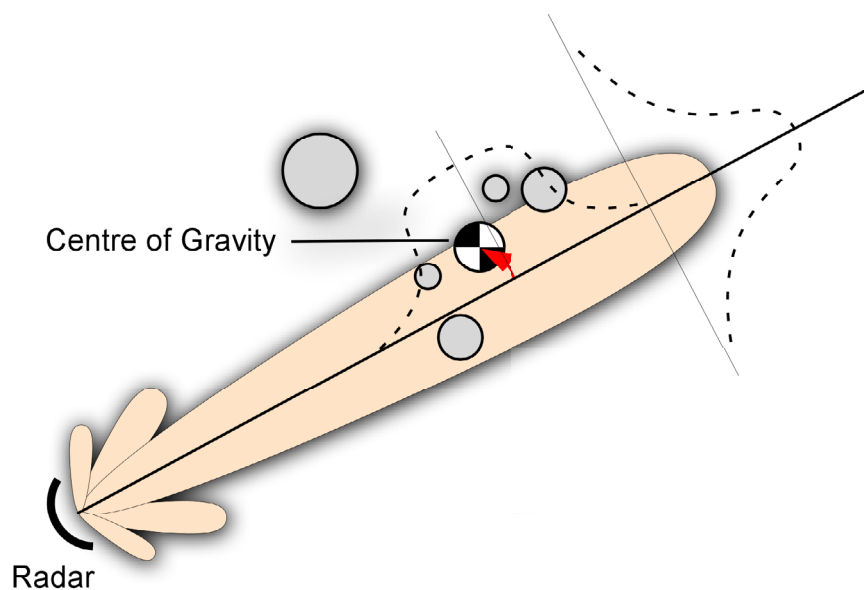


Lars Bergström, Peter Klum, Morgan Nordin, Kjell Rixon

Tyngdpunktsföljning - en förenklad modell av radarföljning



TOTALFÖRSVARETS FORSKNINGSINSTITUT

Ledningssystem

Box 1165

581 11 Linköping

FOI-R--0938--SE

September 2003

ISSN 1650-1942

Metodrapport

Lars Bergström, Peter Klum, Morgan Nordin, Kjell Rixon

Tyngdpunktsföljning - en förenklad modell av radarföljning

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Ledningssystem Box 1165 581 11 Linköping	Rapportnummer, ISRN FOI-R--0938--SE	Klassificering Metodrapport
	Forskningsområde 6. Telekrig	
	Månad, år September 2003	Projektnummer E7015
	Verksamhetsgren 5. Uppdragsfinansierad verksamhet	
	Delområde 61 Telekrigföring med EM-vapen och skydd	
Författare/redaktör Lars Bergström Peter Klum Morgan Nordin Kjell Rixon	Projektledare Lars Tydén	
	Godkänd av Mikael Sjöman	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning Försvarsmakten	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig Peter Klum	
Rapportens titel Tyngdpunktsföljning - en förenklad modell av radarföljning		
Sammanfattning (högst 200 ord) <p>Rapporten presenterar en förenklad simuleringsteknik av radarföljning. Genom att nyttja mekanikens definition av tyngdpunkt, på de målareor en radarsensor har att hantera, har en tidseffektiv sensormodell utvecklats som ger möjlighet att hantera många mål och även telekrigåtgärder. Den förenkling som presenteras kan vara användbar t ex i träningsområden där reelltidskrav föreligger och när telekrigeffekter skall studeras.</p> <p>I rapporten presenteras hur sensormodellen i simuleringssmodellen ChfDuel II (simulering av remsavhakning mot följeradar) är implementerad samt några exempel på olika simuleringar. En jämförelse mellan simulering med tyngdpunktsföljarprincip och verklig radarföljning mot ett remsavhakande flygplan visar att tyngdpunktsprincipen för radarföljning är användbar i detta sammanhang.</p> <p>Metodikerna är en kraftig förenkling av verkligheten och bör därför användas med förstånd. I stället för att modellera en radarsensors konstruktion, modelleras istället sensorns förväntade egenskaper (generisk modell). Metodiken kan dock kombineras med mer detaljerade sensorbeskrivningar där så erfordras.</p>		
Nyckelord simulering, radarföljning, remsor, reelltidssimulering		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 23 s.	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Command and Control Systems P.O. Box 1165 SE-581 11 Linköping	Report number, ISRN FOI-R--0938--SE	Report type Methodology report
	Programme Areas 6. Electronic Warfare	
	Month year September 2003	Project no. E7015
	General Research Areas 5. Commissioned Research	
	Subcategories 61 Electronic Warfare including Electromagnetic Weapons and Protection	
Author/s (editor/s) Lars Bergström Peter Klum Morgan Nordin Kjell Rixon	Project manager Lars Tydén	
	Approved by Mikael Sjöman	
	Sponsoring agency Swedish Armed Forces	
	Scientifically and technically responsible Peter Klum	
Report title (In translation) Centre of Gravity Tracking - a simplified model of radar tracking		
Abstract (not more than 200 words) <p>In many situations there is a need to simplify sensor simulations, for example in real-time simulations, electronic warfare simulations, or when the actual sensor has to deal with a large number of targets.</p> <p>The report presents a simplified method for simulation of radar tracking. By applying the mechanical definition of Centre of Gravity, on the radar cross sections a radar sensor has to handle, an effective sensor model has been developed that gives possibility to handle large number of targets and electronic countermeasures. The implementation of this Centre of Gravity tracking method in the simulation model ChfDuel II (simulation of chaff deception against a tracking radar) and some simulation examples is presented in the report. A comparison between simulations using the ChfDuel II model and results from real radar tracking against a chaff dispensing aircraft indicates that the Centre of Gravity tracking method is a useful approximation in this situation.</p> <p>The method is a considerable simplification of reality and should therefore be used with care. Instead of modelling the construction of the radar sensor, the behavior of the sensor is modelled (generic model). However, it is possible to combine this method with more detailed sensor descriptions when needed</p>		
Keywords simulation, radar tracking, chaff, real-time simulation		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 23 p.	
	Price acc. to pricelist	

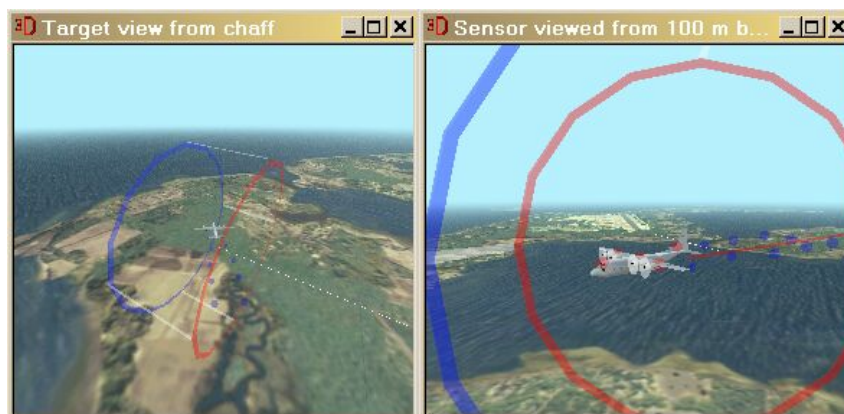
Innehållsförteckning

1	Inledning.....	7
2	Tyngdpunktsföljning.....	8
2.1	Tyngdpunkt.....	9
2.2	Viktsfunktioner	11
2.2.1	Lobbybredden	12
2.3	Följning på tyngdpunkten	14
3	Störskydd.....	15
3.1	MTI.....	15
3.2	Framkantsföljning.....	16
3.3	Accelerationsbegränsning	17
4	Exempel på simuleringar	17
4.1	Viktsfunktioner	18
4.1.1	Lobbybredd.....	18
4.1.2	Avståndslucka	19
4.2	Störskydd	19
4.2.1	MTI.....	19
4.2.2	Framkantsföljning	20
4.3	Servosystem	20
5	Jämförelse verklig kontra simulerad följning.....	21
6	Framtida utvecklingsmöjligheter.....	22
7	Sammanfattning	22
8	Referenser	23

1 Inledning

I många situationer sägs att en radarsensor följer på ”tyngdpunkten” av de målareor den uppfattar. Genom att tolka detta bokstavligen och nyttja mekanikens definition av tyngdpunkt (eller en variant av denna) har en förenklad princip för radarföljning utvecklats. Metodiken är utvecklad på institutionen för Telekrigvärdering och har tidigare beskrivits i sina huvuddrag i [1].

I motmedelsduellsituation, då flera/många mål samtidigt ska hanteras i en sensorkedja, görs på något ställe i sensorkedjan en sammanvägning av de skilda sensorsignaler som varje mål genererar. Denna sammanvägning kan ske sent i sensorns signalkedja (t ex efter en systemspecifik antenn och dopplerföljefilter), eller tidigt genom att applicera följedomäner (t ex azimuth, elevation, avstånd och doppler) över de målareor sensorn har att hantera. Den beskrivna metodiken använder det senare synsättet genom att målareorna viktas inom sensorns följedomäner, varefter en målareatyngdpunkt beräknas som sensorn strävar mot inom de olika följedomänerna.



Figur 1 Ett par scener hämtade från duellsimuleringsprogrammet *ChfDuel II* med ett remsfällande flygplan påläst av en radarsensor. De två cirkelarna markerar radarlobens 3dB-gräns och sträckan mellan dem symboliserar avståndsluckans utbredning med den röda cirkeln närmast sensorn. Flygplanet tänks uppdelat i punktformiga delmål, vilka visas som röda klot i högra bilden medan remsorna utbreder sig som punktmål markerade med blåa klot efter planet. De färgade klotens storlek speglar delmålens radarmålarea. Bilderna presenteras i det grafiska användargränssnittet AFE [2], vilket har utvecklats inom projektet Teknisk Hotsystemanalys.

En fördel med tyngdpunktsföljemetodiken är att den blir mycket effektiv i att hantera en stor mängd av mål, vilket kan vara viktigt i realtidssimuleringssammanhang då telekrigseffekter ska studeras. En nackdel är dock och systemspecifika lösningar kan vara svåra att implementera med metodiken. Dock går det att kombinera den förenklade metodiken med mer systemspecifik implementation där detta krävs. Metodiken är en förenkling av verkligheten och ska därför användas med kunskap om vilka förenklingar som kan göras. I stället för att modellera en radarsensors konstruktion, modelleras istället sensorns förväntade egenskaper (generisk modell).

I denna rapport beskrivs tyngdpunktsföljemetodiken samt hur några störskyddsfunktioner har implementerats i *ChfDuel II*, vilket är en modell för att simulera och studera dueller mellan en fast följeradar och ett remsfällande flygplan, se

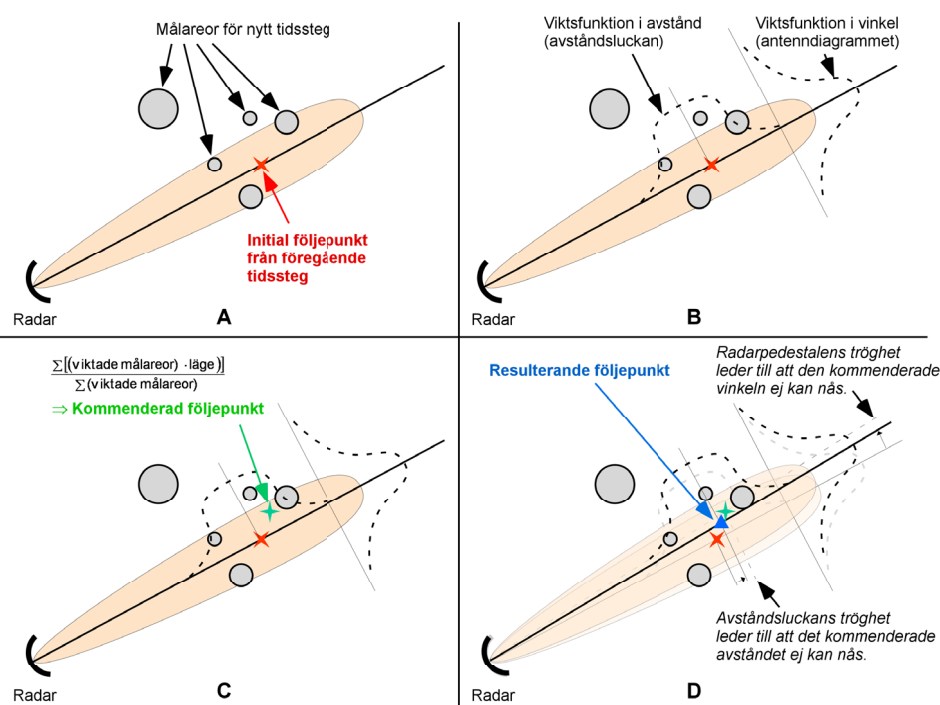
Figur 1. *ChfDuel II* har visat sig ge rimliga avhakningseffekter vid studier av remsfällning från flygplan.

ChfDuel II är utvecklat i simuleringspråket ACSL¹. Vid en simulering med *ChfDuel II* kan användaren mata in data om radarsensorns, huvudmålets och remsornas egenskaper och lägga upp ett remsfällningsprogram för att undersöka under vilka förhållanden som remsinsatsen får eller inte får sensorn att avhakas från målet. En tidigare version av *ChfDuel* (*ChfDuel I*) finns dokumenterad i [3]. *ChfDuel I* är främst till för att stödja remsmätningar och innehåller en ideal målföljning (radarn pekar alltid på målet).

Radarn i *ChfDuel II* följer på de olika delmålets så kallade målareatyngdpunkt, vilket kommer att förklaras närmare i kapitel 2. För att motverka störningen från remsorna har radarsensorn i *ChfDuel II* getts möjlighet att använda olika störskydd, vilka beskrivs i kapitel 3. I kapitel 4 visas resultat från några simuleringar, bl.a. hur en del kritiska parametrar kan påverka resultatet. Dessutom presenteras i kapitel 5 en tabell som jämför resultaten från några verkliga remsdueller med motsvarande körningar simulerade i *ChfDuel II*. I kapitel 6 presenteras några framtida utvecklingsmöjligheter. Avslutningsvis sammanfattas arbetet i kapitel 7.

2 Tyngdpunktsföljning

I *ChfDuel II* används en så kallad tyngdpunktsföljemetod, vilket innebär att radarsensorn inriktas mot och följer på den viktade målareatyngdpunkten av alla delmål, som flygplanet och de fällda remsorna kan tänkas uppdelade i. Metoden beskrivs översiktligt i Figur 2.



Figur 2 Ett tidssteg i den simulerade följesekvensen.

¹ ACSL (Advanced Continuous Simulation Language), se <http://www.acslsim.com>

Händelser i ett simulerat tidssteg (tvådimensionell betraktelse), se Figur 2.

- A: radarn har intagit en följepunkt utgående från tidigare tidssteg i avstånd och sida (vinkel) i ett scenario som innehåller ett antal olika målareor.
- B: Viktsfunktioner appliceras över följepunkten i avstånd och sida. Viktsfunktionerna beskriver följeluckan i avstånd samt antenndiagrammet i sida.
- C: Genom att vikta målareorna med viktsfunktionerna och nyttja definitionen av tyngdpunkt på de viktade målareorna fås en kommenderad följepunkt som radarn vill inta.
- D: Trögheter i radarpedestalen samt i avståndsföljesystemet gör att den kommenderade följepunkten inte uppnås i nästa tidssteg utan en resulterande följepunkt nås. Sekvensen repeteras cykliskt från A där den initiala följepunkten sätts till den resulterande följepunkten från D.

I *ChfDuel II* hanteras all tyngdpunktsberäkning i ett ACSL block medan de skilda servosystemen är separerade i enskilda block.

2.1 Tyngdpunkt

Begreppet tyngdpunkt är hämtat från mekaniken, där den anger en sorts jämviktspunkt, r_{tp} , för en grupp punktmassor och definieras som

$$r_{tp} = \frac{\sum_k r_k \cdot m_k}{\sum_k m_k} \quad \text{med } k\text{:te massan } m_k \text{ placerad i position } r_k \quad (1)$$

I radarfallet är massorna utbytta mot viktade punktmålareor, σ_k , som även kan representera något utbredda delmål. Analogt med formel (1) ges målareatyngdpunkten i form av rymdvektorn r_{tp} genom uttrycket

$$r_{tp} = \frac{\sum_k r_k \cdot \sigma_k^{\text{exp}}}{\sum_k \sigma_k^{\text{exp}}} \quad (2)$$

i vilket vektorn r_k utgör koordinaterna för den k :te viktade målarean, σ_k , som kan vara upphöjd till en konstant exponent, *exp*. Denna sätts normalt till värdet *ett* (den traditionella tyngdpunktsformeln) men för målsökare som favoriserar de dominerande målareorna kan den lämpligen sättas till *två*.

I *ChfDuel II* kan även dopplerfiltrering appliceras med syftet att mål med radiella hastigheter som avviker starkt från det i doppler följda målet skall diskrimineras vid tyngdpunktsbestämningen. Användaren ställer i så fall in frekvensbredden på en så kallad dopplerlucka, som automatiskt centreras över en ”frekvenstyngdpunkt” f_{tp} , beräknad enligt en tyngdpunktsliknande formel

$$f_{tp} = \frac{\sum_k fd_k \cdot \sigma_k}{\sum_k \sigma_k} \quad (3)$$

fd_k är dopplerfrekvensen härrörande från det k :te målets radiella hastighet relativt radarn, $v_{rad, k}$

$$fd_k = \frac{2v_{rad,k}}{\lambda} \quad (3a)$$

där λ är våglängden. Dopplerluckans bredd mäts i Hz och dess position relativt centrumfrekvensen bestämmer vilka frekvenser och därmed associerade radialhastigheter som släpps igenom.

Den viktade målarean, som i [1] kallas för den *effektiva* radarmållytan, beräknas enligt

$$\sigma_k = Konst \cdot G_a^2 \cdot G_r \cdot G_d \cdot \frac{\sigma_{k,nom}}{R^4} \quad (4)$$

där

$\sigma_{k,nom}$ är delmål k 's nominella radarmålarea definierad nedan

R anger avståndet radarsensor – delmål

G_a , G_r , G_d är viktsfunktioner för vinkel, avstånd och dopplerförskjutning, se Figur 2 och kapitel 2.2

$Konst$ är en konstant som kan väljas fritt och ej påverkar tyngdpunktsresultaten men kan användas för normering av avståndet.

Den nominella eller 'inneboende' radarmålarean *i fri rymd*, σ_{nom} , definieras genom radarekvationen, där en och samma radar tänks både sända ut signal till och ta emot den reflekterad från målet:

$$P_m = \frac{P_s \cdot G \cdot \sigma_{nom}}{(4\pi \cdot R^2)^2} \cdot \frac{G \cdot \lambda^2}{4\pi} \quad (5)$$

där

P_m är mottagen effekt

P_s är utsänd effekt

G är antennförstärkningen

λ är våglängden

R är avståndet mellan radar och det belysta delmålet

Den nominella radarmållytan är ett mått på hur stor del av den infallande effekten som återreflekteras till radarn. Detta värde påverkas starkt av vågutbredningsförhållanden om delmålet t.ex. ligger lågt nära en vattenyta men eftersom det här rör sig om fällning från flygplan, kan den nominella arean sättas lika med frirymdsmålarean. I annat fall hade en faktor för att korrigera för denna vågutbredning behövts, den så kallade *M-faktorn*, som skulle bero av aktuell geometri och därmed variera, se [1].

Den effektiva målarean i (4) kan vid jämförelse med (5) ekvivalent definieras som direkt proportionell mot radarns mottagna effekt, P_m , från delmålet. Den är därför kraftigt avståndsberoende som den omvända fjärdepotensen av R , vilket är en direkt spegling av radarekvationens utseende.

Slutligen påverkas den viktade radarmållytan av viktsfunktionerna för vinkel, avstånd och dopplerförskjutning och dessa beskrivs närmare i följande avsnitt.

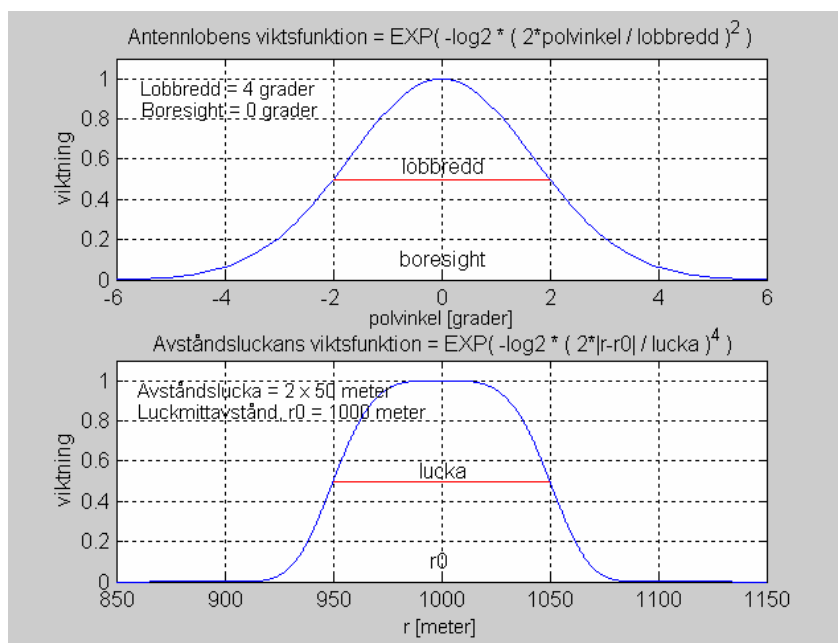
2.2 Viktsfunktioner

Viktsfunktionerna i *ChfDuel II* har valts till det allmänna utseendet nedan (i princip kan vilken passande viktsfunktion som helst användas som avspeglar det aktuella systemets konfiguration, t ex kan G_a ersättas med sensors aktuella antenndiagram).

$$G_a = \exp\left(-\ln 2 \cdot \left(\frac{|2 \cdot \text{polvinkel}|}{\text{lobbredd}}\right)^N\right) \quad \text{i sida (vinkelled)} \quad (6a)$$

$$G_r = \exp\left(-\ln 2 \cdot \left(\frac{|2 \cdot (r_k - r_0)|}{\text{avståndslucka}}\right)^N\right) \quad \text{för avståndet} \quad (6b)$$

$$G_d = \exp\left(-\ln 2 \cdot \left(\frac{|2 \cdot (fd_k - f_0)|}{\text{dopplerlucka}}\right)^N\right) \quad \text{för dopplerförskjutningen} \quad (6c)$$



Figur 3 Viktsfunktionerna för antennloben, G_a , och avståndsluckan, G_r , anges i figuren som exponentialuttryck ovanför tillhörande exempel på parametersatta kurvor. Deras värden är maximala och lika med *ett* när ett delmål ligger exakt i boresight (på antennnormalen) och mitt i avståndsluckan, d.v.s. i detta fall på 1000 meters avstånd. *Lobbredd* och *lucka* definierar viktsfunktionernas bredd på halva höjden (viktning = 0.5) och markerar 3dB-gränsen. För delmål som ligger på halva lobbredden (här = 2°) från boresight eller halva lucklängden (här = 50 meter) från luckmitten har viktningen sjunkit till *en halv*, d.v.s. med 3 dB. Kurvornas lutning genom 3dB-gränserna bestäms av exponenterna längst till höger (2 och 4) i exponentialuttrycken. Ju högre exponenter desto brantare genomgångar. Vid mycket höga exponenter närmar sig viktsfunktionen en fyrkantstvåg med värden nära *ett* innanför 3dB-gränserna och nära *noll* utanför.

Två parametersatta exempel av (6a) och (6b) demonstreras i Figur 3. Generellt gäller att funktionerna är symmetriska kring ett maxvärde lika med *ett* och avtar först långsamt och sedan snabbt mot *noll* utåt ändarna. Vinkelfunktionen G_a blir *ett* när delmålet ligger exakt rätt i boresight, d.v.s. när *polvinkel* är *noll* i (6a) och G_r antar

värdet *ett* så fort delmålet avstånd, r_k , sammanfaller med följepunktens, r_0 , vilket är samma som mitten på avståndsluckan i (6b). Parametrarna *lobbredd* och *avståndslucka* är ett mått på viktsfunktionernas bredd på halva höjden och definierar en 3dB-gräns, se Figur 3. Det innebär att när delmålet avviker i sida med *halva* lobbredden från boresight och därmed är riktat utmed lobkanten, har viktningen G_a sjunkit till *en halv*. Likaså är avståndsluckans längd definierad så att G_r blir *en halv* när målets avstånd sammanfaller med endera kanten på luckan. Exponenten N i formlerna ovan bestämmer hur viktningen fördelas innanför och utanför 3dB-gränsen. Den behöver inte vara ett heltal men måste vara större än noll, för vid $N=0$ omvandlas viktsfunktionen till en konstant. Ju större N blir, desto mer närmar sig viktningen *ett* innanför 3dB-gränsen och *noll* utanför, vilket också innebär att det blir en brantare övergång mellan områdena, se Figur 3. För stora N liknar viktsfunktionen alltmer en fyrkantsvåg. Lägg märke till att G_a förekommer i kvadrat i (4) beroende på att loben dämpar signalen lika mycket vid både sändning och mottagning.

Dopplerviktningen G_d sätts till *ett* när delmålet ligger mitt i dopplerluckan, d.v.s. när dess radiella hastighet relativt radarsensorn enligt (3a) svarar mot luckans inställda mittfrekvens, $fd_k=f_0$ i (6c). Vid dopplerluckans gränshastigheter har viktningen gått ner till hälften eller med 3 dB. Det är endast när dopplerfiltreringen är inkopplad som G_d används vid tyngdpunktsberäkningen för att utesluta delmål med alltför avvikande radialhastighet.

2.2.1 Lobbredden

I viktsfunktionen (6a) för antennloben ingår parametrarna *polvinkel* och *lobbredd*. Polvinkeln är vinkeln mellan boresight och riktningen till målet. Lobbredden för en radar brukar anges med den horisontella och vertikala lobbredden (i grader). Är dessa olika stora, kommer lobbredden att variera med lutningen och vara olika för olika delmål. Parametrarna utreds närmare i Figur 4.

De vinklar som anger ett måls läge, azimuth (az) och elevation (el) relativt boresight (eller sida och höjd) ligger oftast väl under tio grader och det betyder att approximationerna $\cos(v)=1$ och $\sin(v)=v$ kan göras, om vinkeln v mäts i radianer. Betrakta den allra översta rätvinkliga triangeln i Figur 4. Den har kateterna $r \cdot \sin(el)$ och $r \cdot \cos(el) \cdot \sin(az)$ och hypotenusan $r \cdot \sin(pv)$ med polvinkel pv . Pythagoras sats och nämnda approximationer leder till relationen $pv^2 = az^2 + el^2$ för små vinklar, eller uttryckt i parametern *polvinkel*:

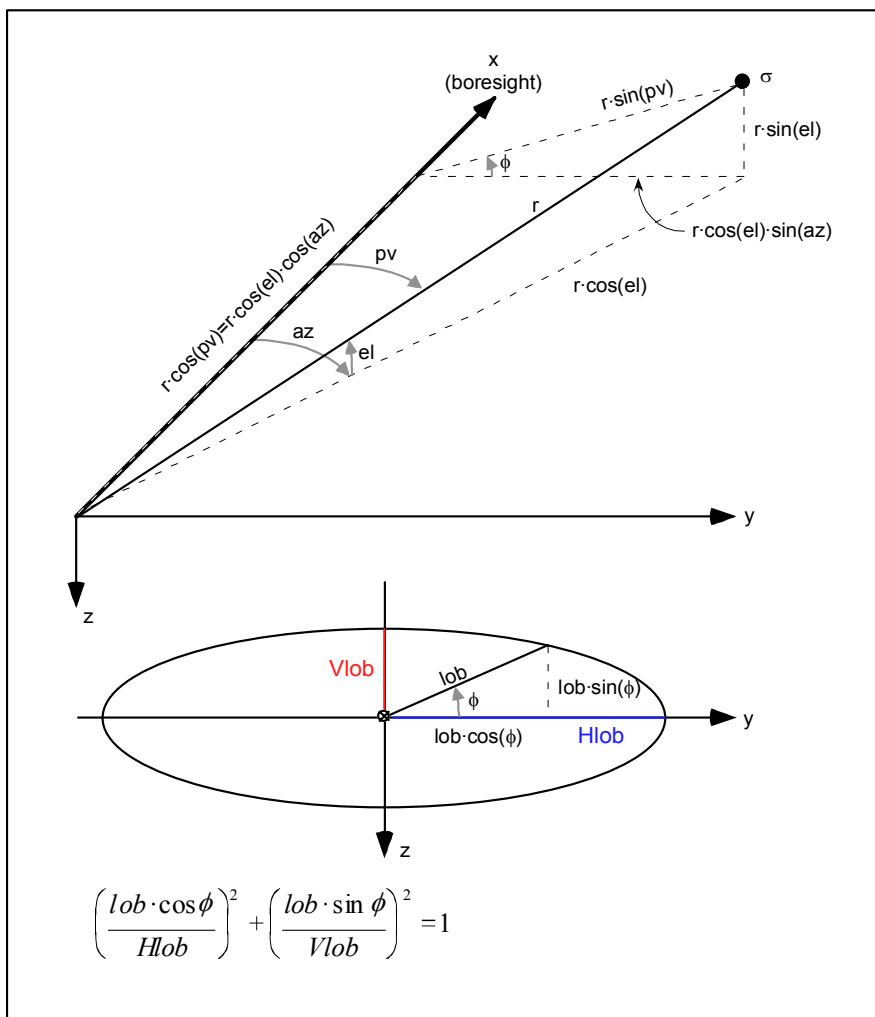
$$polvinkel = \sqrt{az^2 + el^2} \quad (7)$$

Detta förhållande gäller även om vinklarna anges i grader. För vinkeln ϕ i samma triangel gäller att för små az och el är $\tan(\phi) = el/az$. Genom att utnyttja kända trigonometriska formler för hur $\sin(\phi)$ och $\cos(\phi)$ kan uttryckas i $\tan(\phi)$ och därmed i az och el , kan ekvationen för ellipsen längst ner i Figur 4 skrivas om till

$$\frac{polvinkel}{lobbredd} = \sqrt{\frac{az^2}{Hlob^2} + \frac{el^2}{Vlob^2}} \quad (8)$$

Parametrarna $Hlob$ och $Vlob$ är radarsensorns horisontella och vertikala lobbredder medan *polvinkel* och *lobbredd* är figurens pv och lob och desamma som i (6a). Även här gäller formeln vare sig vinklarna uttrycks i radianer eller grader. Formel (8) gäller

egentligen någorlunda exakt bara för små värden på az och el (under 10°) men skulle något delmål med större polvinkel komma med spelar det ingen roll, eftersom det i så fall troligen ligger långt utanför antennloben och av det skälet dämpas bort i tyngdpunktsformeln.



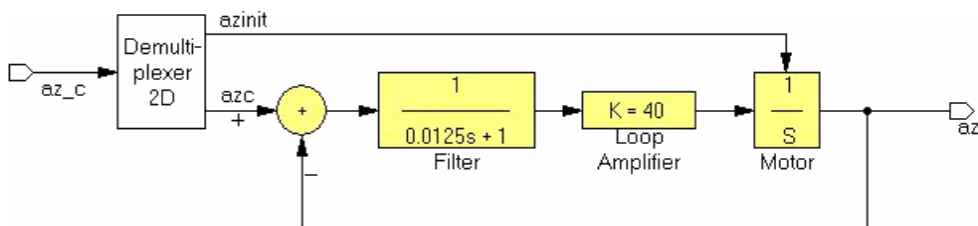
Figur 4 Bestämningen av polvinkeln (pv) och lobbredden (lob) för målet σ . I den övre figuren är radarsensorn placerad i origo med boresight (antennnormalen) riktad utmed x -axeln. Vektorn r pekar ut målet σ . Polvinkeln pv definieras som vinkeln mellan mål och boresight d.v.s. mellan r och x -axeln. Vinklarna az och el beskriver azimut och elevation för målet relativt boresight. Genom att projicera r på boresight dels direkt via pv , dels i två steg via el och az , fås $\cos(pv) = \cos(el) \cdot \cos(az)$ som ger polvinkeln när azimut och elevation är kända. I den undre figuren visas hur lobbredden lob varierar med lutningen ϕ mot y -axeln. Änden på loben beskriver en ellips med y -axeln svarande mot sensors horisontallob $Hlob$ (blått) och z -axeln mot dess vertikallob $Vlob$ (rött). Sambandet mellan parametrarna ges av ellipsens ekvation längst ned i figuren och ur denna kan lob lösas ut. Lutningen ϕ fås ur azimut och elevation från den rätvinkliga triangeln högst upp i den övre figuren. Genom lämpliga projektioner bestäms kateterna till $r \cdot \sin(el)$ och $r \cdot \cos(el) \cdot \sin(az)$ och kvoten mellan dem ger $\tan(\phi)$.

2.3 Följning på tyngdpunkten

När en ny målareatyngdpunkt beräknats, kommenderas radarsensorn att ställa in sig på denna via ett avståndsservo och två vinkelservon, ett för vardera azimut och elevation, se Figur 5. Servona modelleras som enkla återkopplade system med en reglerande filterdel och en integrerande eller verkställande motordel. Så snart ett mål förflyttar sig, kommer radarn på grund av reglersystemens inneboende tröghet i allmänhet inte att uppnå den kommenderade målareatyngdpunkten utan hamnar i stället på den så kallade följepunkten, se Figur 2.

Vinkelservona är i *ChfDuel II* avbildade som andra ordningens återkopplade system och om målet rör sig med V grader per sekund i vinkelled kommer servona att ge upphov till en eftersläpning på V/K grader av följepunkten. K är loopförstärkningen, studera även Figur 5. Avståndsservot i Figur 8 har modellerats med *två* integratorer och detta innebär att följefelet blir *noll* om målet rör sig enbart i radiell led och med *konstant* hastighet. Däremot kommer följepunkten att släpa efter vid en radiell acceleration.

Dopplerservot är modellerat på samma sätt som vinkelservona. I detta fall är det en frekvenstyngdpunkt som dopplerluckans mitt ska ställas in på. Ett mål som rör sig med konstant radiell hastighet relativt sensorn genererar en *konstant* dopplerförskjutning, så i detta fall sammanfaller luckans mitt exakt med den kommenderade frekvenstyngdpunkten.



Figur 5 Modell av ett vinkelservo för azimut eller elevation i form av ett andra ordningens system. Beräkningen av delmålens tyngdpunkt resulterar i ett avstånd och ett par vinklar som ska ställas in. I figuren är det den kommenderade azimutvinkeln eller bäringen som skickas in till servot från vänster som signalen azc . Till höger syns den uppkomna vinkelföljeriktningen az . Skillnaden mellan dessa två blir en felsignal som sänds in i lågpasfilteret med tidsfördröjningen $p=0.0125$ sekunder och vidare till förstärkaren med $K=40$, vars utsignal driver en motor att ställa in antennbäringen så att felet minskar. För ett rörligt mål blir felet aldrig noll med ett andra ordningens servo, utan vid en sidohastighet på V°/sek släpar följepunkten V/K° efter tyngdpunkten, så att en målvinkelhastighet på $10^\circ/\text{sek}$ ger en eftersläpning på 0.25° med $K=40$. Ökat K minskar släpfelet. Lågpasfilteret är inställt för att optimera servots stegsvar, vilket inträffar när $K \cdot p = 1/2$. Detta ger servot en bandbredd på 9 Hz.

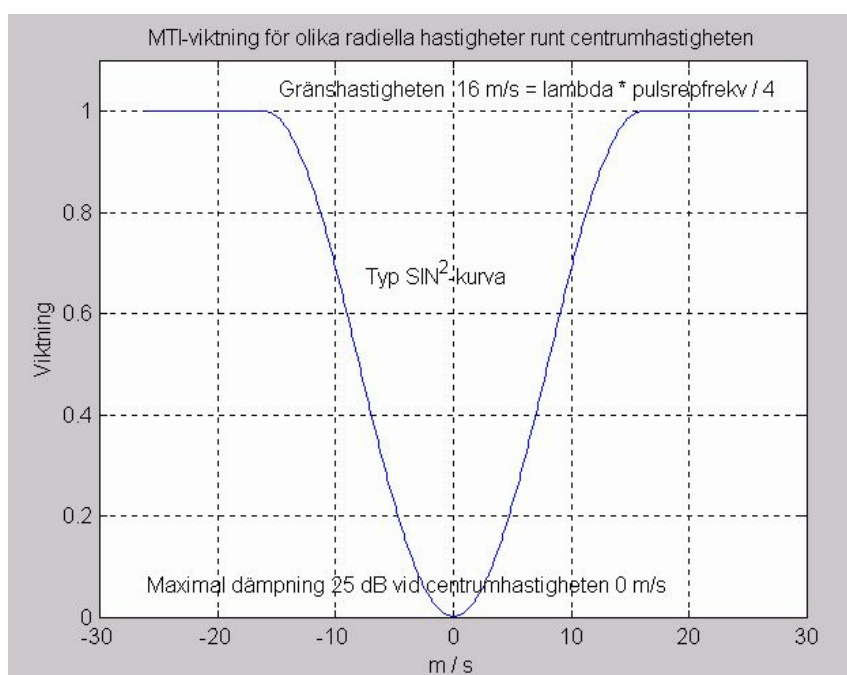
Sammanfattningsvis försöker radarsensorn följa på målareatyngdpunkten r_{tp} i (2) och dopplerfiltret på frekvenstyngdpunkten f_{tp} i (3) men i verkliga system finns en tröghet som gör att följningen för det mesta sker med en viss eftersläpning på den så kallade följepunkten. För radarn är den aktuella följepunkten i vinkel lika med boresight, som inte behöver gå genom tyngdpunkten och i avstånd representeras följepunkten av parametern r_θ i viktsfunktionen (6b). Dopplerfiltrets följefrekvens f_θ i (6c) är den frekvens som dopplerluckans mitt har hamnat på.

3 Störskydd

I ChfDuel II finns tre typer av störskydd i sensorn implementerade: MTI, framkantsföljning och accelerationsbegränsning i avståndsdelen.

3.1 MTI

MTI, Moving Target Indication, innebär att radarn behandlar den mottagna signalen så att denna förefaller filtrerad genom ett bandspärrfilter för hastigheter. Alla delmål med en dopplershift svarande mot en radiell hastighet inom bandspärrområdet dämpas ut mer eller mindre och får en betydligt lägre viktning vid beräkningen av tyngdpunkten.

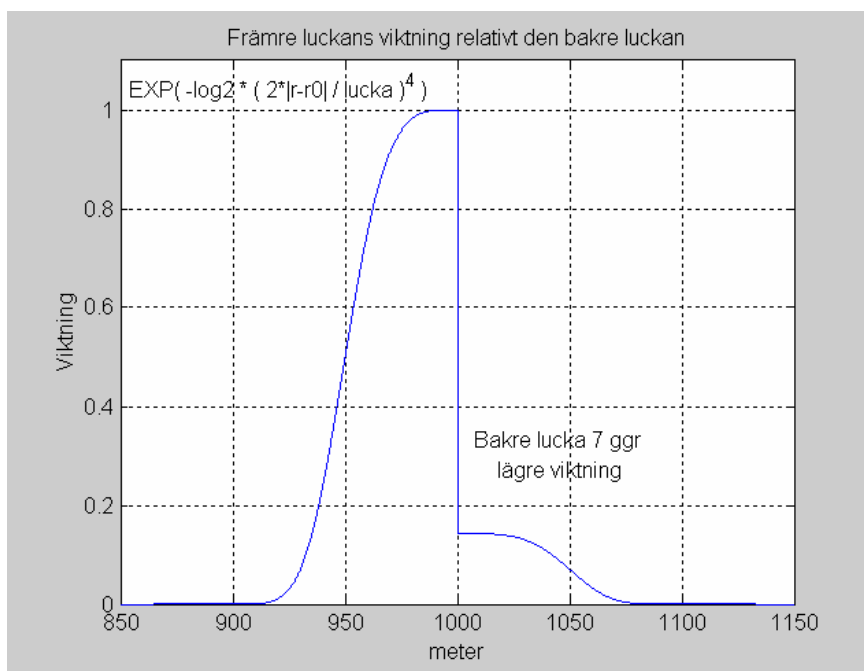


Figur 6 MTI-viktningen inom bandspärrområdet beskrivs i ChfDuel II med en potens av en sinus-kurva, vars minimum läggs vid en specificerad radiell hastighet, centrumhastigheten. Den största dämpningen är i figuren satt till 25 dB vid 0 m/s, vilket motsvarar viktningen 0.0032. Kurvans båda maxima utgör spärrområdets gränshastigheter och övergår därutöver till ett konstant viktsvärde (=1). Kurvan kan göras brantare med ett bredare område med kraftig dämpning genom att ge sinuskurvan en högre potens än figurens två (2). En formel för skillnaden mellan *gränshastighet* och centrumhastighet (=0 m/s) ges upptill i figuren och den beror av parametrarna *lambda* för våglängden och radarns *pulsrepetitionsfrekvens*. Här används värdena 1.8 cm och 3500 Hz.

I modellen anges maximal MTI-dämpning av signalen och vid vilken radiell hastighet denna inträffar, se Figur 6. Dessutom kan man spela med dämpningskurvans branthet och hur brett spärrområdet ska vara, vilket senare beror av radarns pulsrepetitionsfrekvens och våglängden. Funktionen avser mest att kunna sortera bort markklotter men kan också användas för att skilja uppstannande remsor från det rörliga målet.

3.2 Framkantsföljning

Framkantsföljning används för att försvåra avhakning, när ett remsfällande hot närmar sig sensorn (då målet fjärras sig skulle bakkantsföljning mot det remsfällande hotet vara lämpligt, dock är det i realiteten ovanligt och olämpligt om hotet kan tänkas använda aktiv störning). Avståndsluckan delas in i en tidig och en sen del. Signalen från den tidiga (främre) halvan av luckan ges större viktning vid framkantsföljning än från den sena (bakre) halvan. Om luckan är centrerad över målet, kommer den sammanvägda tyngdpunkten från målets olika delar att hamna framför luckans mitt och denna dras framåt mot sensorn. Fällda remsor går huvudsakligen in i den bakre luckan med lägre viktning och ger ett bidrag till tyngdpunktsberäkningen, som ligger betydligt under deras verkliga styrka och luckan stannar vid måttliga remsmängder kvar över huvudmålet.



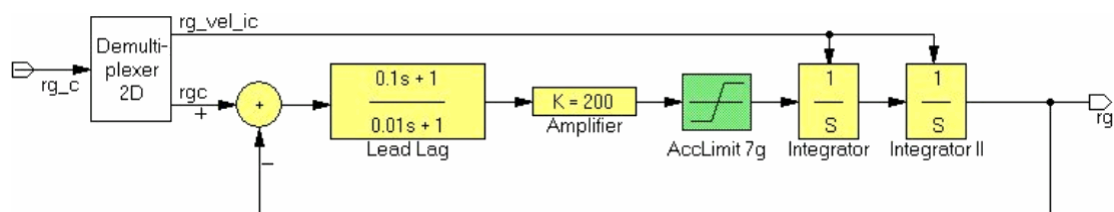
Figur 7 Avståndsluckans viktsfunktion anges i ChfDuel II med en exponentialfunktion av en typ som anges uppe till vänster i figuren med det radiella avståndet $\Delta R = |R - R_0|$ mellan delmål och luckmitt upphöjt till en exponent, i detta fall fyra (4). En högre exponent ger en brantare viktsfunktion. Kurvan i figuren svarar mot att luckan är placerad på avståndet $R_0 = 1000$ meter. Luckans längd definierar den ursprungliga viktsfunktionens bredd på halva höjden (3dB-gränsen). Luckans längd $\text{lucka} = 100$ meter i figuren. Framkantsföljningen simuleras i modellen genom att viktsfunktionen för den del som ligger bortom luckmitten divideras med en konstant större än ett (i figuren = 7), d.v.s. den bakre luckan ges en lägre viktning än den främre.

Viktningen i avståndsled beskrivs när modellen körs *utan* framkantsföljning med en symmetrisk exponentialfunktion av en typ som presenteras överst till vänster i Figur 7. Längden på luckan definieras av att signalstyrkan i ändarna ska ha sjunkit 3 dB jämfört med mitten och den bestämmer därför viktsfunktionens bredd på halva höjden. Kurvans branthet bestäms med ett lämpligt värde på exponenten i den angivna formeln, ju högre desto större lutning. Branta flanker innebär att alla delmål inom luckan ges hög, jämn viktning, medan delmålen utanför praktiskt taget kan försummas. Framkantsföljningen simuleras i modellen genom att den bakre halvan av avstånds-

viktsfunktionen divideras med en konstant större än ett, se Figur 7, och följningens effektivitet ökar ju större viktsskillnaden är mellan främre och bakre luckan. Bakkantsföljning kan fås genom att avståndsviktsfunktionen divideras med en konstant mellan noll och ett.

3.3 Accelerationsbegränsning

Accelerationsbegränsning är i ChfDuel II införd i avståndsföljningen. Det innebär att man bygger in en sorts tröghet, så att om målet accelererar allt för snabbt hindras luckan från att hänga med. Detta störskydd används för att t.ex. förhindra en avhakning till ett snabbt avlägsnande skenmål skapat av en repeterstörsändare eller för att omöjliggöra att luckan låser över på hastigt avstannande remsor. I Figur 8 visas hur avståndsföljeservot modellerats. Fyra parametrar kan ställas in: LeadLag-filtrets två, förstärkningen och accelerationsbegränsningen. Den senare anges som multipel av g , jordgravitationen. Den sätts till noll, om accelerationsbegränsning saknas.

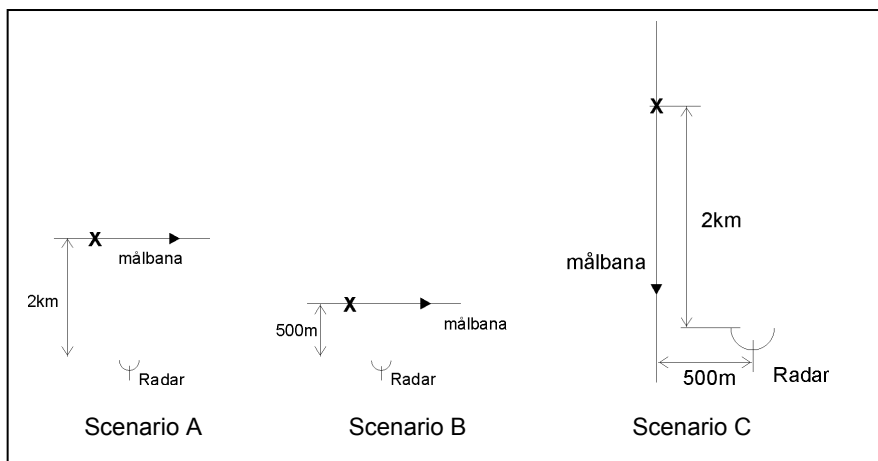


Figur 8 Avståndsservot i ChfDuel II har modellerats som ett återkopplat system med en regulator uppbyggd av ett LeadLag-filter och en förstärkare. Den levererar ett accelerationsvärde till avståndsställningen bestående av en limiter och två integratorer, som integrerar upp värdet till ett avstånd. In från vänster kommer det kommanderade avståndet, rgc , som avståndsluckan enligt tyngdpunktsberäkningen ska ställas in på och till höger betecknar rg det avstånd luckan hamnar på, den s.k. följepunkten. Skillnaden mellan dessa två värden ger den felsignal som styr regulatort. Limitern fungerar som en accelerationsbegränsare och har här getts värdet $7g$, d.v.s. accelerationer på över sju gånger jordaccelerationen begränsas till $7g$.

4 Exempel på simuleringar

För att visa påverkan av ett antal olika parametrarna av dem som ingår i tyngdpunktsföljmodellen har ett antal simuleringar gjorts med modellen ChfDuel II.

Tre scenarion har valts som är mycket enkla geometriskt och valda för att se en viss parameters påverkan av följningen, se Figur 9. I samtliga scenarier flyger målet i en rakbana med hastigheten 120 m/s . I scenario A passerar målet tvärs hotet på 2 km avstånd. Detta scenario används för att studera lobbreddens inverkan i viktsfunktionen. I scenario B passerar målet istället på avståndet 500 m . Det används till att studera servosystemet för vinkel i azimut. I det tredje scenariot, C, rör sig målet mer mot hotet. Detta används för att studera parametrar som har att göra med radiell hastighet, d.v.s. avståndsluckans egenskaper på resultatet, MTI och framkantsföljning.



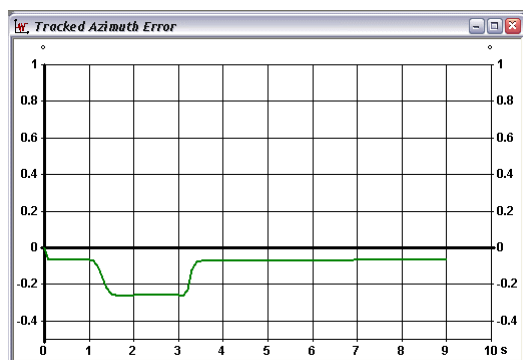
Figur 9 Simuleringsscenarier A, B och C

I alla tre fallen fälls 20 remsbuntar med 0.1s mellanrum med start i läget som är markerat med "X" i respektive figur. Remsbuntarna har en maximal ekvivalent radarmålarea på 40m^2 , uppbromsningstid på 0.08 s samt en uppblomningstid på 1.5 s. Vidare fälls alla remsbuntar från en kastare som är placerad i målets tyngdpunkt. För att lättare förstå vad som händer i simuleringarna och samtidigt undvika onödig komplexitet har i dessa exempel scenariot förenklats något genom att approximera målet som en enda ekvivalent radarmålarea placerad i målets tyngdpunkt. Detta kan jämföras med en mer noggrann modell då man tänker sig att målet istället består av flera delmål.

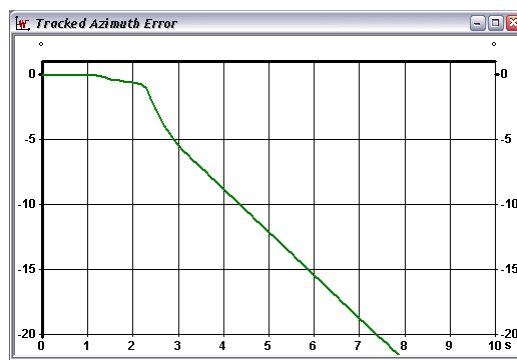
4.1 Viktsfunktioner

4.1.1 Lobbredd

Två simuleringar med scenario A gjordes med olika lobbredd för att illustrera hur denna påverkar följningen i sidled. De värden som valdes var 1.5° och 1.9° lobbredd. Resultater felvinkel visas i Figur 10 och Figur 11 nedan.



Figur 10 Simuleringsexempel med lobbredd 1.5°



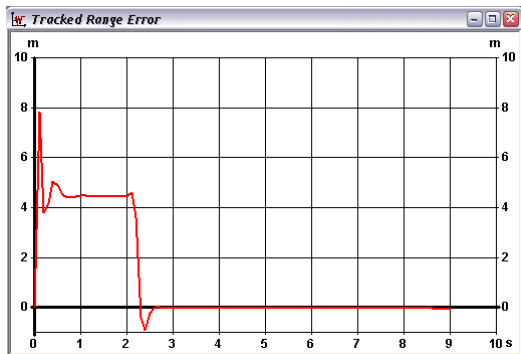
Figur 11 Simuleringsexempel med lobbredd 1.9°

Man ser av resultaten att vid en lobbredd av 1.5° påverkas visserligen följningen av remsorna, men ingen avhakning sker. Om istället 1.9° lobbredd används tappas

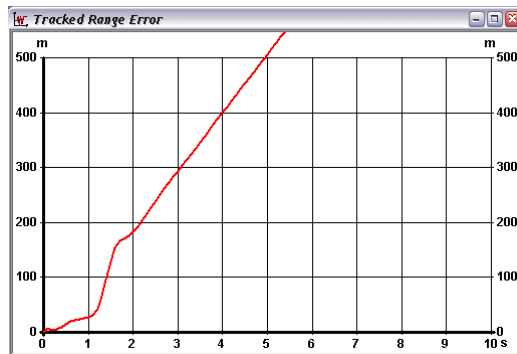
följningen när remsorna fälls. Detta beteende är förväntat då fler remsor ryms inom lobbreden och kan påverka följningen.

4.1.2 Avståndslucka

Värden som använts vid illustrationen av avståndsluckans inverkan på följning är 40m respektive 65m i scenario C. Resultaten visas i Figur 12 och Figur 13 nedan.



Figur 12 Simuleringsexempel med avståndslucka 40m



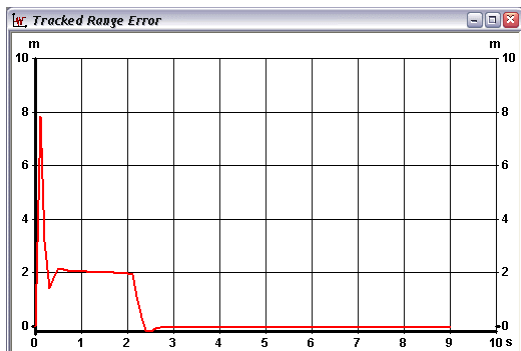
Figur 13 Simuleringsexempel med avståndslucka 65m

Resultaten av simuleringarna visar här att en ökad avståndslucka gör att remsorna får större vilseledande effekt genom att flera remsor kommer att samverka i avståndsluckan och bidra till större radarmålarea. Skillnaden mellan 40m och 65m avståndslucka gör att man i det tidigare fallet klarar av att följa, medan man i det senare fallet tappar följning.

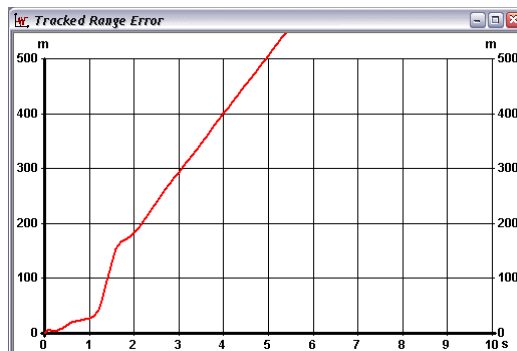
4.2 Störskydd

4.2.1 MTI

Även här gjordes två simuleringar med scenario C. En simulering utan MTI som störskydd och en med MTI-funktionen inkopplad. Resultatet visas i Figur 14 och Figur 15.



Figur 14 Simuleringsexempel med MTI-funktion inkopplad



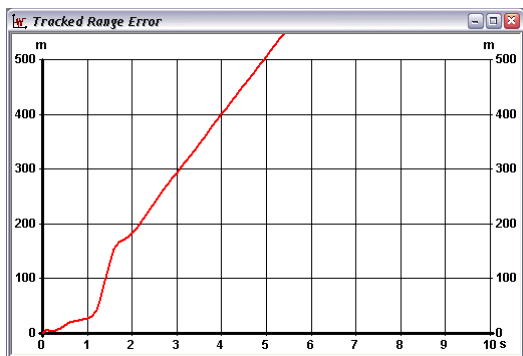
Figur 15 Simuleringsexempel med MTI-funktionen frånkopplad

Med MTI inkopplat ser man att remsorna påverkar följningen men inte lyckas att haka av radarn. Om man däremot kopplar bort MTI kommer samma scenario leda till att

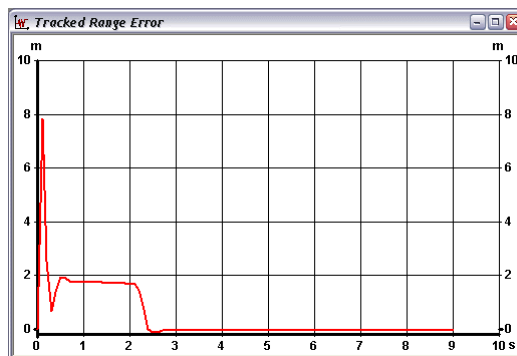
följningen tappas. De fällda remsorna avstannar snabbt och filtreras bort ur följningen med MTI påkopplad.

4.2.2 Framkantsföljning

Vid två simuleringar, i scenario C, för att studera framkantsföljning har värdena på tyngdpunktsförskjutningen varierats. Först sattes värdet till 1, vilket motsvarar normal följning, och sedan till 7, vilket ger en framkantsföljning. Resultatet visas i Figur 16 och Figur 17.



Figur 16 Simuleringsexempel utan framkantsföljning

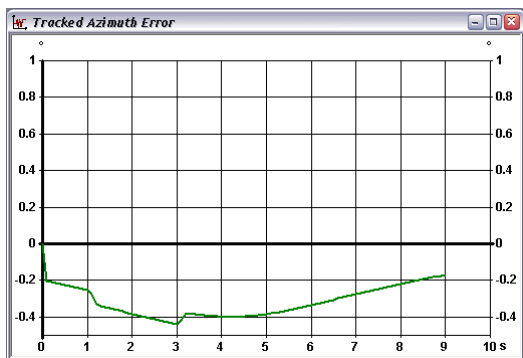


Figur 17 Simuleringsexempel med framkantsföljning

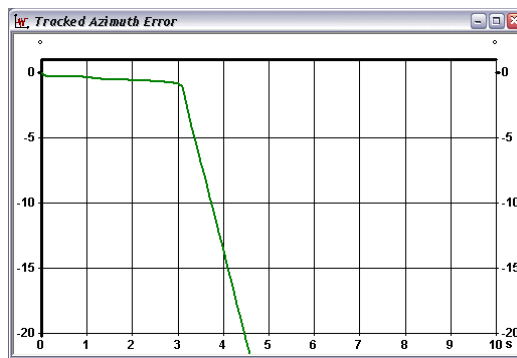
Här ser man att följningen blir säkrare om man lägger större vikt vid den tidiga avståndsluckan relativt den senare. I simuleringen tappar radarn följning om viktningen 1, dvs normal följning, används. Men om man utnyttjar framkantsföljningen genom att öka värdet till 7 kommer avhakningen att misslyckas.

4.3 Servosystem

Två simuleringar har gjorts i scenario B med olika värden på azimutservots gain: 35 och 25 ggr. Resultaten kan ses i Figur 18 och Figur 19.



Figur 18 Simuleringsexempel med gain 35ggr i azimutservot



Figur 19 Simuleringsexempel med gain 25ggr i azimutservot

Som väntat ser man att ett mindre gain i servosystemet för azimut resulterar i sämre följning. Vid 35ggr gain lyckas man inte haka av radarn, men om värdet sänks till 25ggr gain hos servosystemet så lyckas inte radarn följa målet.

5 Jämförelse verklig kontra simulerad följning

Under 2001 genomfördes ett remsfällningsprov där signaturer för remsor och flygplan mättes och där även ett följeradarsystem (följeradar X) användes för studier av avhakningseffekter.

I en fortsatt studie har remsparametrar för simulering i ChfDuel II och flygplanssignaturen identifierats ur mätresultat. ChfDuel II parametrar har anpassats för att efterlikna följeradar X vad avser antennlobbredd, längd på avståndsföljelucka samt följestanda i följedomänerna avstånd, azimut och elevation.

Från proven har 19 anflygningslöpor använts för att jämföra avhakningsresultaten som erhöles mot följeradar X med ChfDuel II simulering. I Tabell 1 anges ifall remsavhakning mot följeradar X gentemot ChfDuel II simuleringen ger lika eller olika resultat. Lika i tabellen betyder att följeradar X respektive tyngdpunktsföljemodellen i ChfDuel II antingen båda behöll följning på flygplanet eller båda blev avhakade av remsinsatsen.

Simuleringarna som presenteras i Tabell 1 nyttjar medelvärden för remsparametrar (uppblomningstid, maximal målarea, uppbromsningstid, etc) vilka identifierades under provet. Genom att variera dessa parametrar inom det intervall som uppmättes vid provet kan olikheterna för löporna 6, 7, 9 och 12 bli likheter. För löpa 13 råder det osäkerheter om remsavfyringen var korrekt.

pass, löpa	bantyp	avhakning följeradar X	Avhakning ChfDuel II	Kommentar
1	Rakt kommande	lika		
2	Tvårs	lika		
3	Snett kommande	lika		
4	Snett kommande	lika		
5	Snett kommande	lika		
6	Snett kommande	olika		Remsparametervariation inom uppmätt intervall ger lika resultat
7	Snett kommande	olika		Remsparametervariation inom uppmätt intervall ger lika resultat
8	U-man 1.7G	lika		
9	Kommande	olika		Remsparametervariation inom uppmätt intervall ger lika resultat
10	Kommande	lika		
11	Kommande	lika		
12	Kommande	olika		Remsparametervariation inom uppmätt intervall ger lika resultat
13	Kommande	olika		Osäkerhet om alla remsor avfyrares korrekt vid provet
14	Kommande	lika		
15	Kommande	lika		
16	Kommande	lika		
17	Gående	lika		
18	Kommande	lika		
19	Gående	lika		

Tabell 1 Resultat i form av remsavhakning vid fällning mot följeradar X jämfört med motsvarande simulerat i ChfDuel II.

Sammanfattningsvis kan konstateras, att det går att få överensstämmelse mellan verkliga och simulerade löpor i samtliga fall utom ett vad gäller avhakning. Det sker genom att i fyra kritiska fall ändra remsparametrarna inom de intervall som

uppmättes. Sammanvägs resultaten i Tabell 1 kan man sluta sig till att ChfDuel II med sin tyngdpunktsföljemetod är väl användbar för att simulera dueller med remsor mot det aktuella systemet (följeradar X).

Viktigt för framgång är att dock att man har god kännedom om de olika parametrar som måste föras in i modellen vad avser följeradarns prestanda, remsparametrar samt även flygplanets målarea (RCS). Målarean för flygplanet är aspektberoende men vid ovanstående simuleringar med relativt enkla banor har den satts till en konstant lika med det värde som mättes strax före fällning. Målarean har fördelats jämnt mellan fem punktmål, tre på flygkroppen och en på vardera vingen, så att vart och ett får en målarea på en femtedel av hela planet.

6 Framtida utvecklingsmöjligheter

I kapitel 2 och 3 har de fundamentala principerna för simulering av radarföljning med hjälp av tyngdpunktsmetodik presenterats. Saker som skulle kunna komplettera metodiken är bland annat:

- integration med följealgoritmer (α - β tracker, kalmanfilter, m.fl.)
- stöttning från operatör (positions- och/eller hastighetsstöttning via handkontroll)
- pålåsningsförfarandet (målsökning) efter överlämnande från spaningsradar
- implementation av fysikaliska fenomen (t ex glint)

I framtiden kommer en C++ implementation av tyngdpunktsföljemetodiken att utvecklas inom projektet *Duellsimulering Telekrig* för att ingå i en simuleringsmiljö (EwSim) syftande till system av system värdering inom radar, optronik och kommunikation.

7 Sammanfattning

Tyngdpunktsföljemetodiken gör det möjligt att på ett enkelt och effektivt sätt simulera radarföljning och gör det möjligt att inkludera telekrigeffekter i sensorsimuleringen (om störningen kan representeras som en radarmålyta), speciellt där många målareor ska hanteras (t ex remsfällningsfallet). Metodiken kan vara användbar i realtidssammanhang där en effektiv simulering krävs.

Den jämförelse som har gjorts mot verklig radarföljning visar att metoden är väl användbar för att simulera radarföljning i duell mot remsor för detta specifika radarsystem. Metodiken är en förenkling av verkligheten och ska därför användas med kunskap om vilka förenklingar som kan göras. I stället för att modellera en radarsensors konstruktion, modelleras istället sensorns förväntade egenskaper (generisk modell) med tyngdpunktsföljemetodiken.

8 Referenser

1. Kjell Rixon
Simulering av duellen 'Remsor' vs. Err/Rms
FOA Kursmaterial
FOA-D--96-00216-3.6--SE, november 1998
2. Johnny Eckerland
AFE 2.3. Ett generellt grafiskt gränssnitt för simuleringsmodeller.
FOI-R--0048--SE (Metodrapport)
3. Klum Peter
Användarhandledning ChfDuel - modell av remsfällning från Tp84.
ChfDuel User Manual.
FOI-R--0147--SE (Metodrapport), 2001