga målparametrarna enligt ekv. 3.

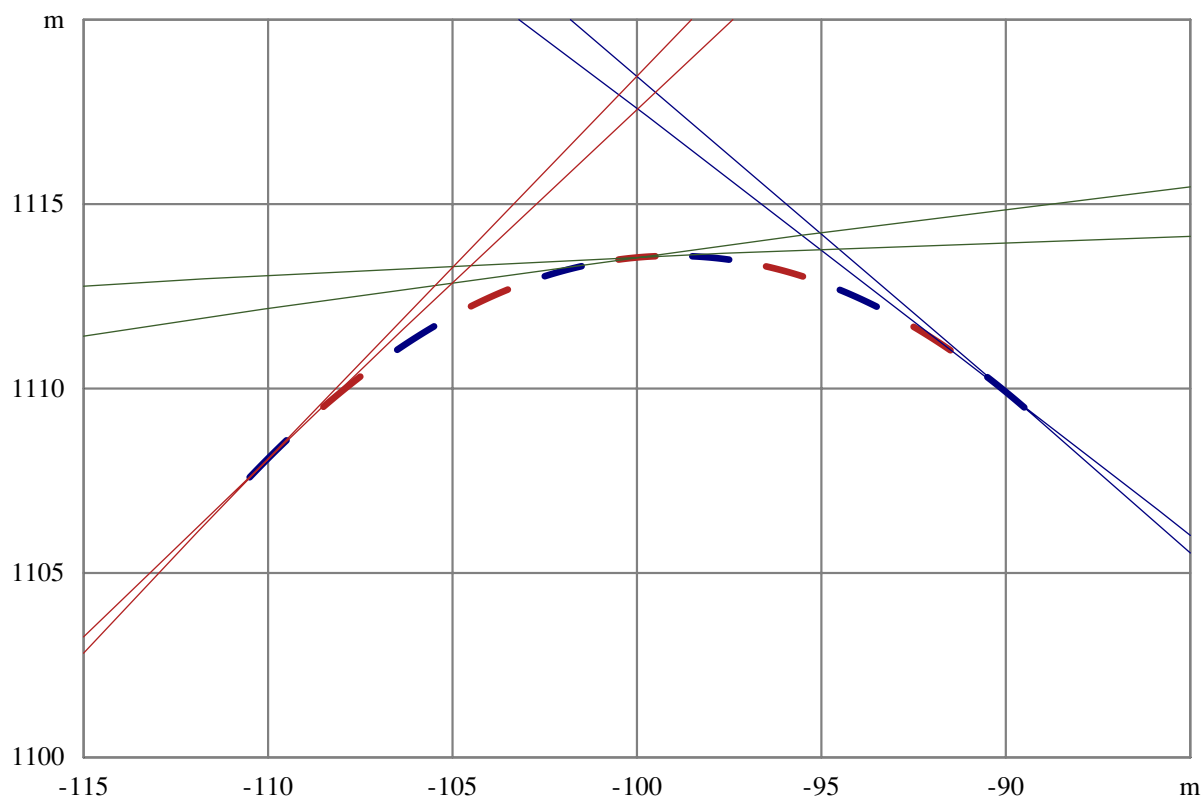
$$\begin{cases} x_m = \xi - \frac{\eta v_\eta + \xi v_\xi}{v_x}; \\ \rho_m = \sqrt{\xi^2 + \eta^2 + z_0^2 - \frac{(\eta v_\eta + \xi(v_\xi - v_x))^2}{v_x^2}}; \end{cases}$$

där

$$\begin{cases} (x_m, \rho_m) = \text{målets skenbara koordinater} \\ (\xi, \eta, 0) = \text{målets verkliga koordinater} \\ (v_\eta, v_\xi) = \text{målets hastighetsvektor} \\ (v_x, 0, 0) = \text{plattformens hastighetsvektor} \\ z_0 = \text{plattformens höjd} \end{cases}$$

ekv. 3. Målets skenbara cylindriska koordinater.

Ett exempel på hur det skenbara läget kan variera för olika observationstidpunkter ges i figur 4 där även ett litet delområde från figur 3 medtagits



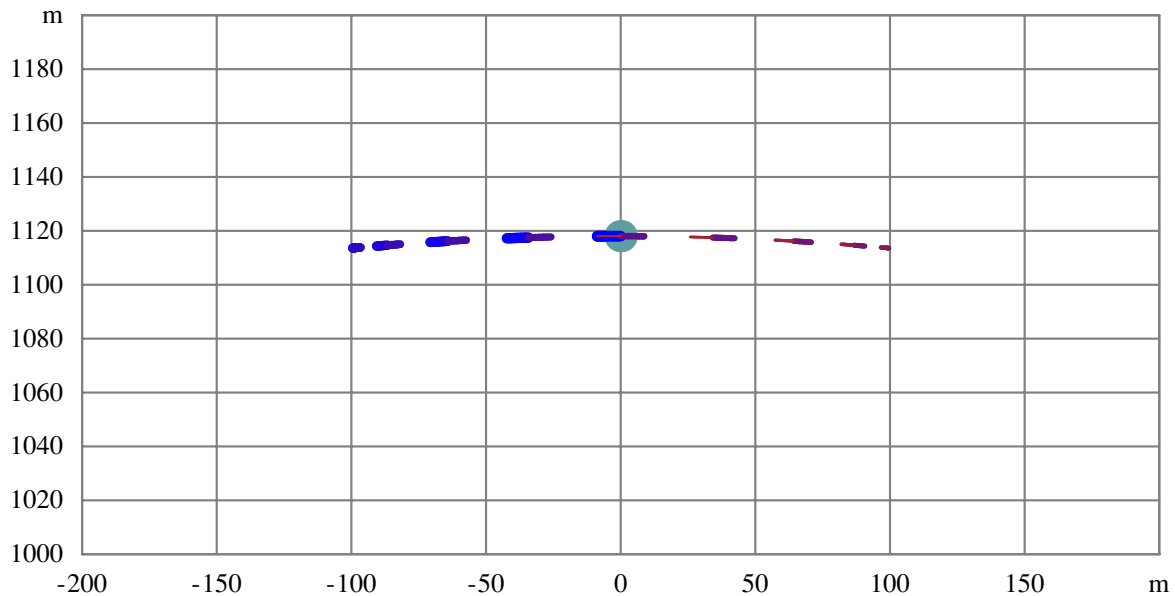
figur 4. Skenbara mållägen

Målets skenbara lägen beräknade enligt ekv. 3 för tiden  $-10$  till  $10$  s med radar- och målparametrar enligt tabell 1. Streck- och intervallängd motsvarar ungefärligen förändringen under  $1$  s. Läget indikeras med en blå-röd streckad kurva.

Som jämförelse är ett motsvarande område med tre skärningspunkter från figur 3 inlagt och man noterar en god överensstämmelse mellan skärningspunkter och kurva.

Denna förändring av ett rörligt måls skenbara läge i en SAR-bild ger tillsammans med förändringar i målets attityd upphov till den defokusering som omnämns under avsnitt 3.

Ett rörligt mål som processeras som ett fast mål fokuseras vid en viss tidpunkt på en skenbar momentan position som varierar med målets hastighet och kurs. Ett exempel på denna momentana positions beroende av kursen ges i figur 5.



figur 5. Det skenbara lägets beroende av målets kurs.

Ett rörligt mål observeras från en radarplattform med parametrar enligt tabell 1. Det skenbara målets momentana läge i bildplanet  $(x, \rho)$  för kurser i markplanet från 0 till 360° är markerade med tunn streckad röd linje till tjock streckad blå linje.

Avståndet till den momentana skenbara positionen kan beräknas från ekv. 3. Vi får ett uttryck enligt ekv. 4.

$$\left\{ \begin{array}{l} r_m = \sqrt{x_m^2 + \rho_m^2} = \sqrt{\xi^2 + \eta^2 + z_0^2}; \\ \text{där} \\ r_m = \text{avståndet till målet} \end{array} \right.$$

ekv. 4. Den skenbara positionens momentana avstånd.

Vi ser att ett måls kurs och fart ej inverkar på den skenbara positionens momentana avstånd utan läget varierar längs en större eller mindre del av en cirkel, jämför figur 5.

Ett rörligt mål som går i en linjär bana med konstant fart och observeras från en radar som också går i en linjär bana med konstant fart kan fokuseras på samma sätt som ett fast mål under förutsättning att signalbehandlingen utförs med en annan antagen flyghastighet. Vi antar att vi känner målets rörelse och utgår från relationerna enligt ekv. 5.

$$\left\{ \begin{array}{l} \sqrt{\gamma^2(x[t]-x_0)^2 + \rho_0^2} = \sqrt{(x[t]-\xi[t])^2 + \eta[t]^2 + z_0^2}; \\ \text{där} \\ x[t] = v_x t; \\ \xi[t] = \xi_0 + v_\xi(t - t_0); \\ \eta[t] = \eta_0 + v_\eta(t - t_0); \end{array} \right.$$

ekv. 5. Villkor för koherent processning av rörligt mål.

I ekv. 5 kan vi derivera högra ledet och bestämma tidpunkten för minsta målavstånd som vi föreskriver skall vara,  $t_0$ . Därefter kan vi lösa ut den relativa hastighetskvoten och målets lägeskoordinater  $\gamma$ ,  $x_0$  respektive  $\rho_0$ . Vi får då uttryck enligt ekv. 6.

$$\left\{ \begin{array}{l} t_0 = \frac{\xi_0(v_x - v_\xi) - \eta_0 v_\eta}{v_x(v_x - v_\xi)} \\ \gamma^2 = \frac{(v_x - v_\xi)^2 + v_\eta^2}{v_x^2}; \\ x_0 = \xi_0 - \frac{v_\eta}{v_x - v_\xi} \eta_0; \\ \rho_0 = \sqrt{\eta_0^2 \left( 1 + \left( \frac{v_\eta}{v_x - v_\xi} \right)^2 \right) + z_0^2} \end{array} \right.$$

ekv. 6. Parametrar för koherent processning av rörligt mål.

Beträffande ekv. 6 noterar vi speciellt att uttrycken för  $t_0$  och  $x_0$  är linjärt beroende.

Vi kan undersöka om insamlade radardata innehåller något rörligt mål genom att studera radarbilden efter processning med olika parametervärden  $\gamma$ . För ett sådant värde som ger en god fokusering kan man lösa ut 3 av målparametrarna  $\xi_0$ ,  $\eta_0$ ,  $v_\xi$  och  $v_\eta$  som funktioner av den 4:e, jämför ekv. 7. Det betyder emellertid att målet ej kan bestämmas entydigt.



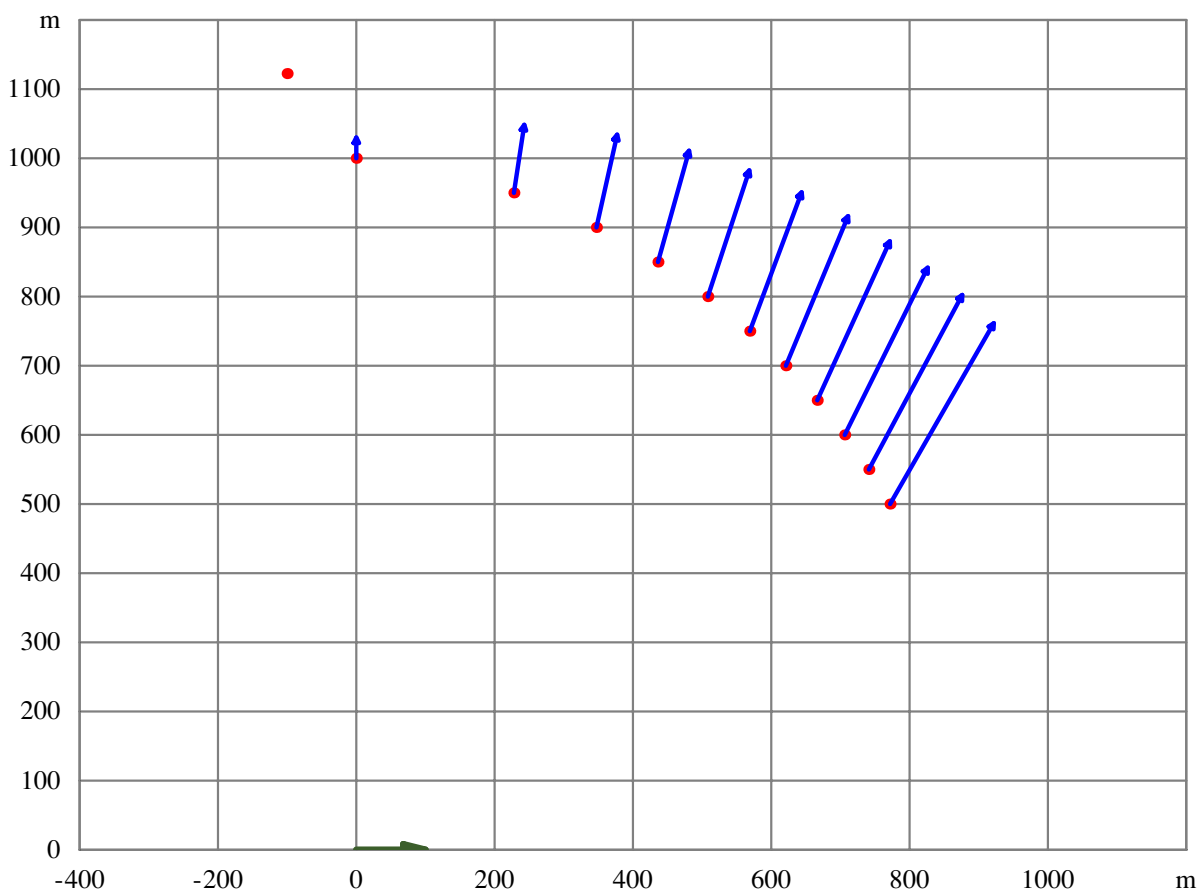
$$\left\{ \begin{array}{l} \xi_0 = \sqrt{\rho_0^2 - \eta_0^2 - z_0^2} + x_0; \\ v_\xi = v_x \left( 1 + \frac{\eta_0 \gamma}{\sqrt{\rho_0^2 - z_0^2}} \right); \\ v_\eta = v_x \gamma \frac{\sqrt{\rho_0^2 - \eta_0^2 - z_0^2}}{\sqrt{\rho_0^2 - z_0^2}}; \end{array} \right.$$

där

$$\left\{ \begin{array}{l} \gamma = \text{processparameter för fokuserad bild} \\ x_0, \rho_0 = \text{målkoordinater fokuserad bild} \\ v_x, z_0 = \text{flyghastighet och flyghöjd} \\ \eta_0 = \text{obestämd parameter eller variabel} \end{array} \right.$$

ekv. 7. Målparametrar efter fokusering av rörligt mål

Ett exempel på olika målparametrar som ger samma parametrar för en fokuserad bild som för ett mål enligt tabell 1 ges i figur 6.



figur 6. Exempel på tvetydiga målparametrar vid fokuserad målberäkning.

Exempel på alternativa målparametrar (rödblå vektorer) som ger samma fokuspunkt (röd punkt) och hastighetsrelation som ett mål som observeras från en radarplattform med parametrar enligt tabell 1. Målets hastighetsvektor är förlängd tre gånger. Radarplattformen befinner sig i origo och rör sig längs x-axeln (grön vektor).

För att bestämma ett rörligt måls kombination av position och hastighet entydigt efter bildalstring fordras kompletterande information. En första indikation om läget ges av det område eller

vinkelintervall som antennen belyser. Ett mer precist läge kan beräknas genom att utnyttja DPCA-antennerna för riktningsbestämning med monopuls-metoden.

Rörliga mål som ger en så liten förskjutning av fokus läge att detta hamnar inom aktuell upplösning kan processeras som fasta mål. En uppfattning om fokus utspridning fås genom att beräkna produkten av observationstid och fokus momentana hastighet i bildplanet, jämför ekv. 8.

$$\left| \frac{d\vec{r}_f}{dt} \right| = \frac{v_m \|\vec{r}_f\| |v_m - 2v_x \cos[\phi]|}{\sqrt{v_x^2 z_0^2 + r_{cyl}^2 (v_x^2 \sin^2[\theta] - v_m \cos[\phi - \theta] (v_m \cos[\phi - \theta] - 2v_x \cos[\phi - \theta]))}}$$

där

$$\vec{r}_f = \text{fokus vektor i bildplanet } (x, \rho) = \left( x, \sqrt{y^2 + z_0^2} \right)$$

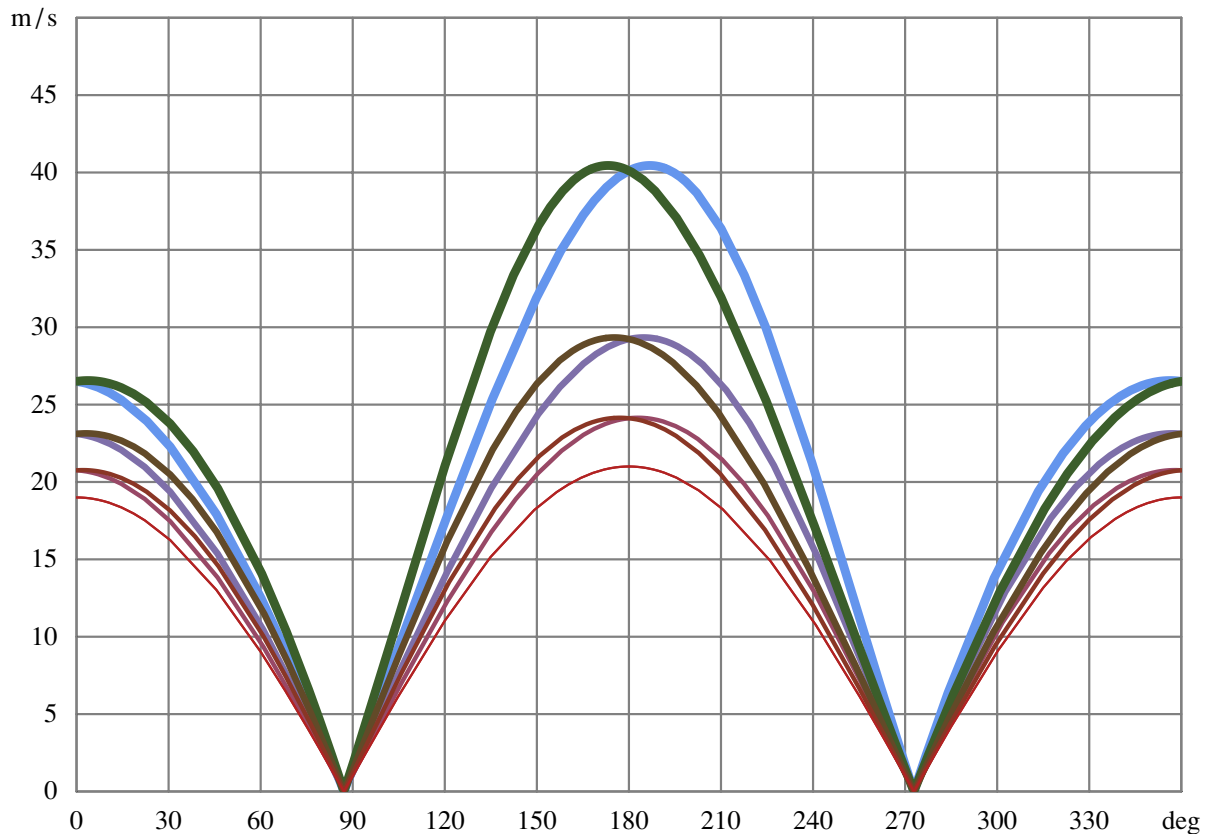
$r_{cyl}$  = målavståndet projicerat på markplanet

$\theta, \phi$  = målets bäring från radarplattformen resp. målets kurs

$$\left| \frac{d\vec{r}_f}{dt} \right| = \text{beloppet av fokus hastighetsvektor}$$

ekv. 8. Fokus momentana hastighet för ett rörligt mål

Ett exempel på fokus hastighet som funktion av ett rörligt måls kurs ges i figur 7.



figur 7. Exempel på fokus hastighet vid olika målkurser.

Observation av ett rörligt mål från en radarplattform med parametrar enligt tabell 1, där för målavståndet 1 km målbärningen varierats mellan 30, 45, 60 och 90° indikerade med tjock ljusblå linje till tunn röd linje och vidare är målbärningar 150, 135, 120 och 90° indikerade med tjock grön linje till tunn röd linje.

Vi lägger märke till den periodiska variationen hos fokus hastighet som uppvisar ett större och ett mindre maxima samt två nollställen under en period. Nollställena kan enkelt beräknas från ekv. 8 enligt ekv. 9.

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_0 = \pm \text{ArcCos} \left[ \frac{v_m}{2v_x} \right]; \\ \text{där} \\ \phi_0 = \text{vinkel för vilken fokus hastighet är noll} \end{array} \right.$$

ekv. 9. Vinkelvillkor för nollhastighet hos fokus

Nollställena för fokus hastighet i figur 7 erhålls för vinklar om ca. 87 och 273° vilka är oberoende av målavstånd och målbäring. Det större och mindre maximivärdet ligger nära 180 resp. 0 eller 360°. För de valda målbäringarna för fallen i figur 7 fås maxhastigheter och målkurs enligt tabell 2.

Bäring (°)	Maxvärde (m/s)	Målkurs (°)
30	40.5	187
45	29.3	185
60	24.2	183
90	21.0	180
120	24.2	177
135	29.3	175
150	40.5	173

tabell 2. Fokus maximala hastighet och motsvarande målkurs för olika målbäringar

För praktiskt bruk förenklas problemet att bestämma den maximala hastigheten för fokus förskjutning om vi approximerar värdet med det för målkursen 180° relativt radarplattformens kurs. Om vi antar att ett flygburet radarsystem spanar i en minsta tillåtna bäring relativt kursvektorn på  $\theta_{\min}$  erhåller vi approximativt en maximal hastighet för fokus enligt ekv. 10.

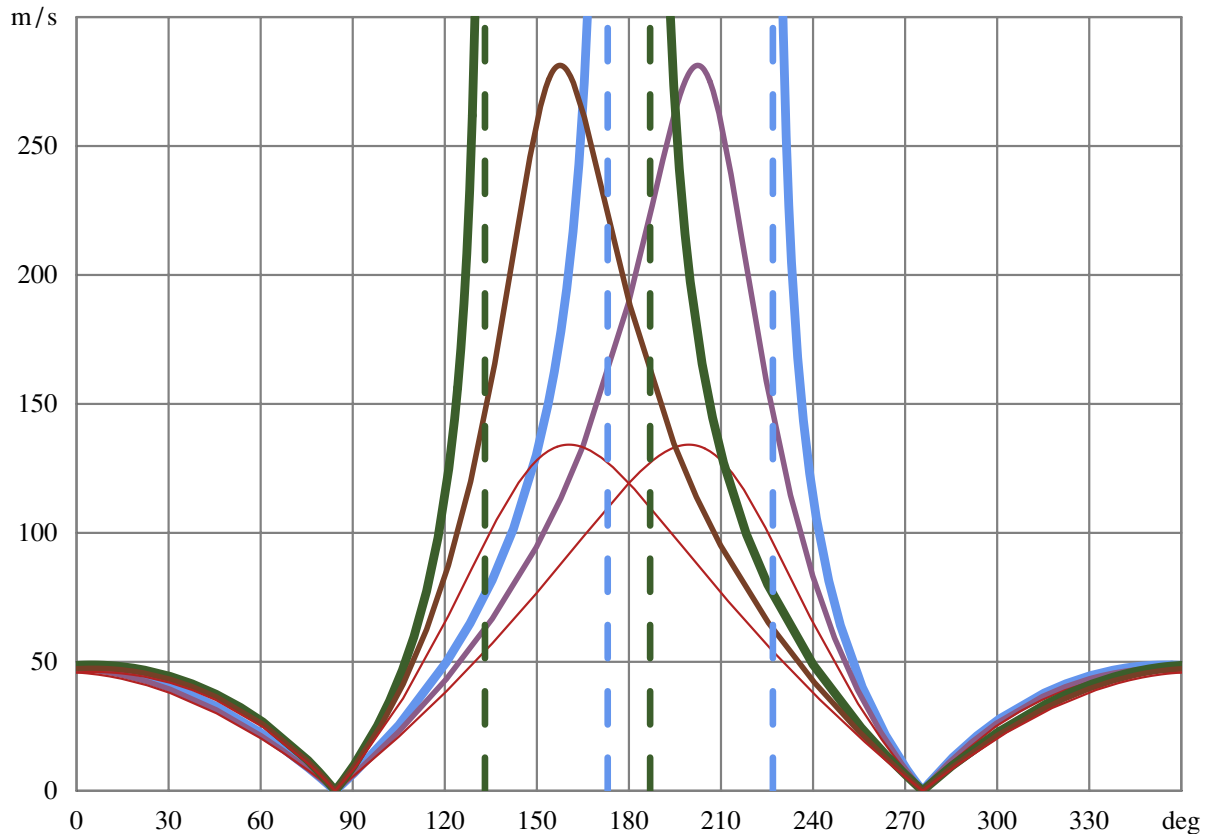
$$\left\{ \begin{array}{l} v_{fm} = \left| \frac{d\vec{r}_f}{dt} \right| = v_m |\vec{r}_f| \frac{|v_m + 2v_x|}{\sqrt{v_x^2 z_0^2 + r_{cyl}^2 \left( v_x^2 \text{Sin}[\theta_{\min}]^2 - v_m \text{Cos}[\theta_{\min}] (v_m \text{Cos}[\theta_{\min}] + 2v_x \text{Cos}[\theta_{\min}]) \right)}}; \\ v_{fml} = \text{Lim}_{z_0 \rightarrow 0} \left[ v_{fm} \right] = \frac{v_m}{v_x} \frac{|v_m + 2v_x|}{\sqrt{\text{Sin}[\theta_{\min}]^2 - \frac{v_m}{v_x} \text{Cos}[\theta_{\min}] \left( \frac{v_m}{v_x} \text{Cos}[\theta_{\min}] + 2 \text{Cos}[\theta_{\min}] \right)}}; \end{array} \right.$$

där

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{fm} = \text{maximal fokalhastighet för rörligt mål} \\ v_{fml} = \text{maximal fokalhastighet för rörligt mål då } \frac{z_0}{r_{cyl}} \ll 1 \end{array} \right.$$

ekv. 10. Approximativt uttryck för fokus maximala hastighet.

Rörliga mål där hastighetskvoten mellan relativa närmandehastighet och radarplattformens hastighet är större än ett kommer ej att avbildas om radardata behandlas som reflexer från fasta mål.

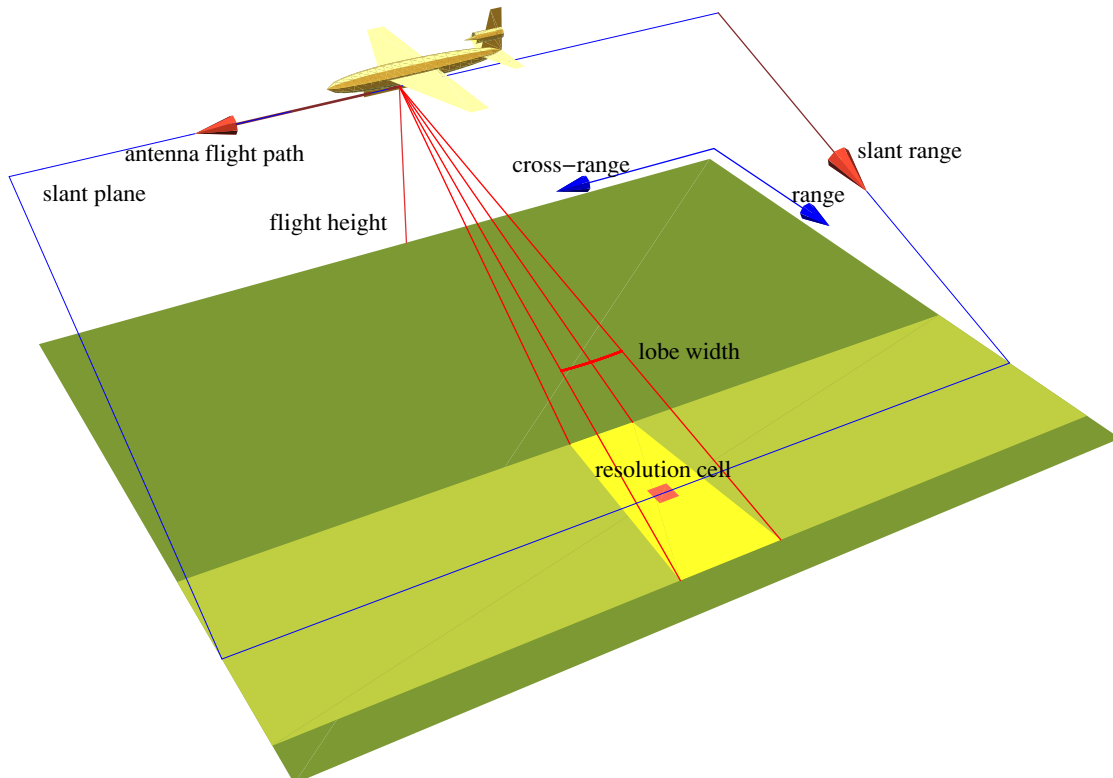


figur 8. Exempel på fokus hastighet vid olika målkurser för fall där beloppet av relativa närmandehastigheten kan närma sig eller överskrida radarplattformens hastighet. Mål och radarparametrar enligt tabell 1 där dock målhastigheten höjts till 20 m/s. Målbäringen varierats mellan 20, 25 och 30° indikerade med tjock ljusblå linje till tunn röd linje och vidare målbäringar 160, 155 och 150° indikerade med tjock grön linje till tunn röd linje. Målets kurs har varierats från 0 till 360°. För målbäringar 20 och 160° erhålls vinkelintervall där beloppet av relativa närmandehastigheten är högre än plattformens hastighet. Det innebär att målet ej avbildas alls i ett bildplan för fasta mål.

Detta fall kan inträffa för alla hastigheter, alltså även låga hastigheter, om bara målets kursvektor är nära motriktad radarplattformens och bäringen till målet relativt plattformens kurs är liten eller är nära 180°. För sådana ger approximationen enligt ekv. 10 inga reella värden och man får vidare stora fel då hastighetskvoten närmar sig ett. En uppfattning om förhållandena ges i figur 8. Om vi känner tänkbara måls maximala hastighet kan vi, utgående från aktuella parametrar för radarplattformen, approximativt ange maximal målvandring under en given koherenstid vid signalbehandling för fast scen. Bedöms upptäcktsprestanda vara otillräckliga vid signalbehandling för fast scen kan man utsträcka integrationstiden genom att processera data för olika hastighetsintervall dvs. med olika värden på parametern  $\gamma$  enligt ekv. 6. Integrationstiden kommer då att bestämmas av intervallstorleken eller skillnaden mellan näraliggande värden på  $\gamma$ . På grund av målfokus vandring kommer den möjliga upplösningen att inskränkas, jämför ekv. 13.

## 6. Användningsmoder för SAR

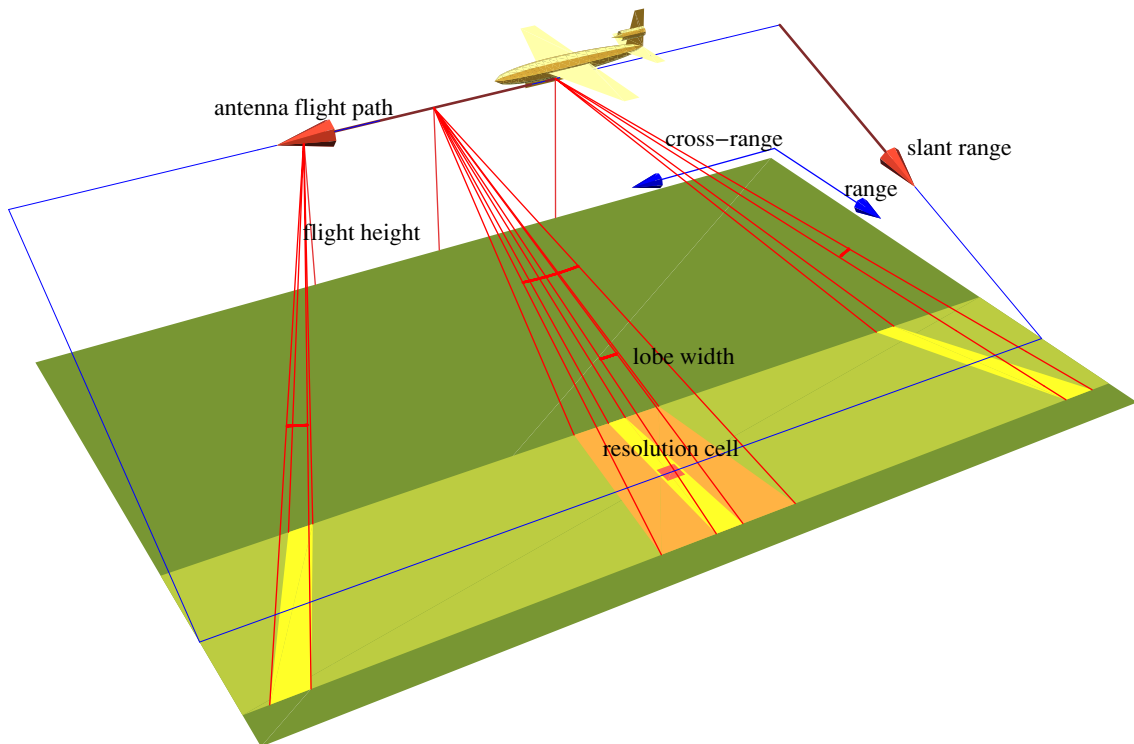
Då en radarplattform skall övervaka, spana och följa mål över ett större område måste de olika funktionerna avvägas mot varandra. Detta påverkar val av flygbanor, spaningsriktning och arbetsmod. Vid övervakning och spaning för operativa eller taktiska beslut kan periodtiden vara av storleksordningen timmar. Ett SAR-system för dessa ändamål kan arbeta i ”stråk-mod” (strip-map) eller ”svep-mod” (scan-SAR), jämför figur 9 och figur 10. Dessa arbetsmoder ger stora övervakade eller avspanade ytor men låg uppdateringstakt. Beroende på flygoperativt uppträdande kan periodtiden variera från kanske 10-tal minuter till många timmar.



figur 9. Mätgeometri vid ”stråk-mod” (stripmap-SAR).

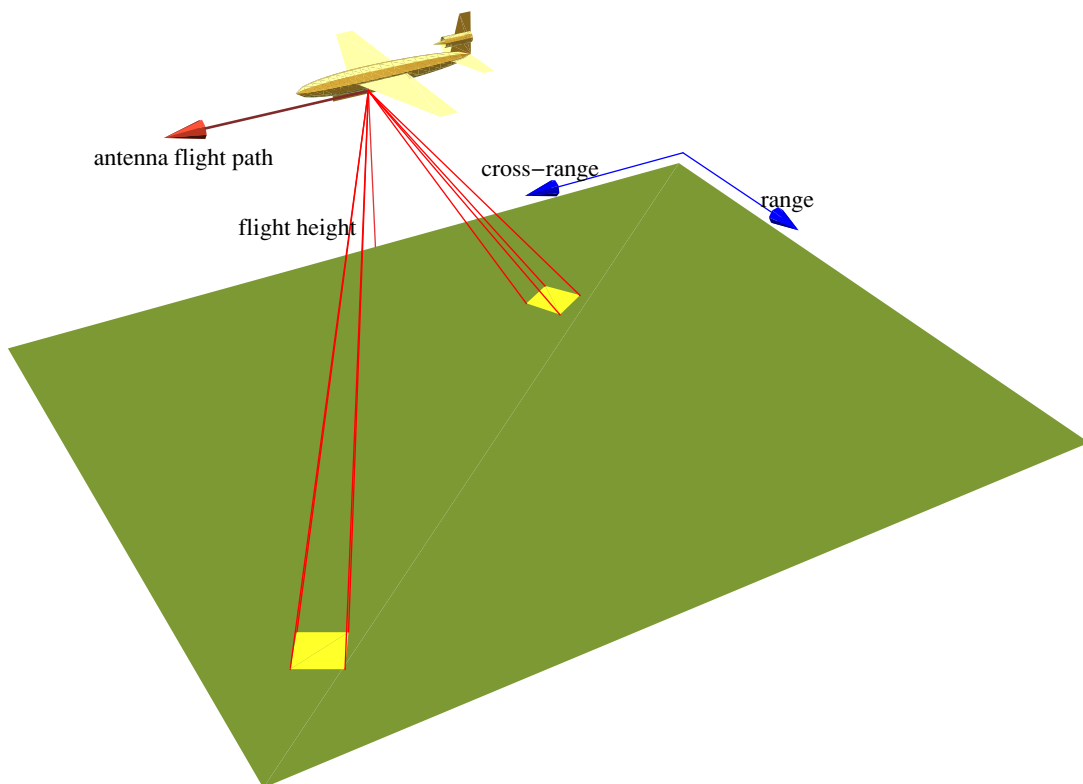
Ett SAR-system i stråkmod alstrar vanligen den syntetiska aperturen genom att flyga i raktbana med antennsystemet riktat tvärs flygbanan. Det avspanade området bestäms av det avståndintervall som registreras och den ban- eller stråklängd som flygs upp. Den syntetiska aperturlängden bestäms av den av antennloben belysta markytan. Spaningsdata erhålls successivt allteftersom markytan övermålas av antennbelysningen. Tiden för att flyga förbi och spana av ett område, stråktiden, beror av stråklängd och flyghastighet. Minsta medeltid mellan data från samma markpunkt ges av stråktid och flygplanets vändningstid. Under realistiska förhållanden kan man vilja växla mellan olika spaningsområden och då tillkommer anflygningstid. Detta är också fallet om flygplanet vid beslut om insats befinner sig på sin flygbas (grupperingsplats).

Ett SAR-system i svep-mod alstrar den syntetiska aperturen genom att flyga i raktbana men med antennsystemet svepande över spaningsområdet, jämför figur 10. På så sätt kan ett område som är större än stråklängden avspanas. Man erhåller genom denna metod antingen kortare uppdateringstid eller ett större avspanat område. I gengäld erhålls antingen en sämre upplösning eller om antennloben breddas en lägre antennförstärkning och eventuellt också en reducerad räckvidd.



figur 10. Mätgeometri vid "svep-mod" (scan-SAR).

Spaning och följning för insatser mot rörliga eller ofta omgrupperade mål, t.ex. artilleribekämpning, banstyrning av vapen mm, medför ofta krav på beslut med korta periodtider kanske ned till storleksordningen sekunder. Ett SAR-system kan i detta fall arbeta i "fokuserad-mod" (spotlight-SAR), jämför figur 11.



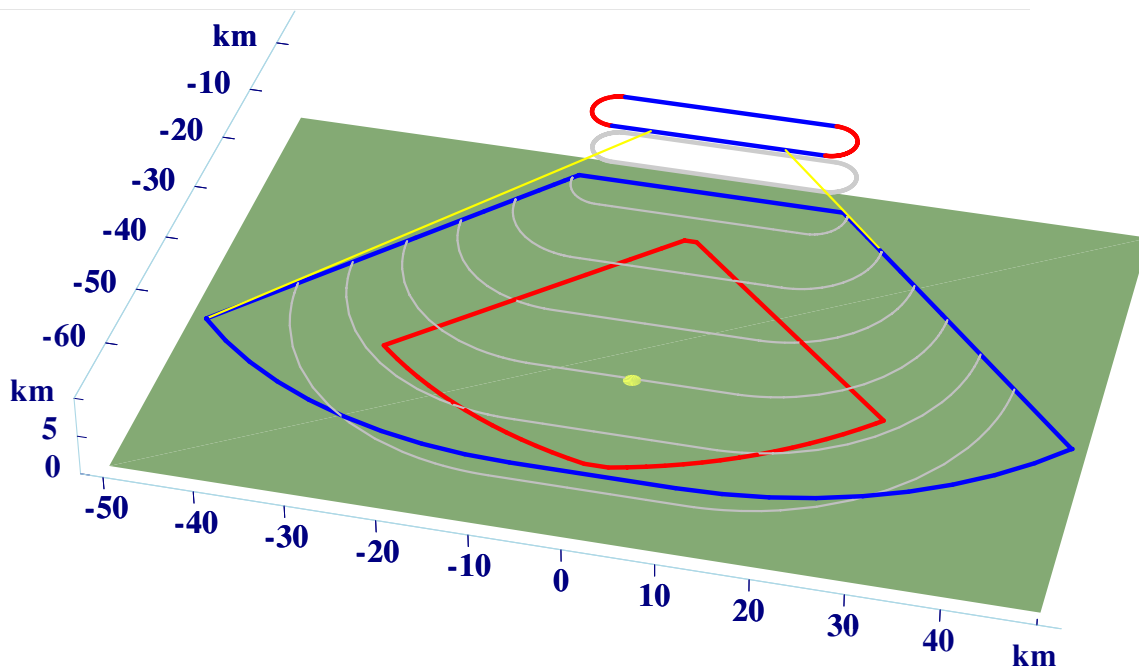
figur 11. Mätgeometri vid "fokuserad mod" (spotlight-SAR)

För att få en uppfattning om hur SAR i fokuserad mod skulle kunna användas ger vi följande exempel avseende mätgeometriska begränsningar för ett SAR-system som arbetar på X-bandet med våglängden ca 3 cm, jämför tabell 3 och figur 12.

Parameter	Dimension
Frekvens	10 GHz
Max lutande avstånd	57 km
Min lutande avstånd	7 km
Upplösning	3 dm
Snedtittning rel. tvärsriktning	$\pm 45^\circ$
Flyghöjd	5 km
Flygbanans stråklängd	25 km
Flygbanans omkrets	69 km
Flygbanans uppdateringstid	1.92 min
Flygbanans tvärsacceleration	3 g
Minsta bестrykningsvinkel	$5^\circ$
Största bестrykningsvinkel	$45^\circ$
Scenstorlek	ca 1 x 1 km
Minsta bildalstringstid	1.4 s
Största bildalstringstid	15.3 s
Minsta antal bilder/h	155
Största antal bilder/h	1829

tabell 3. Parametrar avseende mätgeometriska begränsningar för fokuserad SAR (Spotlight-SAR).

Utöver de mätgeometriska begränsningarna tillkommer ett radarsystems övriga begränsningar. Dessa rör främst konstruktionen av sändare och mottagare, antenssystem samt signalbehandling.



figur 12. Exempel på prestanda för fokuserad SAR (Spotlight-SAR)

Flygbanan indikeras med blå-röd oval med en grå markprojektion. Den blå slutna linjen indikerar de punkter som är möjliga att avbilda från någon del av det närmaste stråkbenet. Den röda slutna linjen visar de punkter som är möjliga att avbilda från alla delar av benet. De grå öppna linjerna indikerar tidgränser för bildalstring (koherenstiden) med värden 2, 4, 6, 8, 10 och 12 sekunder.

De mätgeometriska begränsningarna avser i exemplet fasta mål vilket kan innebära att i synnerhet den bildalstringstid ( $\approx$  koherenstid) som krävs för större avstånd ej är möjlig att uppnå p g a ett

rörligt måls oregelbundna rörelser. En kortare bildalstringtid leder till sämre upplösning och räckvidd men ökar den möjliga bildfrekvensen.



## 7. Uppskattning av vissa parametrar för SAR/GMTI

För att i en första ansats kunna modellera egenskaper hos en flygburen radar som arbetar i SAR/GMTI-mod följer en uppskattning av vissa radarparametrar. Uppskattningarna är grova och ger enkla samband mellan parametrar. Vi antar här att radarsystemet samtidigt alstrar både konventionella SAR-bilder och GMTI-bilder. Här behandlas upplösning dels allmänt dels vid begränsad koherenstid, vidare behandlas, samplingsavstånd, flyg- och målhastighet pulsrepetitionsfrekvens, entydigt mätavstånd, datatakt samt målriktningens osäkerhet och koherenstidens beroende av målrörelser.

Som för fasta mål beror upplösningen av ett rörligt mål väsentligen på den utsända vågformens bandbredd och den aspektvinkeländring som erhålls under observationstiden. Vi utgår inledningsvis från de parametrar som gäller en radar utan DPCA som dimensioneras för att inkludera rörliga mål i signalbehandlingen.

Anta att en radarobservation av ett mål med enbart linjär translation utförs från en plattform vars hastighet är väsentligt större än ett målets. Då kommer upplösningen av målet approximativt att bli lika med den för markytan i målscenen enligt ekv. 11.

$$\begin{cases} \Delta r = \frac{c}{2B}; \\ \Delta x = \frac{\lambda r}{2s \sin[\varphi_{sq}]}; \end{cases}$$

där

$$\begin{cases} \Delta r, \Delta x = \text{upplösning längs och tvärs observationsriktningen} \\ c, B = \text{ljushastigheten och bandbredd} \\ r = \text{observationsavstånd} \\ s = \text{banlängd} \\ \varphi_{sq} = \text{vinkeln mellan fartvektor och observationsriktning (snedtittning, squint)} \end{cases}$$

ekv. 11. Approximativ upplösning för SAR mot markfast scen.

I stråkmod utnyttjas normalt en stråklängd motsvarande det belysta målområdet. Tvärsupplösningen kan därmed skrivas enligt ekv. 12.

$$\begin{cases} s = \frac{r \Delta \theta_{ant}}{\sin[\varphi_{sq}]} \\ \Delta x = \frac{\lambda r}{2r \Delta \theta_{ant}} = \left( \text{och med } \Delta \theta_{ant} \approx \frac{\lambda}{d_{ant}} \right) = \frac{d_{ant}}{2}; \end{cases}$$

där

$$\begin{cases} d_{ant} = \text{aperturbredd i observationsriktningen} \\ \lambda = \text{våglängd} \\ \Delta \theta_{ant} = \text{antennens lobbredd} \end{cases}$$

ekv. 12. Approximativ upplösning för SAR i stråkmod.

Vi noterar att vi i detta fall får en avståndsoberoende upplösning där banlängden  $s$  växer proportionellt mot avståndet  $r$ . Vid en given flyghastighet växer även kravet på koherenstid med banlängden. Om koherenstiden emellertid är begränsad är detta ej möjligt över ett visst avstånd vilket medför att upplösningen därefter blir proportionell mot avståndet. För det fall att

koherenstiden begränsas av fokalhastigheten erhålls ett annat samband mellan upplösning och avstånd, jämför ekv. 10 och ekv. 13.

$$\left\{ \begin{array}{l} s = v_x t_{koh}; \\ v_{fm} t_{koh} \leq \frac{\Delta x}{2}; \text{ villkor för koherent signalbehandling vid linjär rörelse} \\ \Delta x \geq \sqrt{\frac{v_{fm} \lambda r}{v_x \text{Sin}[\varphi_{sq}]}}; \text{ där} \\ t_{koh} = \text{koherenstid} \\ v_x = \text{radarplattformens hastighet} \\ v_{fm} = \text{maximal fokalhastighet för rörligt mål} \end{array} \right.$$

ekv. 13. Koherenstid, upplösning och fokalhastighet

För att man med SAR-metoder skall kunna generera en användbar apertur måste utsändning och mottagning av radarsignaler längs flygbanan utföras med ett intervall mindre än en viss övre gräns eller samplingsavstånd. Vid en koherent behandling av radarreflexer från rörliga mål måste vi i beräkningen av intervallet ta hänsyn till radarplattformens och målets hastighetsförhållande. Intervallet kan därvid beräknas enligt ekv. 14.

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta s = \frac{\lambda/2}{\text{Sin}[\varphi_{sq}] \Delta \theta_{ant} + 2 \frac{v_m}{v_x}} = \left( \text{och med } \Delta \theta_{ant} \approx \frac{\lambda}{d_{ant}} \right) = \frac{d_{ant}/2}{\text{Sin}[\varphi_{sq}] + 2 \frac{v_{mr} d_{ant}}{v_x \lambda}}; \\ \text{Lim} \left[ \frac{\Delta s}{v_m \rightarrow 0} \right] = \frac{d_{ant}}{2 \text{Sin}[\varphi_{sq}]}; \end{array} \right.$$

där

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta s = \text{samplingsintervall för komplext sampel} \\ v_{mr} = \text{målets max närmandehastighet} \\ v_x = \text{radarplattformens hastighet} \end{array} \right.$$

ekv. 14. Approximativt samplingsintervall för målsken med rörliga mål.

Vi lägger märke till att samplingsavståndet blir oberoende av plattformens hastighet om  $v_m = 0$ , då även avståndet motsvarar upplösningen vid stråckmod, jämför ekv. 12.

Den takt med vilken information om en målsken eller enstaka mål kan uppdateras har stor betydelse för de användningsområden som är möjliga. Vi kan uppskatta den möjliga takten med vilken en fix målsken och rörliga mål kan förnyas enligt ekv. 15.

$$\left\{ \begin{array}{l} f_{fix} = \frac{v_x}{s} = \frac{2v_x \Delta x \text{ Sin}[\varphi_{sq}]}{\lambda r}; \text{ och } f_{koh} = \frac{1}{t_{koh}}; \\ \text{där} \\ f_{fix} = \text{datatakt för förnyelse av fix målsken} \\ f_{koh} = \text{datatakt vid begränsad koherenstid (rörligt mål)} \\ v_x = \text{radarplattformens hastighet} \end{array} \right.$$

ekv. 15. Approximativ datatakt

Datatakten ger även en undre gräns för informationens aktualitet  $1/(2f_i)$  där  $i = fix, koh$ .

En undre gräns för pulsrepetitionsfrekvensen (PRF) kan utgående från samplingsintervallet enligt ekv. 14 uppskattas från plattformens hastighet enligt ekv. 16. Denna PRF motsvarar den för en enkanalig "vanlig" SAR. En SAR med DPCA för två antennlobber (två kanaler) medför en dubbling av frekvensen medan en DPCA för tre eller fler antennlobber bibehåller PRF.

$$\left\{ \begin{array}{l} f_{prf} = \frac{v_x}{\Delta s} = \frac{2v_x \left( \sin[\varphi_{sq}] + 2 \frac{v_{mr} d_{ant}}{v_x \lambda} \right)}{d_{ant}}; \\ \lim_{v_{mr} \rightarrow 0} \left[ f_{prf} \right] = \frac{2v_x \sin[\varphi_{sq}]}{d_{ant}}; \\ \lim_{v_x \rightarrow 0} \left[ f_{prf} \right] = 4 \frac{v_{mr}}{\lambda}; \end{array} \right.$$

ekv. 16. Approximativ pulsrepetitionsfrekvens

Vi lägger märke till att målets maximala närmandehastighet ökar i betydelse då förhållandet mellan hastigheterna ( $v_{mr}/v_x$ ) växer relativt lobbredden ( $\lambda/d_{ant}$ ). För plattformshastigheten  $v_x = 0$  erhålls det normala uttrycket för en markfast MTI-radar.

Radarsystemets entydiga mätavstånd erhålls enligt ekv. 17.

$$\left\{ \begin{array}{l} r_m = \frac{c}{2f_{prf}} = \frac{c d_{ant}}{4v_x \left( \sin[\varphi_{sq}] + 2 \frac{v_{mr} d_{ant}}{v_x \lambda} \right)}; \\ \text{där} \\ r_m = \text{max entydigt mätavstånd} \end{array} \right.$$

ekv. 17. Approximativt mätavstånd.

Approximativt mätavståndet för vanlig SAR och DPCA med tre antenner.

Genom SAR med DPCA erhålls en GMTI-funktion som undertrycker markekon samtidigt som rörliga mål framhävs. Vid DPCA måste dock vissa villkor vara uppfyllda vilka påverkar radarsystemets dimensionering, jämför ekv. 18.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{k_i v_x}{f_{prf}} = \Delta s_{DPCA} = k_i \Delta s; \\ \text{där} \\ k_i = 2,1; \text{ för } i = 1,2 \text{ motsvarande DPCA med 2 resp } > 2 \text{ antenner} \\ \Delta s_{DPCA} = \text{samplingsintervall vid DPCA} \end{array} \right.$$

ekv. 18. DPCA-villkor

Separationen mellan antennerna måste anpassas till önskat samplingsavstånd. Vid normal sidtittande SAR är separationen i rumsled ca en halv antennbredd. Vid DPCA med två antenner blir separationen ca 1/4 antennbredd. Separationen kan mekaniseras t ex genom att montera antennerna åtskilda i höjddled eller genom ett gruppantennutförande med flera fokus. Då separationen mer eller mindre är mekaniskt bestämd måste justering med hänsyn till ändringar i flyghastigheten vanligen göras genom att ändra pulsrepetitionsfrekvensen.

Prestanda avseende klotterundertryckning begränsas i praktiken av ofullkomligheter i mätsystem och mätprocedur samt markomgivningens avvikelser från hypotesen om fasta ekon.

Möjligheterna att se ett mål beror på kontrasten mellan mål och målomgivning eller signal till klotterförhållandet, S/C. Upptäckt av ett rörligt mål efter ett MTI-filter beror på rörelserna hos belysta markekon, målets närmandehastighet samt MTI-filtrets egenskaper. Den genomsnittliga förbättringen som ett MTI-filter ger brukar betecknas förbättringsfaktor, "improvement factor". Denna faktor definieras som förhållandet mellan S/C vid utgången respektive ingången till filtret medelvärdesbildat över alla hastigheter.

Ett enkelt MTI-filters amplitudsvar som funktion av närmandehastigheten ges i ekv. 19.

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{dBA}[v_r] = 10 \text{Log} [10, \text{Abs} [ \text{Exp} [ j\theta_{\Delta}[v_r] ] - 1 ] ]; \\ \text{och} \\ \theta_{\Delta}[v_r] = \frac{4\pi v_r \Delta s_{DPCA}}{\lambda v_x}; \end{array} \right.$$

där

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{dBA} = \text{amplitudsvar för enkelt MTI - filter} \\ \theta_{\Delta} = \text{fasskillnad mellan konsekutiva mätningar i visst antennläge} \\ v_r = \text{målets radialhastighet} \end{array} \right.$$

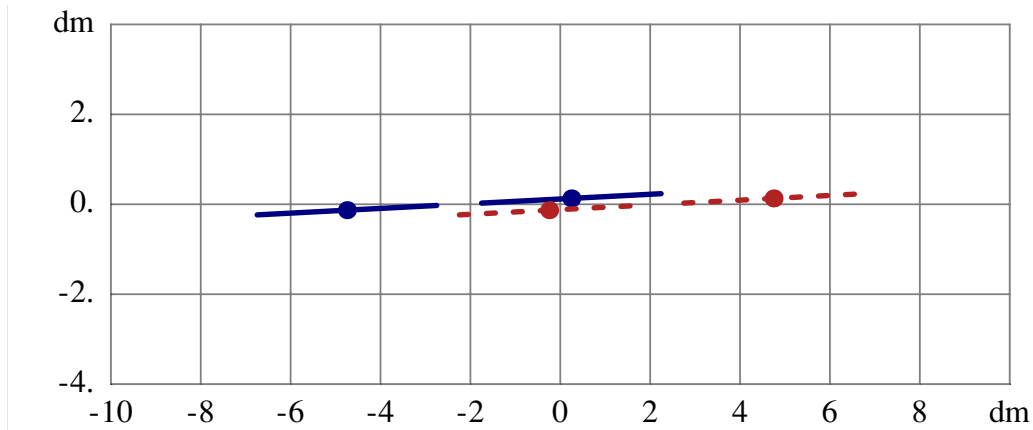
ekv. 19. Amplitudsvar för enkelt MTI-filter

Ett radarsystem kan bl.a. uppvisa olikheter mellan antennlobar vilket nedsätter prestanda. Sådana olikheter kan utöver olikheter mellan antennerna själva bero på olikheter i omgivningen relativt de två antennlägena. Den antennberoende begränsningen av prestanda kan beräknas enligt ekv. 20, se kap. 16 [1]. Prestanda är här uttryckt som utsläckningskvot, "cancellation ratio", dvs. förhållandet mellan klottereffekt före och efter filtrering.

$$\left\{ \begin{array}{l} CR = 10 \log \left[ \frac{1}{1 - \rho} \right]; \\ \rho = \frac{(\int G_1^2[\theta] G_2^{*2}[\theta] d\theta)^2}{\int G_1^4[\theta] d\theta \int G_2^4[\theta] d\theta}; \\ \text{där} \\ CR = \text{"cancellation ratio"} \end{array} \right.$$

ekv. 20. Cancellation ratio

En ytterligare begränsning av prestanda erhålls vid en felaktig anpassning av pulsperiod relativt antennseparation och flyghastighet samt en felaktig attityd eller orientering av plattform relativt hastighetsvektor, jämför figur 13.



figur 13. Exempel på hastighets och attitydfel vid DPCA

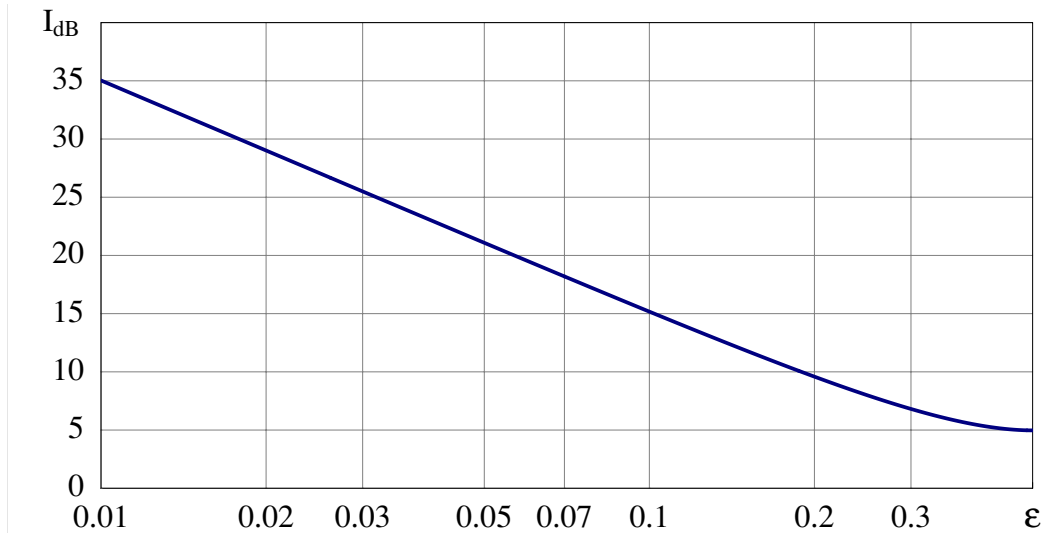
Antennsystemets lägen vid en första och andra tidpunkt är markerade med blått respektive rött. Vid ideal DPCA skall den främre blå delantennen sammanfalla med den bakre röda.

En felaktig flygbana kan i viss utsträckning korrigeras genom att införa faskorrekationer motsvarande autofokus i normal SAR. Kvarstående fel kommer dock att reducera prestanda enligt ekv. 21.

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{DPCA-err} = 10 \text{Log} \left[ 10, \frac{\pi}{\text{Sin}[\pi \epsilon]^2} \right]; \\ \text{där} \\ I_{DPCA-err} = \text{förbättringsfaktorn som funktion av relativt fel i DPCA-villkor} \end{array} \right.$$

ekv. 21. Begränsning av förbättringsfaktorn vid fel i DPCA-villkor.

Ett fel på 1 % i DPCA-villkoret ger en begränsning av förbättringsfaktorn till ca 35 dB, jämför figur 14.



figur 14. Begränsning av förbättringsfaktorn p g a fel i DPCA-villkor.

Förutom ofullkomligheter i mätsystem och mätförfarande tillkommer förhållandet att markbakgrunden ej är en samling ideala fasta mål utan uppvisar avvikelser t ex vinddrivna rörelser hos träd, buskar och lövverk.

En allmän empirisk modell för att beskriva vinddrivet effektspektrum för vegetationstäckta ytor ges i ekv. 22, jämför kap. 6 i [10].

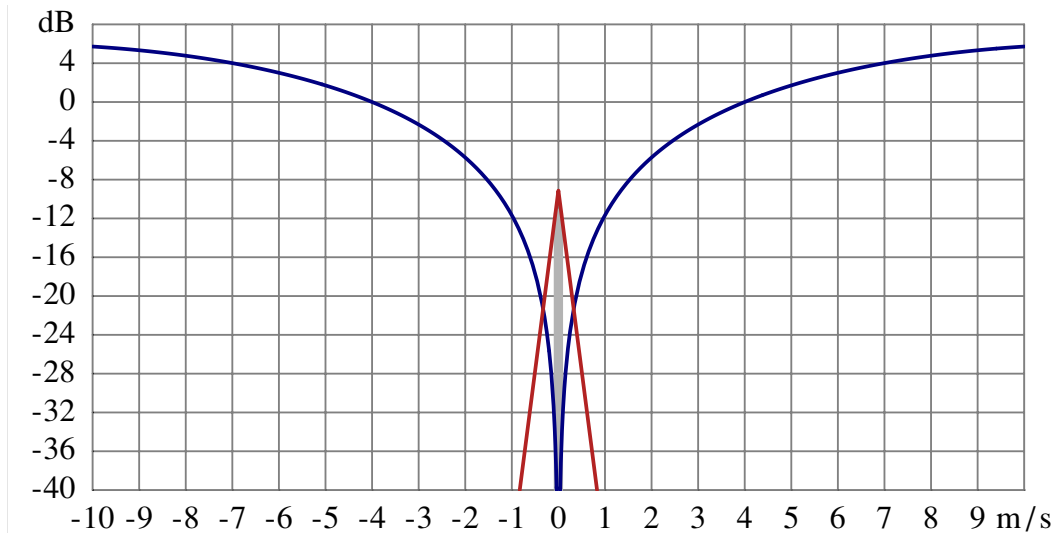
$$\left\{ \begin{array}{l} p_{tot}[v] = \frac{r}{r+1} \delta[v] + \frac{1}{r+1} p_{ac}[v]; \\ p_{ac}[v] = \frac{\beta}{2} \text{Exp}[-\beta|v|]; \\ \beta = \frac{9.542}{\text{Log}[10,w] + 0.4147}; \\ r = 489.8 w^{-1.55} f_0^{-1.21}; \end{array} \right.$$

där

$$\left\{ \begin{array}{l} p_{tot}[v] = \text{klotrets hastighetsspektrum} \\ \delta[v] = \text{hastighetsspektrum för fast eko (impulsfunktion)} \\ p_{ac}[v] = \text{hastighetsspektrum för rörligt dopplerspridd eko} \\ \beta = \text{formparameter} \\ r = \text{förhållandet mellan fast och dopplerspridd del} \\ w = \text{vindhastighet i (m/s)} \\ f_0 = \text{arbetsfrekvens (GHz)} \end{array} \right.$$

ekv. 22. Modellering av effektspektrum för vinddrivet vegetationsklotter

I figur 15 ges ett exempel på amplitudsvaret för ett enkelt MTI-filter samt vegetationsklotter med en specifik radarmålarea på  $-10$  dB som har en dopplerspridning motsvarande trädbevuxna kullar vid vindhastigheten  $5$  m/s. Filtret är dimensionerat för en plattformshastighet på  $100$  m/s och en maximal målhastighet på  $10$  m/s. Övriga parametrar är antennbredd  $75$  cm, frekvens  $10$  GHz och snedtitning  $90^\circ$  dvs. en rent sidtittande radar.



figur 15. Amplitudsvaret för ett enkelt MTI-filter.

Exempel på amplitudsvaret för ett enkelt MTI-filter samt hastighetsspridning för reflexer från vegetation. Amplitudsvaret återges med blå kurva medan den del av markreflexen som uppvisar en hastighetsspridning indikeras med röd kurva. Den del av vegetationsreflexen som utgör ett fasteko uppträder som en impuls vid 0 och återges med en grå stapel.

Förbättringsfaktorn för MTI-filter och klotterfall enligt figur 15 begränsas av hastighetsspridningen till ca  $63$  dB.

Bland öppet redovisade experimentella system återfinns exempel på undertryckning av markklotter på ca  $20 - 30$  dB, jämför [6] och [7].

En förutsättning för koherent signalbehandling har antagits vara att målet rör sig på en rakbana med konstant hastighet. Om ett mål processeras som en fast markscen eller som ett mål tillhörande ett

visst hastighetsintervall kommer koherenstiden för upptäckt att begränsas av förhållandet mellan det fokuserade målets hastighet i bildplanet och vald upplösning enligt ekv. 10. Detta ger sedan sambandet mellan minsta upplösning och spaningsavstånd enligt ekv. 13. Efter målupptäckt kan man eventuellt anpassa hastighetsintervall inklusive autofokus för separat signalbehandling av enskilda mål. Detta för att medge ytterligare upplösning och målanalys. För markmål kommer koherenstiden normalt inte att begränsas av mätsystem och mätförfarande utan gränsen sätts snarare av målets oregelbundna rörelser, jämför avsnitt 8.

## 8. Koherenstid för SAR mot rörliga markmål

I det följande görs ett försök att studera koherenstiden för SAR mot rörliga markmål genom att utnyttja treaxliga rotationsdata från mätningar utförda i England [11]. I arbetet återfinns exempel på några olika fordons attityd som funktion av tiden. Observationerna har utförts under körning på olika underlag som plant spårigt och gropigt fält (a), tvärgående spår i grovt grus (b) och terräng (c). Fordonen är endast schematiskt angivna och betecknade som stort bandgående pansarfordon (1), medelstort bandgående pansarfordon (2) och mindre militärt hjulfordon (3).

Avsikten är här att ge en ungefärlig och praktisk uppfattning om problemet. De mätta attitydförändringarna som uppvisar både stokastiska, regelbundna och bandbegränsade inslag har efter figurer i [11] modellerats som sinusvågor med anpassad amplitud och frekvens. Tre olika vågformer för pitch, roll och gir har ansatts vilka beror av fordon, underlag och körhastighet.

$$\begin{cases} head[t] = A_h \sin\left[\frac{2\pi t}{T_h} + \phi_h\right]; \\ ptch[t] = A_p \sin\left[\frac{2\pi t}{T_p} + \phi_p\right]; \\ rll[t] = A_r \sin\left[\frac{2\pi t}{T_r} + \phi_r\right]; \end{cases}$$

där

$$\begin{cases} head = \text{kurs} \\ ptch = \text{pitchvinkel} \\ rll = \text{rollvinkel} \\ A_i, T_i, \phi_i = \text{amplitud, periodtid resp. fasvinkel} \end{cases}$$

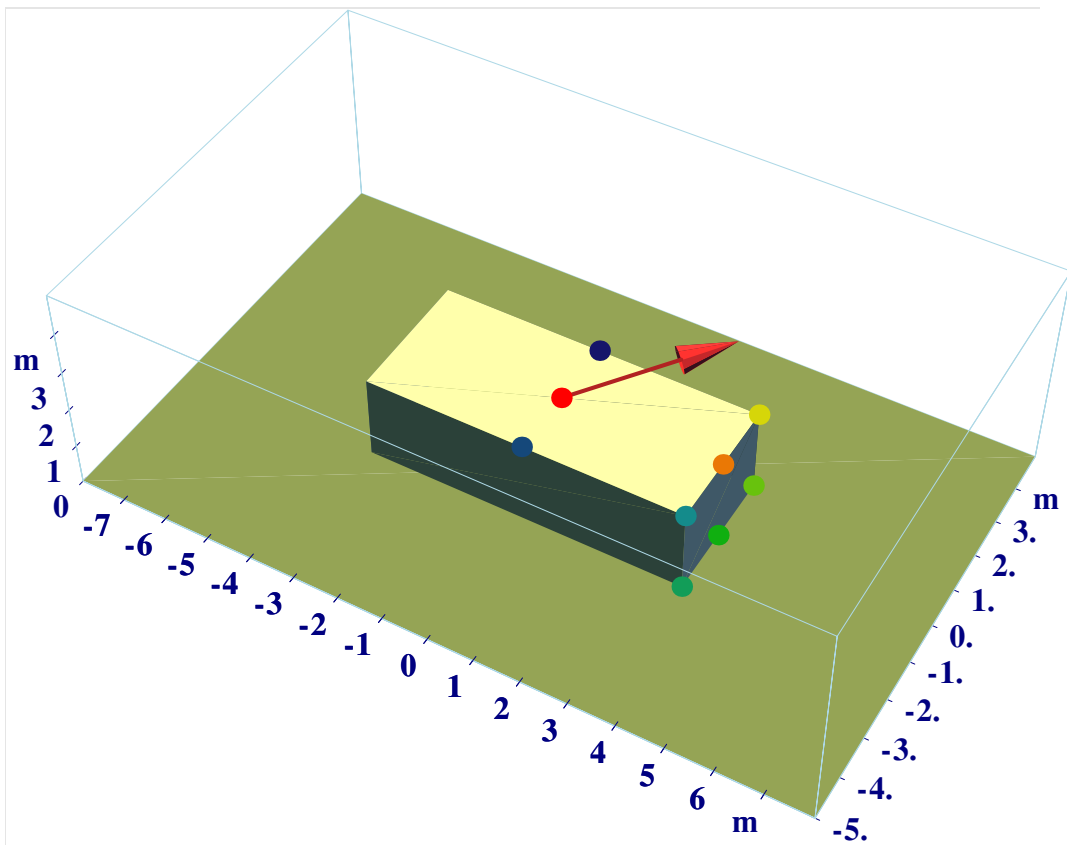
ekv. 23. Enkel attitydmodell för fordon

För att studera möjlig koherenstid för ett visst fall har först lämpliga dimensioner för aktuellt fordon ansatts. Fordonet har approximerats med en lådform. Därefter har en följepunkt ansatts mitt på lådans översida. Ett antal reflexpunkter och en observationsriktning har valts, jämför tabell 4 och figur 16.

Beteckning	Parameter	Marktyp		
Fordon	1	a	b	c
Dimensioner	Lxbxh = 7x3x2 m			
Hastighet		4–6 m/s	4–6 m/s	4–6 m/s
$A_h$	Giramplitud	20°	10°	30°
$A_p$	Pitchamplitud	4°	2°	6°
$A_r$	Rollamplitud	2°	1°	1°
$T_h$	Girperiod	15 s	15 s	20 s
$T_p$	Pitchperiod	1 s	1 s	1 s
$T_r$	Rollperiod	2 s	2 s	2 s
$\phi_i$	Fasläge	slumpat	slumpat	slumpat

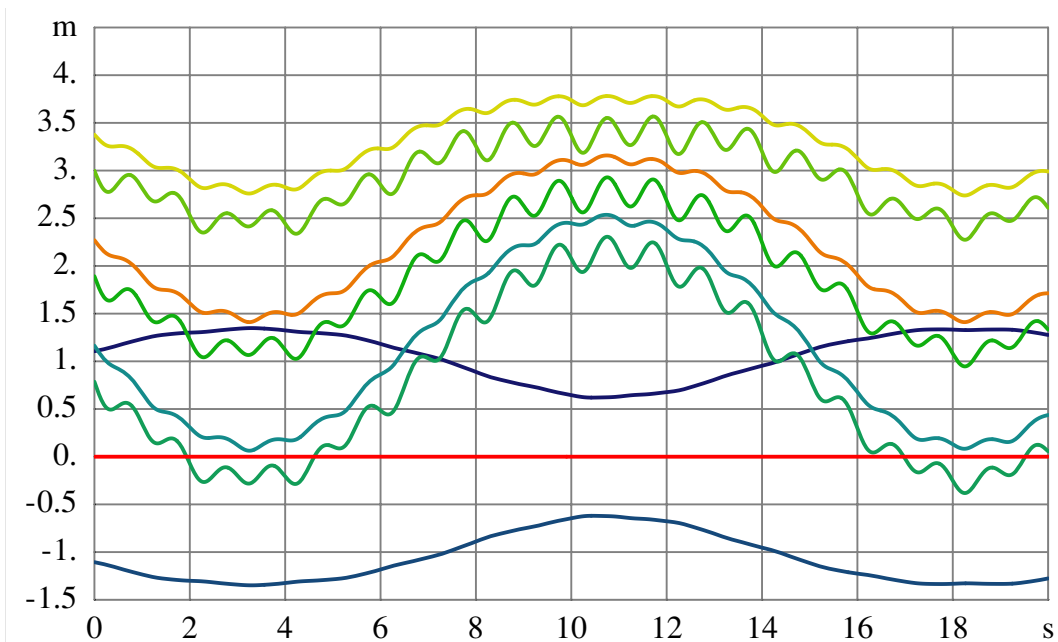
tabell 4. Parametrar avseende dimensioner och rotationsrörelser för ett ”större bandgående pansarfordon”





figur 16. Geometri för observation av rotationsbetingade avståndsvariationer för olika reflexpunkter (punkter) i viss observationsriktning, i exemplet med bäring  $-45^\circ$  och elevation  $10^\circ$  (röd pil).

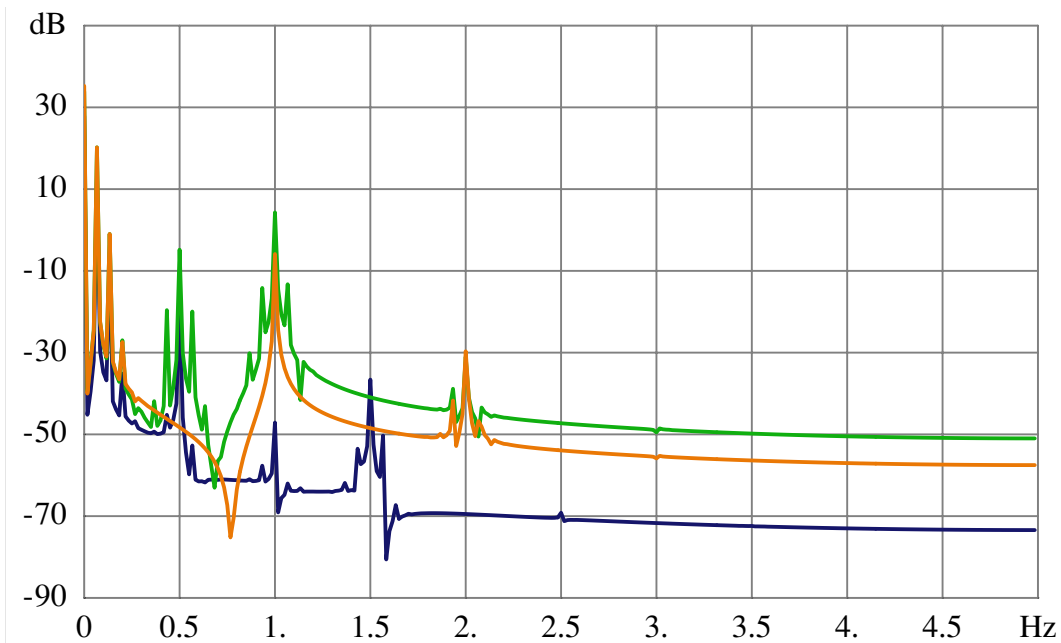
Genom att beräkna reflexpunkternas projektion på observationsriktningen under ett tidsintervall kan avståndsvariationen relativt följepunkten studeras. Denna beräkning exemplifieras med parametrar enligt tabell 4 för marktypen a och för reflexpunkter samt observationsriktning (bär  $-45^\circ$ , el  $10^\circ$ ) enligt figur 16, jämför figur 17.



figur 17. Några reflexpunkters projicerade avstånd under ett 20 s tidsintervall. Kurvornas färgkod korresponderar mot reflexpunkt med motsvarande färg i figur 16.

De i figuren följda reflexpunkterna korresponderar mot de i figur 16 markerade punkterna, där punkter och kurvor givits en gemensam färgkod. Beroende på en reflex läge relativt den aktuella

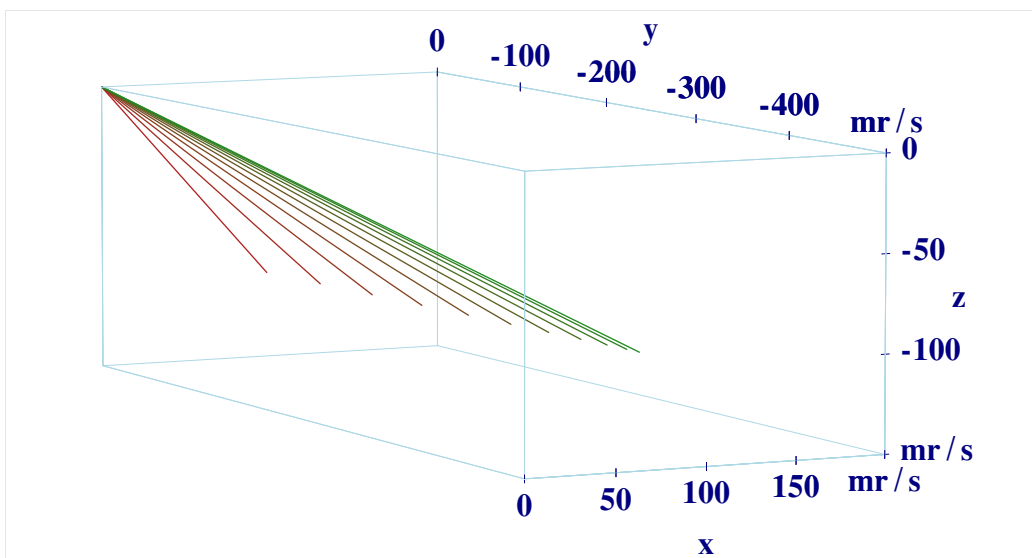
rotationen samt observationsriktningen kommer de olika rotationskomponenterna att sätta en individuell prägel på reflexernas avståndsvariation. Rotationen i girled slår tydligt igenom i alla reflexpunkter utom naturligtvis i följepunkten (röd linje) som i analysmodellen ligger på rotationsaxeln. Rotationen i pitch syns i alla punkter utom de blå punkterna på sidorna eftersom de ligger på denna rotationsaxel. Rotationen i roll kan skönjas svagt i de blå sidopunkterna. Den återfinns även i övriga punkter men är svår att upptäcka utan fouriertransformering, jämför figur 17 och figur 18.



figur 18. Absolutvärdet av avståndsvariationens FFT

10-logaritmen av absolutvärdet av avståndsvariationens FFT. Kurvorna för tre reflektorer är indikerade med färgkod enligt tidigare, jämför figur 17.

För att ge en uppfattning om rotationens föränderlighet i tiden är rotationsaxeln, dvs. rotationens tidsderivata, för ett antal konsekutiva tider avbildad i figur 19.

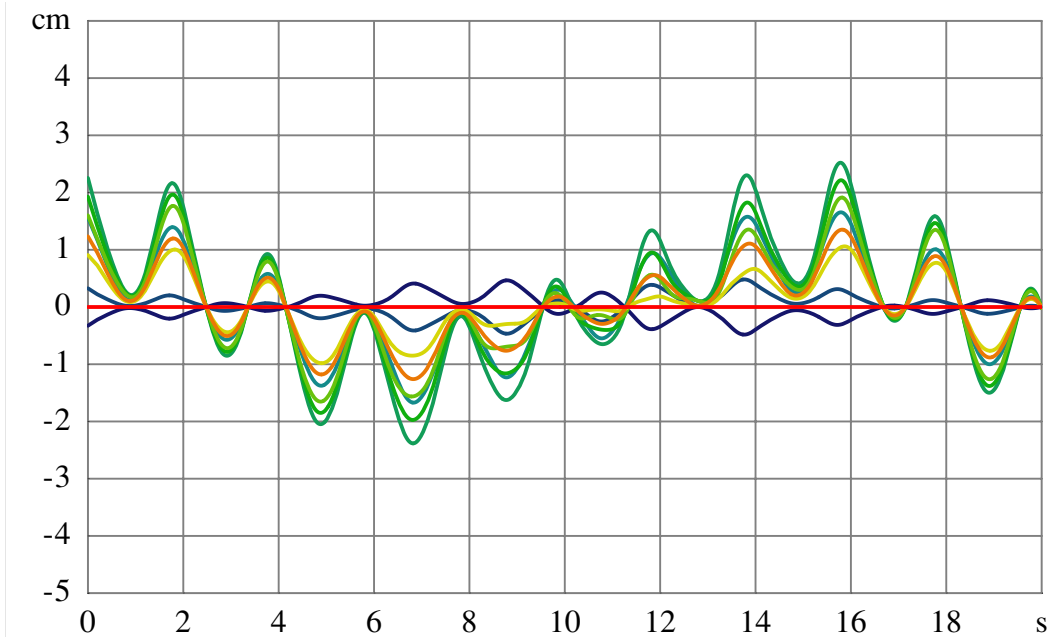


figur 19. Rotationsaxeln eller rotationens tidsderivata

Ett exempel på rotationsaxelns variation under ett kort intervall från 9 till 9.2 s återges färgkodat från grönt till rött i steg om 0.02 s. Exemplet visar en snabba variation som komplicerar en koherent signalbehandling.

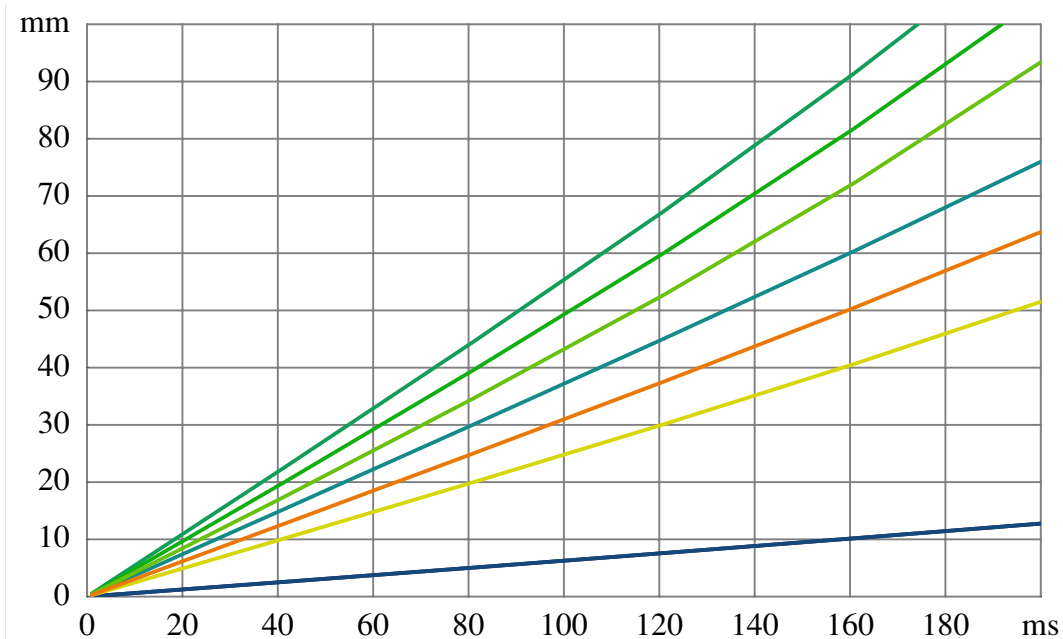
Vid bildalstring i SAR mot en fast scen alstras scenrotationen genom den egna flygbanan och därmed är rotationen känd med en rotationsaxel som alltid är vinkelrät mot aktuell observationsriktning. Bildalstring av ett mål under linjär translation med konstant fart

korresponderar mot föregående fall men med okänd flyghastighet. Ett rörligt roterande mål ger upphov till en aspektvinkelvariation med både okänd rotationshastighet och axelriktning där båda varierar på ett okänt sätt. Snabba och komplicerade variationer begränsar möjligheterna till geometrisk tolkning av en koherent signal. Mätgeometrins variationer kan överstiga kapaciteten hos tillgängliga autofokusmetoder. För stora mål kan även pulsrepetitionsfrekvensen vara otillräcklig. För att approximativt uppskatta gränser för koherenstiden för SAR antas att ett radarsystem kan följa ett mål i en viss följepunkt och att systemet i ett visst ögonblick kan uppskatta aktuell rotationsaxel utan fel. Utgående från rotationsaxeln vid en viss tidpunkt beräknas en reflexpunkts projektion på observationsriktningen för kommande och tidigare tidpunkter.



figur 20. Estimeringsfel för reflektoravstånd

Exempel på estimeringsfel för olika reflektors projicerade läge på observationsriktningen med prediktionstiden 20 ms som funktion av estimeringstidpunkten. De olika reflektoreernas kurvor är färgkodade enligt figur 16 och figur 17.

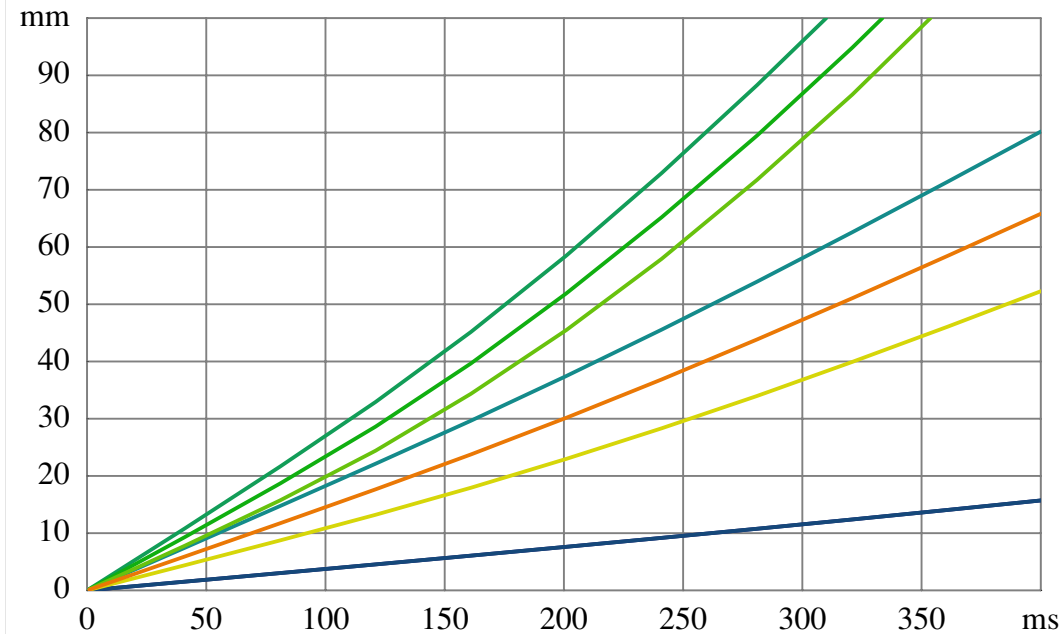


figur 21. Standardavvikelsen för estimeringsfel för fordon (1) och marktyp (a)

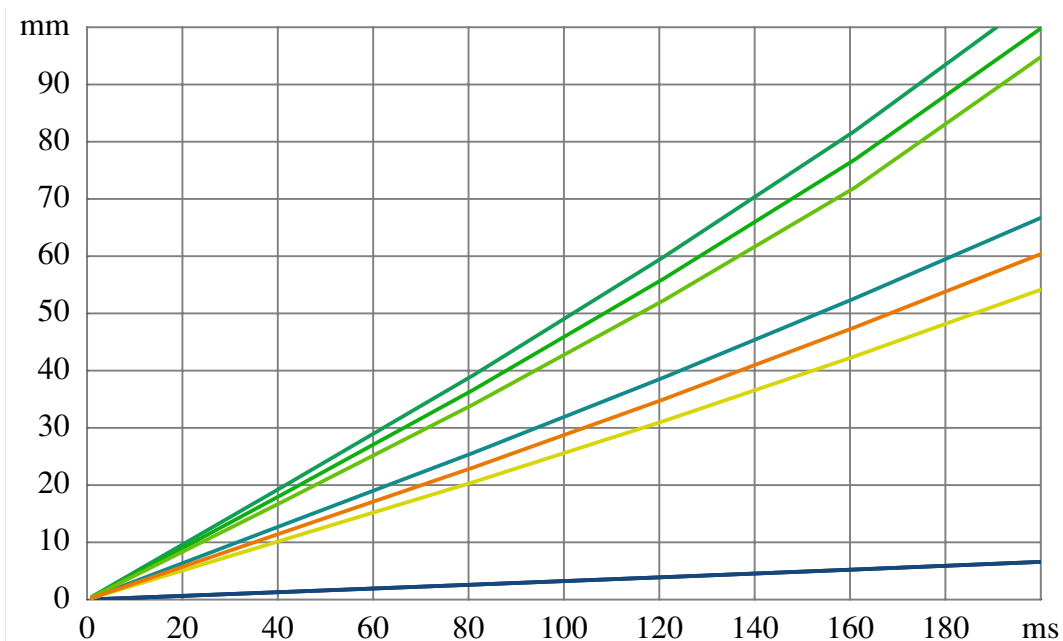
Standardavvikelsen för estimeringsfelet som funktion av prediktionstiden för olika reflektionspunkter färgkodade enligt figur 16.

Samma reflexpunkts projektion beräknas även för vid varje tidpunkt aktuell rotation varefter estimeringsfelet eller skillnaden mellan projektionerna studeras för olika begynnelsepunkter. Ett exempel på estimeringsfelet för en fix prediktionstid för variabel starttid ges i figur 20.

Då estimeringsfelet är beroende både av starttid och prediktionstidens längd kan det vara lämpligt att beräkna felets standardavvikelse över ett lämpligt intervall av starttider som funktion av prediktionstidens längd. Ett exempel på en sådan beräkning illustreras i figur 21.



figur 22. Standardavvikelsen för estimeringsfel för fordon (1) och marktyp (b)  
Standardavvikelsen för estimeringsfelet som funktion av prediktionstiden för olika reflektionspunkter färgkodade enligt figur 16.



figur 23. Standardavvikelsen för estimeringsfel för fordon (1) och marktyp (c)  
Standardavvikelsen för estimeringsfelet som funktion av prediktionstiden för olika reflektionspunkter färgkodade enligt figur 16.

De hittills utförda beräkningarna och figurerna återspeglar förhållanden för fordon av typen 1 och rotationsparametrar för marktypen a, jämför tabell 4, och vidare med en observationsgeometri enligt

figur 16. Om vi utför beräkningar med rotationsparametrarna enligt b och c i tabell 4 erhåller vi resultat enligt figur 22 respektive figur 23.

Betraktar vi nu möjligheterna att i ett koherent radarsystem ge en geometrisk tolkning av mottagen radarsignal bör de olika reflektorernas signalbidrag ha ett fasfel som understiger ca 90°.

Den övre gränsen för fasfel medför en övre gräns för fel i uppskattat mätavstånd motsvarande 1/8 av våglängden ( $\lambda$ ) m h t den dubbla gångvägen. Då estimeringen av målets rotation kan användas för både tidigare och efterföljande tider skall den mot  $\lambda/8$  svarande prediktionstiden dubblas. Om vi antar att standardavvikelsen för felet i predikerat mätavstånd är ett lämpligt mått kan vi direkt avläsa prediktionstiden för olika arbetsfrekvenser eller våglängder.

För en mätgeometri enligt figur 16 och ett mål av typen 1 och för rotationsparametrar enligt tabell 4 kan vi nu ge approximativa koherenstider för olika frekvensband, jämför tabell 5.

			Marktyp		
			a	b	c
Frekvens (GHz)	Band	Våglängd (cm)	Koherenstid (ms)	Koherenstid (ms)	Koherenstid (ms)
1	L	30	137	273	155
3	S	10	46	94	52
5	C	6	28	57	31
10	X	3	14	28	15
16	K <sub>u</sub>	1.9	8.6	18	9.7
35	K <sub>a</sub>	0.86	3.9	8.1	4.4

tabell 5. Approximativa koherenstider

Approximativa koherenstider på olika våglängdsband för studerade mark och rörelsefall.

De resulterande koherenstiderna är alla mycket korta och de är vidare approximativt omvänt proportionella mot frekvensen. De studerade fallen är svåra med körning i hög fart över mycket ojämna ytor och koherenstiderna avser den sämst predikerade av utvalda reflektorpunkter.

I många fall kan det vara rimligt att räkna med längre koherenstider beroende på att fordon framförs med lägre hastighet, underlaget är jämnare, fordonet är mindre, man accepterar sämre koherens för perifera reflektorer mm. Man skulle även kunna tänka sig att man för ytmål predikerar rotationen genom att ansätta periodiska rotationer kring pitch- och rollaxlarna, något som dock bedöms medföra en komplex signalbehandling, jämför även [12].

I föreliggande fall föreslås att koherenstiderna enligt tabell 5 förlängs med en faktor ca 10 - 20 och att preliminära koherenstider beräknas enligt ekv. 24.

$$\left\{ \begin{array}{l} t_{koh} = \frac{3}{f_{GHz}}; \\ \text{där} \\ t_{koh} = \text{koherenstid i s} \\ f_{GHz} = \text{arbetsfrekvens i GHz} \end{array} \right.$$

ekv. 24. Förslag på koherenstid för SAR med GMTI

## 9. Resultat

Föreliggande arbete ger en kort introduktion till MTI och då speciellt SAR med DPCA (Displaced Phase Centre Antennas) och vidare görs uppskattningar av maximal koherenstid dels begränsad av ett måls linjära rörelse dels dess attitydvariationer. Därutöver ges aspekter på användningsmoder och approximativa uttryck avseende vissa av mätgeometrin begränsade prestandaparametrar.

## 10. Referenser

- [1] M. I. Skolnik, "Radar Handbook," 2 ed. New York: McGraw-Hill Publishing Company, 1990.
- [2] W. G. Carrera, R. S. Goodman, and R. M. Majewski, Spotlight Synthetic Aperture Radar: Signal processing Algorithms. Norwood: Artech House, 1995.
- [3] C. V. J. Jakowatz, D. E. Wahl, P. H. Eichel, D. C. Ghiglia, and P. A. Thompson, Spotlight-Mode Synthetic Aperture Radar: A Signal Processing Approach. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [4] R. Klemm, Space-time adaptive processing - principles and applications, vol. 9. Stevenage: The Institution of Electrical Engineers, 1998.
- [5] M. I. Pettersson, "Contribution to Wideband SAR Space-Time Processing, and Radar Remote Sensing of Sea Ice," in Signals and Systems. Gothenburg: Chalmers University of Technology, 2000.
- [6] D. J. Coe and R. G. White, "Moving target detection in SAR imagery: experimental results," presented at Radar'95 Conference, Washington, 1995.
- [7] M. L. Williams, D. Blacknell, A. Blake, D. Coe, K. Grover, N. Harris, C. O. CBE, and R. White, "SAR image processing and analysis at DERA Malvern," presented at World multiconference on systemics, cybernetics and informatics - SCI2000/ISAS 2000, 2000.
- [8] L.-E. Andersson, "Inversion algorithms for wide band SAR image reconstruction," National Defence Research Establishment, Linköping C 30682-3.3, 1992.
- [9] S. Nilsson, "Application of fast backprojection techniques for some inverse problems of integral geometry," in Department of Mathematics. Linköping: Linköping University, 1997, pp. 123.
- [10] J. B. Billingsley, Low-angle radar land clutter - Measurements and empirical models. Norwich: William Andrew Publishing/Noyes Publishing, 2002.
- [11] C. J. Eaton and D. J. Coe, "Motion of ground moving targets and implications for aided recognition," presented at IEE Radar 2002, Edinburgh, 2002.
- [12] P. Lombardo and S. Gelli, "Tracking filters for translational and rotational motion components of high resolution radar targets," presented at Radar 2002, Edinburgh, 2002.