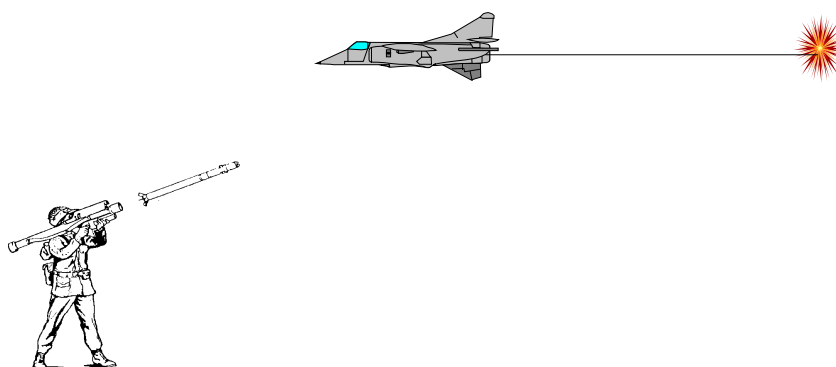


Lars Berglund

# Släpat IR-skenmål mot manburet LV





<b>Utgivare</b> Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Ledningssystemteknik 581 11 Linköping	<b>Rapportnummer, ISRN</b> FOI-R--0260--SE	<b>Klassificering</b> Metodrapport
	<b>Forskningsområde</b> 6. Telekrig	
	<b>Månad, år</b> November 2001	<b>Projektnummer</b> E3042
	<b>Verksamhetsgren</b> 5. Uppdragsfinansierad verksamhet	
	<b>Delområde</b> 61 Telekrigföring med EM-vapen och skydd	
<b>Författare/redaktör</b> Lars Berglund	<b>Projektledare</b> Claes Nelsson	
	<b>Godkänd av</b> Mikael Sjöman	
	<b>Uppdragsgivare/kundbeteckning</b> FM	
	<b>Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig</b> Lars Berglund	
<b>Rapportens titel</b> Släpat IR-skenmål mot manburet LV		
<b>Sammanfattning (högst 200 ord)</b> Rapporten beskriver vilka möjligheter ett släpat IR-skenmål kan tänkas få gentemot manburet lv. Genom att utnyttja geometriska beräkningar studeras förutsättningarna för konceptet att klara påhakning respektive avhakning. Rapporten skall utgöra diskussionsunderlag för fortsatta studier samt utnyttjas för att ta fram ingångsvärden för dynamiska simuleringar. Resultaten pekar på svårigheter med att utnyttja konceptet för påhakning. Vad avser avhakning visar det genomförda arbetet på stora möjligheter.		
<b>Nyckelord</b> IR, släpat skenmål, målsökare, avhakning, påhakning		
<b>Övriga bibliografiska uppgifter</b>	<b>Språk</b> Svenska	
<b>ISSN</b> 1650-1942	<b>Antal sidor:</b> 49 s.	
<b>Distribution enligt missiv</b>	<b>Pris: Enligt prislista</b>  <b>Sekretess</b>	

<b>Issuing organization</b> FOI – Swedish Defence Research Agency Comand and Control Warfare Technology SE-581 11 Linkoping	<b>Report number, ISRN</b> FOI-R--0260--SE	<b>Report type</b> Methodology report
	<b>Research area code</b> 6. Electronic Warfare	
	<b>Month year</b> November 2001	<b>Project no.</b> E3042
	<b>Customers code</b> 5. Contracted Research	
	<b>Sub area code</b> 61 Electronic Warfare, Electromagnetic Weapons	
<b>Author/s (editor/s)</b> Lars Berglund	<b>Project manager</b> Claes Nelsson	
	<b>Approved by</b> Mikael Sjöman	
	<b>Sponsoring agency</b> Swedish Armed Forces	
	<b>Scientifically and technically responsible</b> Lars Berglund	
<b>Report title (In translation)</b> Towed Decoy against MANPADS		
<b>Abstract (not more than 200 words)</b> <p>The report describes the possibilities a towed IR-decoy can have against MANPADS. Geometrical calculations is used to study the effect of a towed IR-decoy has at lockon and to break tracking. The report is to be used as reference for discussion for further studies of the concept. It will also be used to find input values for dynamic simulations.</p> <p>The result points out the difficulties for the concept when it comes to be used for lockon. When it comes to break the seekers track of the target the results are very promising.</p>		
<b>Keywords</b> IR, towed decoy, seeker, deception, seduction		
<b>Further bibliographic information</b>		<b>Language</b> Swedish
<b>ISSN</b> 1650-1942		<b>Pages</b> 49 p.
		<b>Price acc. to pricelist</b>  <b>Security classification</b>

## Innehåll

1. Inledning.....	7
2. Metodbeskrivning .....	7
2.1. Flygplan.....	7
2.2 Hotsscenarier .....	8
2.3 Fackla .....	8
3. Hot.....	9
3.1 Roterande retikelsystem .....	10
3.2 Nuterande retikelsystem.....	11
3.3 Kryss-detektorer och rosettskann.....	12
3.3.1 Kryss-detektorer.....	13
3.3.2 Rosettskannande system .....	13
3.4 Bildalstrande system .....	13
3.5 Styrprinciper.....	15
3.6 Hotsystem.....	15
4. Pålåsning .....	17
4.1 Beräkningsmodell avseende geometri .....	17
4.2 Bomavstånd.....	22
4.2 Utvecklad enkel geometrisk punktmodell .....	23
4.2.1 Modell TP84.....	23
4.2.2 Modell AJ 37 VIGGEN .....	26
4.2.3 Modell JAS 39A GRIPEN .....	28
4.3 Resultat.....	29
5. Avhakning .....	33
5.1 Beräkningsmodell avseende geometri .....	34
5.2 Resultat.....	37
6. Diskussion och slutsatser .....	41
7. Referenser.....	43
Bilaga 1.1 Beräkning av generella fallet för y-värden då x, z, d, dv och FOV givna .....	45
Bilaga 1.2 Beräkning av generella fallet för x-värden då y, z, d, dv och FOV givna .....	46
Bilaga 1.3 Beräkning av avstånd d mellan mål och släpat IR-skenmål .....	47
Bilaga 2.1 Beräkningar för avhakning .....	48



## 1. Inledning

En metod för att skydda flygplan mot radarmålsökande robotar är att använda ett släpat skenmål. Principen bygger på att en mottagare i skenmålet tar emot radarsignalerna förstärker och eventuellt modulerar dessa samt skickar tillbaka signalerna mot roboten. Sådana system finns idag operativa.

Inom projektet Släpat IR-skenmål ska möjligheterna att utnyttja metoden med släpat skenmål mot IR-sökande robotar studeras. Notera dock att en radarmålsökande robot har större söklob/synfält samt längre avståndsräckvidd än IR-målsökande robotar.

I denna rapport beskrivs en geometrisk modell för att studera hur effektivt ett släpat IR-skenmål kan vara. Rapporten skall tjäna som diskussionsunderlag för fortsatt arbete samt ge ingångsvärden för eventuella dynamiska simuleringar.

## 2. Metodbeskrivning

Metoden bygger på enkla geometriska beräkningar givet vissa indata för respektive hot, målobjekt och släpat skenmål. Notera att i denna modell tas ingen hänsyn till faktiska signaturer hos mål-objekt (annat än var ungefärlig intensitetstyngdpunkt ligger). Hänsyn tas ej heller till vilken signatur det släpade skenmålet ska ha eller hur dess signatur ska realiseras. För att studera konceptet gjordes en indelning av de i konceptet ingående delarna. Den gjorda indelningen visas nedan:

- Flygande plattform som ska skyddas
- Hotscenarier
  - Hot
- Fackla

### 2.1. Flygplan

Här kan följande typer av plattformar vara tänkbara kandidater:

- Jetplan (Viggen och JAS)
- Transportflyg (Herkules)
- Transporthelikopter
- Stridshelikopter

Oavsett vilken eller vilka som väljs att studeras krävs ett underlag i form av signaturer inom ett eller flera våglängdsband som svarar mot olika målsökares våglängdsband. Helikoptrar rör sig normalt på lite lägre höjder än flyg så i denna rapport studeras jetplan och transportflyg.

## 2.2 Hotscenarier

I första hand har valts att studera hotscenariot mark mot luftmål. Hotet är ett manburet lv-robot system s.k. ”manpads” (eng. MAN Portable Air Defence Systems). Dessa har en begränsad räckvidd men kan nå höjder på ca 3.5 km. För att undgå detta hot – flyg högt. I vissa fall, exempelvis start, landning eller foto- och attackuppdrag, är flygning utanför räckvidden hos ”manpads” ej möjlig. För att belysa hotet närmare har det i rapporten givits ett eget kapitel.

## 2.3 Fackla

Det släpade skenmålet som ska studeras, antas vara en släpad fackla. Det kan ju vara värt att notera att konceptet ingalunda är nytt. Redan under 1954 fanns i USA luftmålsrobotar (eng. air-to-air IR robotar ) och med utgångspunkt från att det snart var en tidsfråga innan Sovjetunionen skulle ha motsvarande system så inleddes i USA en utredning om hur IR målsökare skulle kontras / hanteras [1]. Fyra koncept studerades och dessa var: IR varnare, blinkande IR källor, släpade IR skenmåls facklor samt fällda IR skenmåls facklor. Bäst resultat erhöles då med fällda facklor.

I USA studeras konceptet idag med släpat IR-skenmål, och företaget Raytheon Systems Co har utvecklat ett släpat IR skenmål som använder kastarsystem AN/ALE-50 (först avsett för aktiva RF skenmål)[2],[3]. Framgången för IR-skenmålet bygger på den unika lasten och möjligheten att styra utkastning av lasten via släplinan. Lasten består av ett antal 1.5 mm tjocka ”donuts” (i.e. remsor av pyrofort material, som startar brinna så fort det kommer i kontakt med syre). Remsorna stackas upp i behållaren med skruvutkastare och en stegmotor. När skenmålet aktiveras vrids skruven och remsorna tvingas ut i luften. Genom att ha två typer av ”donuts” en med hög intensitet och en med låg och lägga varannan i behållaren räknar företaget med att kunna vilseleda både äldre och nya IR-målsökare. Produkten är ett samarbete mellan Raytheon Systems Co. (design, utveckling och integrering), Southwest Aerospace Corp (utveckling av i luft släpat system) och Alloy Surfaces Co., Inc (tillverkning av lasten)[4]. Raytheon säger sig ha testat detta släpade IR falskmål mot ”moderna hot” med ”lovande” resultat [5].



För att kunna bedöma effekten av den släpade facklan mot ett givet hot bör ett antal frågor besvaras eller studeras. Dessa kan i kortform representeras av nedanstående. Det är endast de fyra första punkterna som studeras i denna rapport.

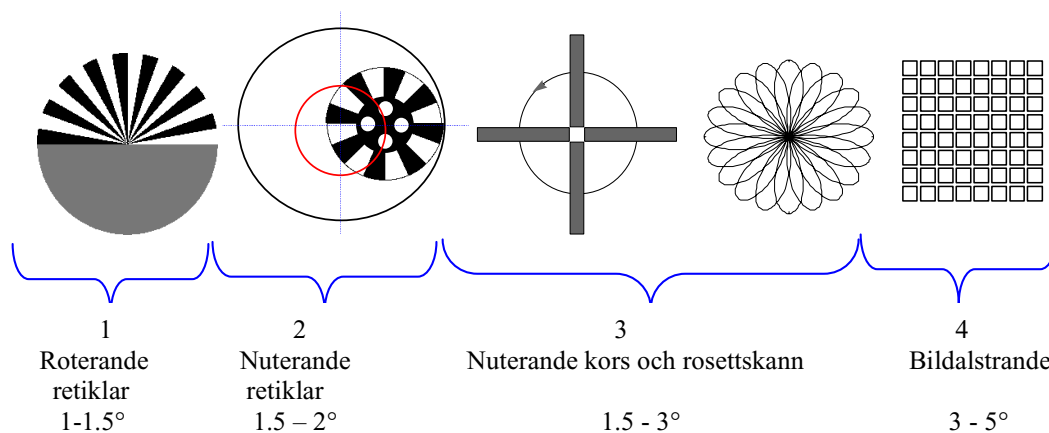
- Fästesposition på flygplanet.
- Längd på linan.
- Vinsch-hastighet
- Avhakning och/eller påhakning
- Rörelse
- Intensitet -spektral fördelning och som funktion av tid
- Brinntid
- Area

### 3. Hot

Hotet är en IR-sökande missil. Det finns idag en bred flora med olika robotar såväl som IR-målsökare. Vad avser missiler kan det finnas behov av att klara såväl luftvärnsrobotar som jaktrobotar. Målsökarna i dessa system kan delas in följande fyra klasser

1. Roterande retiklar
2. Nuterande retiklar
3. Nuterande Kryssdetektor och Rosett-skannande
4. Stirrande (bildalstrande)

De ovan angivna klasserna kan delvis ses som en historiebeskrivning över målsökarutvecklingen inom IR-området.

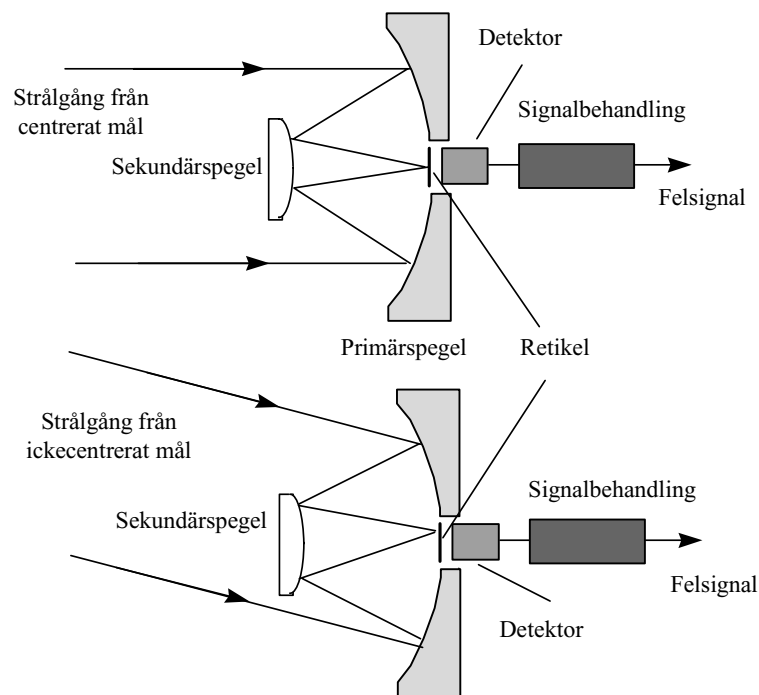


Figur 3.1 Indelning av de olika IR-målsökarna i generationsklasser, med ungefärligt synfält.

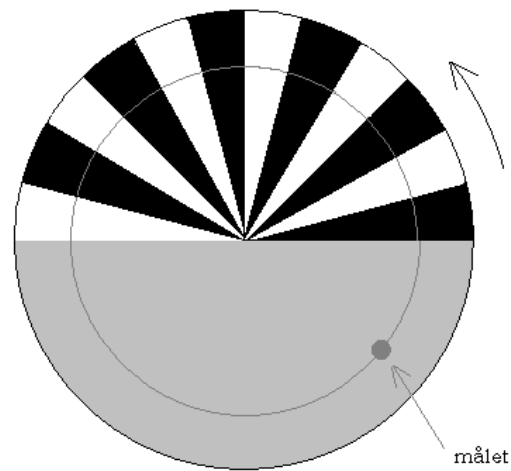
Samtidigt pågår en ständig uppgradering och modifiering av äldre system vilket gör det svårt att begränsa bort någon av målsökarklasserna. Kortfattat följer nedan en beskrivning av respektive klass [6].

### 3.1 Roterande retikelsystem

Målsökarens optik består av en dom, primär- och sekundärspelar samt en eller flera linser innan strålningen slutligen passerar retikeln och träffar detektorn, se figur 3.2. Strålningen från ett icke-centrerat mål inom målsökarens synfält träffar retikeln och detektorn med en viss offset. Den del av målsökaren som har till uppgift att modulera strålningen kallas för retikel och är en liten cirkulär skiva med ett etsat mönster och en diameter på någon millimeter.

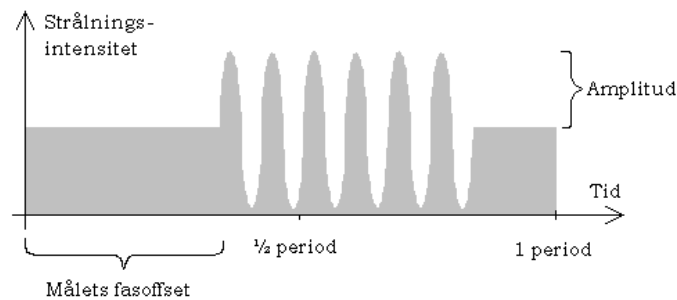


Figur 3.2 Optiken i en roterande retikelmålsökare. Strålgången visas för centrerat mål respektive icke-centrerat. Det icke centrerade målet ger offset på retikeln.



Figur 3.3 Exempel på mönster hos en AM-retikel.

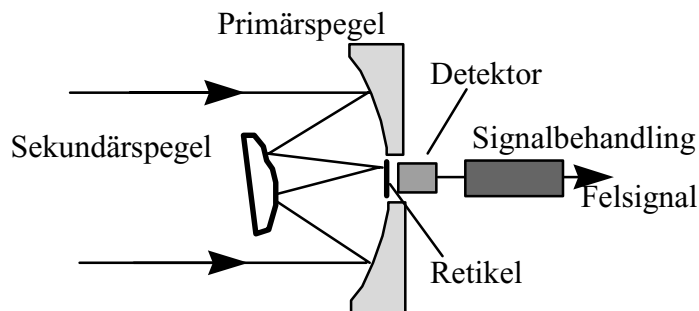
När strålningen passerat retikeln i figur 3.3 har den AM-modulerats, dvs informationen om målets radiella offset från målsökarens LOS (eng. Line Off Sight) ligger i signalens amplitud. Retikeln halvtransparenta del ger dessutom en fasreferens/fasoffset så att riktningen till målet kan bestämmas, se figur 3.4.



Figur 3.4. Strålningen har modulerats av retikeln i figur 3.5.

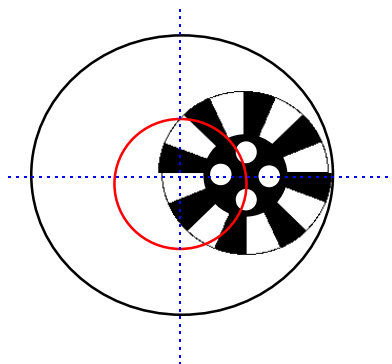
### 3.2 Nuterande retikelsystem

Ett alternativ till det roterande retikelsystemet är att ge sekundärspiegeln en viss utvridningsvinkel och sedan låta den rotera medan retikeln hålls fix. Detta är, sett från detektorn, ekvivalent med att retikeln nuterar och kallas följaktligen för ett nuterande system.



Figur 3.5 Optiken i en nuterande retikelmålsökare

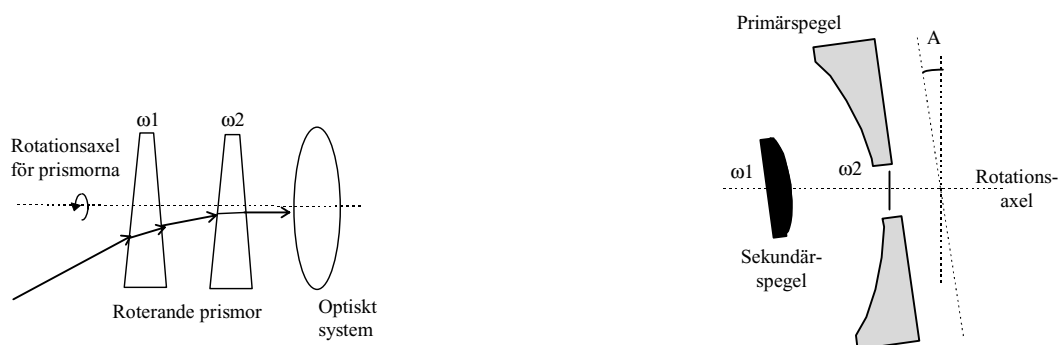
Lutning på sekundärspjeln är så stor att det momentana synfältet är ungefär hälften av det totala synfältet, se figur 3.6.



Figur 3.6 Nuterande FM-retikel. Totala synfältet motsvaras av den större cirkeln. Inre cirkeln visar hur centrum för det momentana synfältet (retikeln) rör sig.

### 3.3 Kryss-detektorer och rosettskann

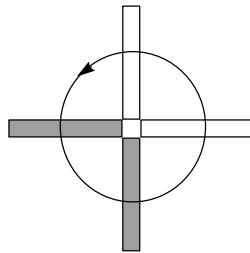
Principen för avsökning av synfältet för såväl nuterande kryssdetektorer som rosett skannande är likadan (se figur 3.7).



Figur 3.7 Principer för generering av skanningsmönster.

### 3.3.1 Kryss-detektorer

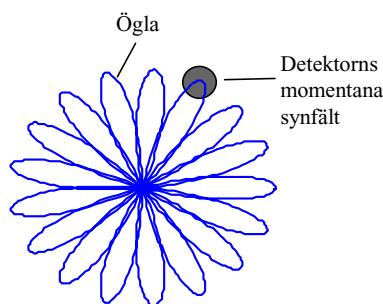
För nuterande kryss/kors gäller att prismorna eller speglarna roterar åt samma håll med samma frekvens. Genom att låta synfältet nutera över detektorelementen erhålls signaler från varje detektor. När målet är centrerat mitt i synfältet kommer nutationen att ge upphov till att målet beskrivas en cirkelrörelse över detektorerna, se figur 3.8.



Figur 3.8 Ett i synfältet centrerat måls rörelse över detektorerna i detektorplanet.

### 3.3.2 Rosettskannande system

För att generera ett rosettmönster utnyttjas prismor eller speglar som framgår av figur 3.7. Här skall dock riktningen vara motsatt och frekvenser skilda från varandra. Detektorn beskriver ett rosetliknande mönster i målplanet. För varje ögla i rosetten passeras synfältets origo vilket ger en stabil följning.



Figur 3.9 Exempel på rosett-mönster

### 3.4 Bildalstrande system

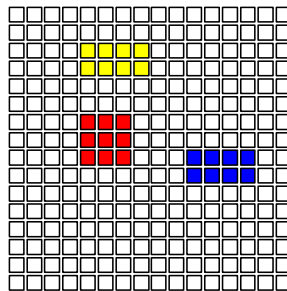
Vanligt förekommande är utnyttjandet av CCD-arrayer för att generera bilder i de modernare bildalstrande målsökarna. Den bild som erhålls i målsökaren kan liknas vid en matris där målets och bakgrundens strålning svarar mot grånivån i respektive element i matrisen. Varje element i matrisen kallas för bildelement (eng. pixel). På denna bild / matris appliceras olika

algoritmer (d.v.s. de formler som används vid målsökarens bearbetning av sensordata tills en resulterande följepunkt har erhållits). Bilderna bearbetas i följande ordning

- Preprocessing (förbehandling av bild)
- Segmentering (framtagning av intressanta områden i bilden)
- Egenskapsextraktion (ta fram målkandidaters egenskaper)
- Klassificering (avgöra vad som är troliga mål)

För stegen preprocessing och segmentering utnyttjas olika kombinationer av faltning (filtrering – en utbild erhålls genom att applicera en överföringsfunktion på en eller flera inbilder) och tröskling för att få fram målkandidater. Olika typer av filter som kan utnyttjas ges nedan.

- medelvärdesbildande filter
- kantfilter
- punktframhävande filter
- storleksanpassade filter
- tunningsfilter
- expansionfilter



*Figur 3.10 Bildalstrande system – illustrerat med bild med tre målkandidater.*

När så inbilden är bearbetad och målkandidater är framtagna, skall dessa rangordnas internt i målsökaren. Detta görs genom egenskapsextraktion och redovisas kortfattat i nedan.

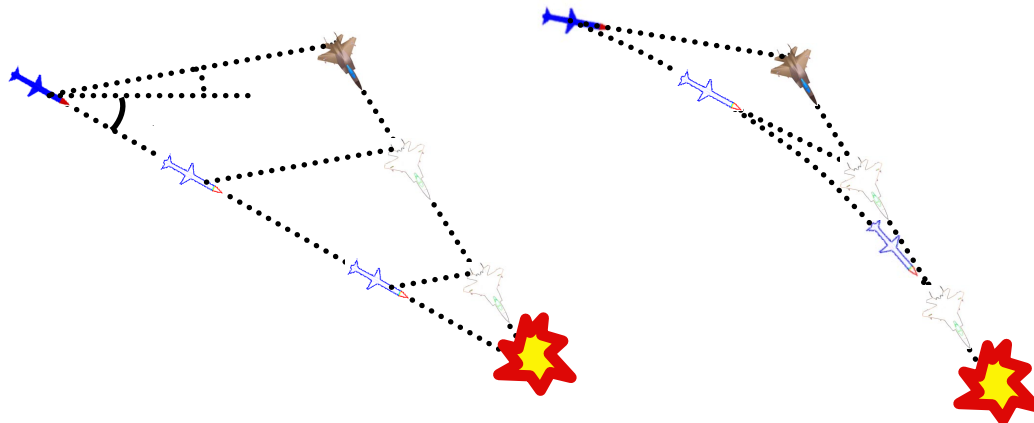
Vilka egenskaper som kan vara lämpliga att använda sig av för att få fram målkandidater respektive minska inverkan av falskmål varierar beroende på typ av målobjekt samt dess vanliga bakgrundsmiljöer. Exempel på ett antal egenskaper ges nedan:

- Intensitet      Differens i grånivå mellan min och maxvärde, medelvärde, standardavvikelse
- Storlek        höjd, bredd, omkrets, area
- Form            radier, höjd bredd / area, kantkontrast

För att de målsökaralgoritmer som används ska vara effektiva krävs en god kunskap om målen och deras omgivning. Algoritmerna för de olika faserna kommer att variera mellan olika system och tillämpningar men bygger i princip på att efter signalbehandling testa om givna kriterier är uppfyllda.

### 3.5 Styrprinciper

En målsökare eller en målföljare har endast en uppgift, att leverera två felsignaler som beskriver vinkelfelet (skillnad mellan målsökarens siktlinje och målets position) i azimuth och elevation. Dessa vinkelfel utnyttjas av styrautomaten i roboten för att styra densamma. Två principer för styrning är syftbäringsstyrning och hundkurvstyrning [7]. Vid syftbäringsstyrning strävar systemet efter att hålla målsökarens utvridning konstant. Vid hundkurvstyrning strävar systemet efter att ha målet i centrum för färdriktningen hela tiden.



Figur 3.11 Exempel på syftbäringsstyrning och hundkurvstyrning.

### 3.6 Hotsystem

Det kan vara lämpligt att utnyttja information om vissa system som kan bedömas vara av intresse för denna studie. De uppgifter som här återges är hämtade från öppna källor. De luftvärnshot som finns består av såväl manburna (ex. IGLA) som fordonsburna (ex. Strela 10M3 SAM system) [8].

Det främsta hotet torde vara de manburna systemen, men även fordonsburna tas med i redovisningen nedan

Nedan redovisas ett antal ryska IR-robotar och vissa data, hur tillförlitliga dessa uppgifter är kan ju diskuteras, stora delar av tabellen är kopierad från [9], dock med ändringen för kommande och gående (verkar vara omkastade) för att få dessa värden att stämma med erfarenhet och andra öppna uppgifter [10],[11]. Tabellen utgör en grund för fortsatta resonemang i denna studie. Motsvarande västerländska system finns naturligtvis, exempel på sådana är REDEYE och Stinger.

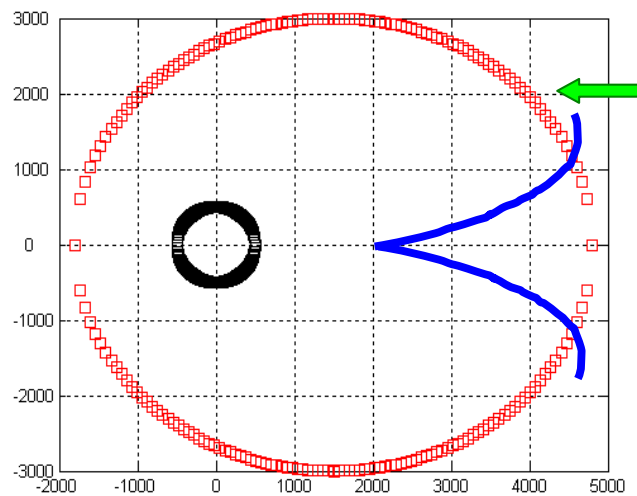
Tekniska data						
Ryskt namn	Strela-1*	Strela-2	Strela-3	Strela-10*	Igla	Igla-1
* = fordonsburet						
Rysk systembeteckning	9K31	9K32	9K34	9K35	9K38	9K310
USA beteckning	<i>SA-9</i>	<i>SA-7</i>	<i>SA-14</i>	<i>SA-13</i>	<i>SA-18</i>	<i>SA-16</i>
Nato kodnamn	<i>Gaskin</i>	<i>Grail</i>	<i>Gremlin</i>	<i>Gopher</i>	<i>Grouse</i>	<i>Gimlet</i>
Medelhastighet [m/s]		430-500	470	500	570	570
Min höjd [m]		50	50		10	10
Min avst [m]		500	500		500	500
Max avst k (jet) [m]		3000-3500	4000		4500	4300
Max avst g (jet) [m]		2000	2000		2000	2000
Max höjd k (jet) [m]		1200-1500	1500		2000	2000
Max höjd g (jet) [m]		1200-1500	1800	3500	2500	2500
Max avst k (hkp) [m]		3700-4200	4500	5000	5200	5000,5200
Max avst g (hkp) [m]		2500-2800	4500		4900	4700
Max höjd k (hkp) [m]		1500-2300	3000		3000	3000
Max höjd g (hkp) [m]		1500-2300	3000		3500	3500
Max mål hast k [m/s]		120-150	310	416	360,400	360
Max mål hast g [m/s]		220-260	260	305	320	320

Tabell 3.1 Tekniska data för olika ryska IR-robotar. Hämtad från Steven Zaloga, *Russian Manportable Surface-to-Air Missiles, Jane's Intelligence Review, Europe – April 1994, (sid 147 – 153)*

En generell beskrivning av täcknings- / verkansområdet för ett manpadssystem visas i figur 3.13. De faktorer som påverkar är dels räckvidden och hastighet för roboten. Målsökarens räckvidd (detektorns känslighet och våglängdsberoende) tillsammans med IR-signaturen hos målet (funktion av aspektvinkel). Vanligtvis begränsas räckvidden när målet går rakt mot lv-



systemet då målet har en mindre IR-signatur i aspekten rakt framifrån, detta gäller framför allt för jet flygplan[12]. Detta har indikerats i figuren nedan med blå streck.



*Figur 3.13 Principiellt utseende för verkansdiagram avseende avfyring. LV - systemet placerat i origo. Den svarta cirkel anger den inre skjutgräns ca 500 m. Den röda anger yttre skjutgräns (notera att skjutgränsen är beroende av farten hos målet). Den gröna pilen indikerar färdriktningen för mål. De blå strecken indikerar målsökarens möjlighet att låsa på målet.*

## 4. Pålåsning

### 4.1 Beräkningsmodell avseende geometri

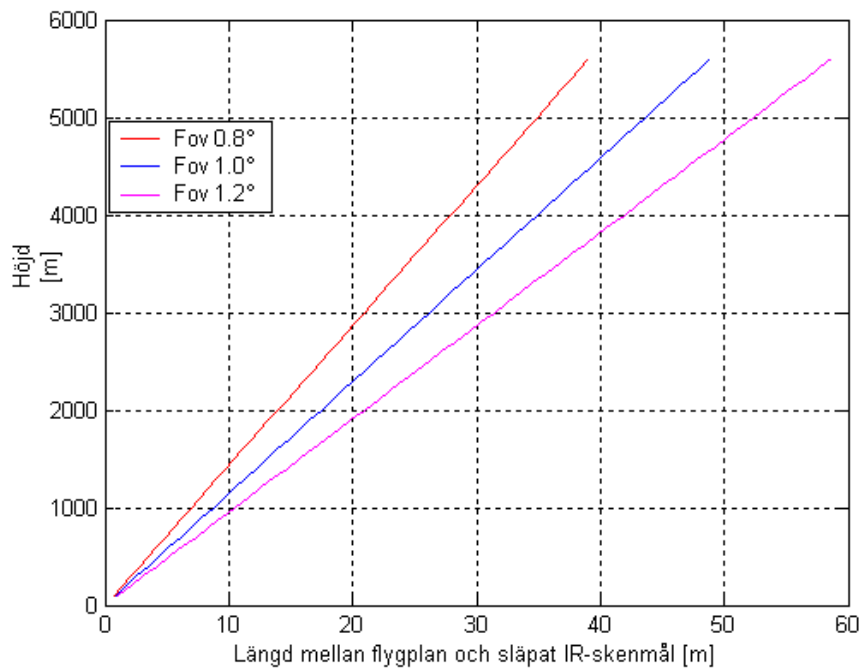
För att erhålla ett discussionsunderlag samt eventuellt ingångsvärden till dynamiska simuleringar implementerades en enkel geometrisk modell i Matlab. Modellen använder sig av ett högerortogonalt koordinatsystem med z - axeln riktad nedåt. I modellen betraktas både flygplan och släpad fackla som punktmål. Flygplanet flyger på rak kurs ( längs positiva x-axeln) och facklan ligger i samma Z - plan som flygplanet rakt bakom flygplanet (d.v.s. har samma y - värde) på ett avstånd d ifrån flygplanet.

Ett syfte med den enkla geometriska modellen är att beräkna ett poläradiagram för olika höjder där det närmaste avståndet till lv-målsökaren (fix-punkt i.e. origo) är markerat då både mål och fackla finns inom FOV. För att underlätta inför dessa beräkningar kan det vara lämpligt att studera förhållandet mellan avståndet d och synfältet (FOV – Field of View). För en given

höjd  $h$  och för ett fixt FOV, och antagandet att flygplanet skall ligga i centrum av FOV ges att  $d$  kan beräknas enligt:

$$d = h \tan\left(\frac{FOV}{2}\right) \quad \text{Ekvation 4.1}$$

Genom att testa för tre olika synfält 0.8, 1.0 och 1.2 graders synfält kan följande diagram plottas.

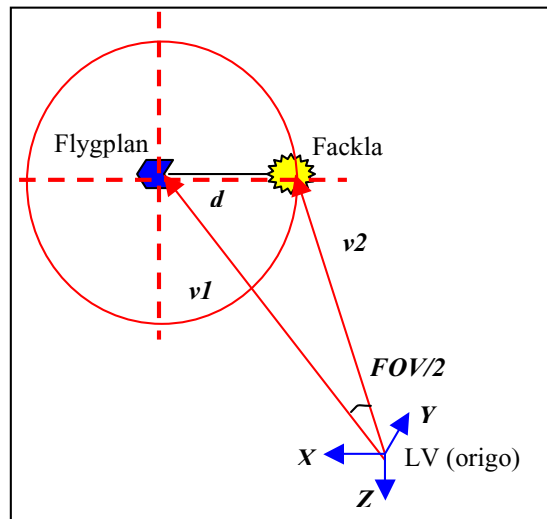


Figur 4.1 Höjd som funktion av avstånd mellan flygplan och släpat skenmål för att dessa ska rymmas inom halva målsökarens synfältet, för tre olika synfält.

För att beräkna ett polärdiagram behöver  $x$ - och  $y$ - värden räknas ut när  $z$ ,  $FOV$  och  $d$  är givna. Den ekvation [13] som utnyttjas är

$$\cos \varphi = \frac{v_1 v_2}{|v_1| |v_2|} = \frac{x_1 x_2 + y_1 y_2 + z_1 z_2}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2} \sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2}} \quad \text{Ekvation 4.2}$$

Vid beräkning ges positionen för flygplanet som antas ligga mitt i målsökarens synfält. Först beräknas  $y$ -värdet för flygplanet då  $x = 0$ , och övrigt givet, genom att lösa ut  $y$  i ekvationen ovan. Se bilaga 1.1 för härledning. Figuren nedan visar det principiella scenariot för beräkningarna.



Figur 4.2 Definition av parametrar.

När  $y$ -värden för  $x=0$  är beräknade, beräknas nya  $x$ -värden genom att stega från min  $y$  till max  $y$ , bilaga 1.2 respektive 2.2. Genom att anta följande värden:

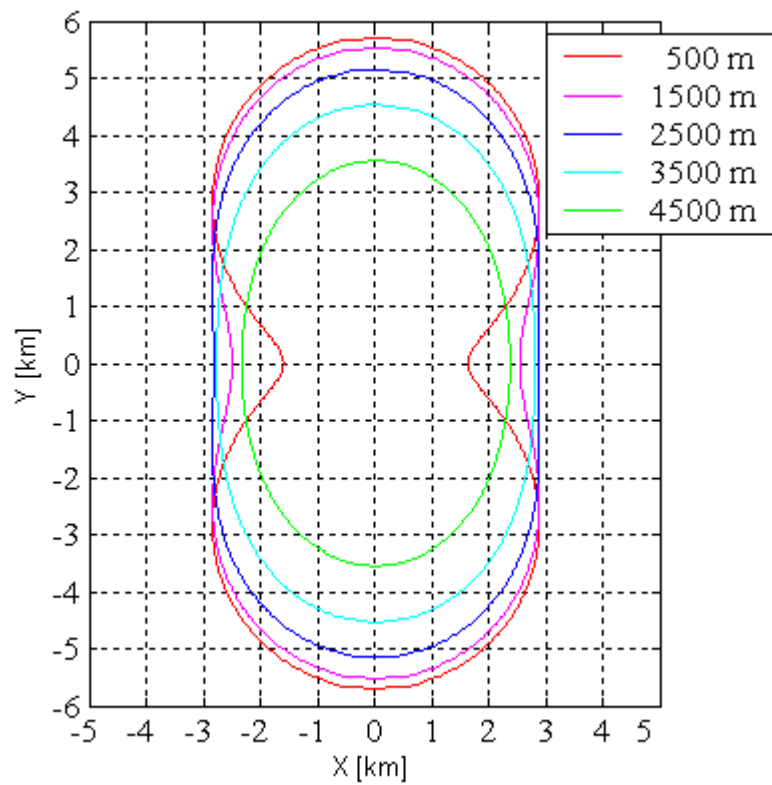
Linlängd  $d = 50$  [ m ]

Synfält  $FOV = 1$  [ ° ] (värsta fallet)

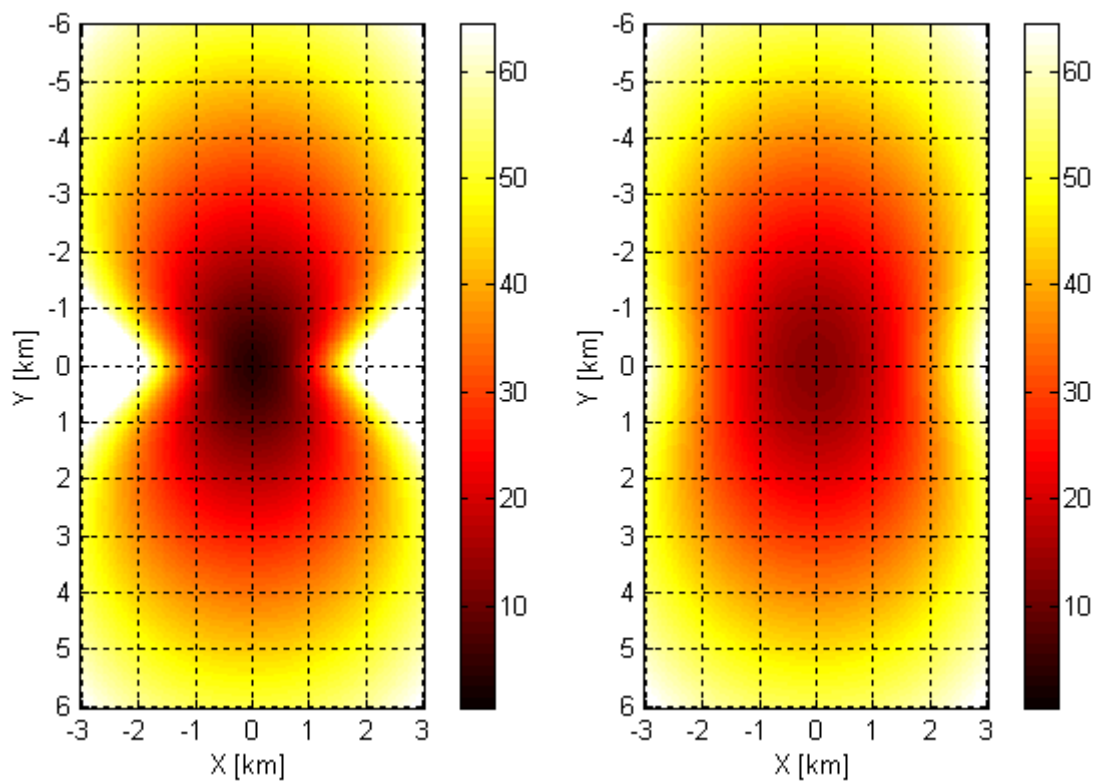
Flyghöjd = 500, 1500, 2500, 3500 och 4500 [ m ]

Erhålls polärddiagrammet vilket visas i figur 4.3.

En annan variant är att få en uppskattning av hur stort avståndet ( $d$  i figuren) mellan flygplan och släpad fackla behöver vara för att vid påläst flygplan ha med facklan i målsökarens synfält. Frågan är hur stort blir avståndet  $d$  för olika höjder och avstånd från LV. Genom att utnyttja ekvation 4.2 och lösa ut  $x_2$  kan därefter  $d$  beräknas som  $x_1 - x_2$ . Se bilaga 1.3 för härledning. Motsvarande bilder för diagrammet i figur 4.3 som anger avstånd  $d$ , ges i figur 4.4.

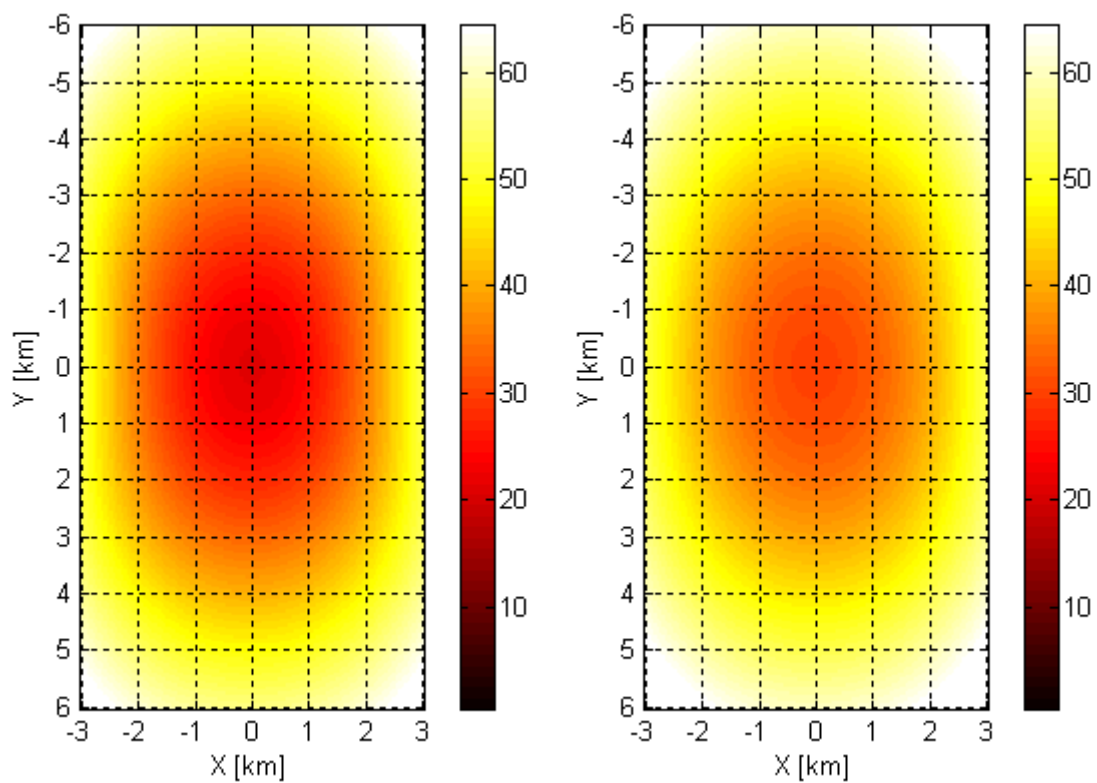


Figur 4.3 Diagram för 5 höjder. Där linlängd är 50m och FOV 1 grad. Det är endast utanför linjerna som både flygplan och släpat skenmål syns i synfältet, och därmed medger pålåsning på det släpade skenmålet.



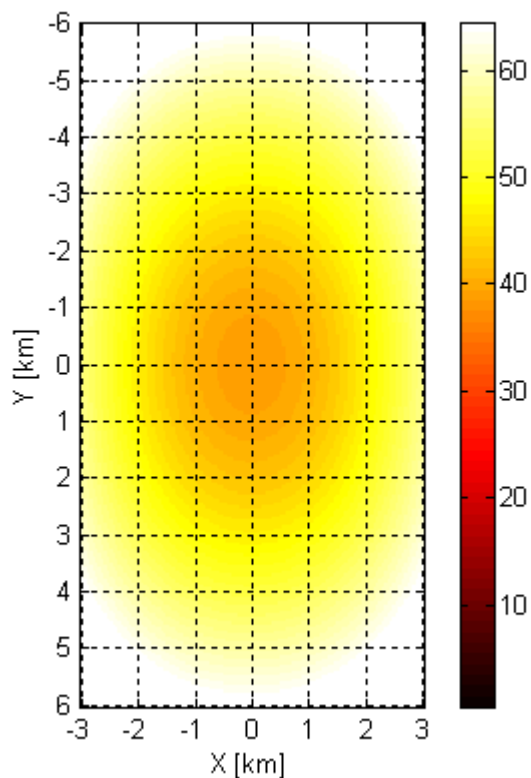
Figur 4.4 A. Höjd 500 m

B. Höjd 1500



Figur 4.4 C. Höjd 2500 m

D. Höjd 3500 m

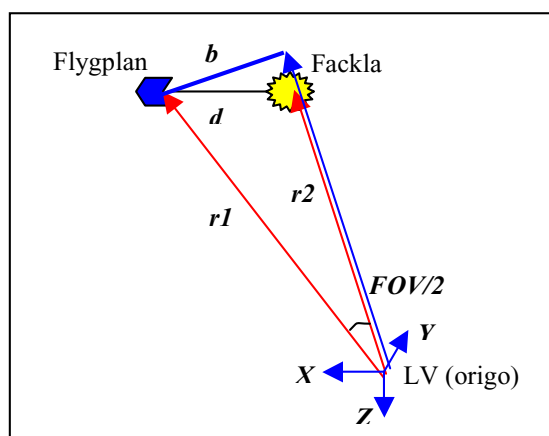


Figur 4.4

E. Höjd 4500 m

#### 4.2 Bomavstånd

Det kan vara lämpligt att se vilka bomavstånd som erhålls med den enkla geometriska modellen. Frys scenariot vid pålåsning och antag att roboten går rakt genom facklan vilket bomavstånd erhålls då?



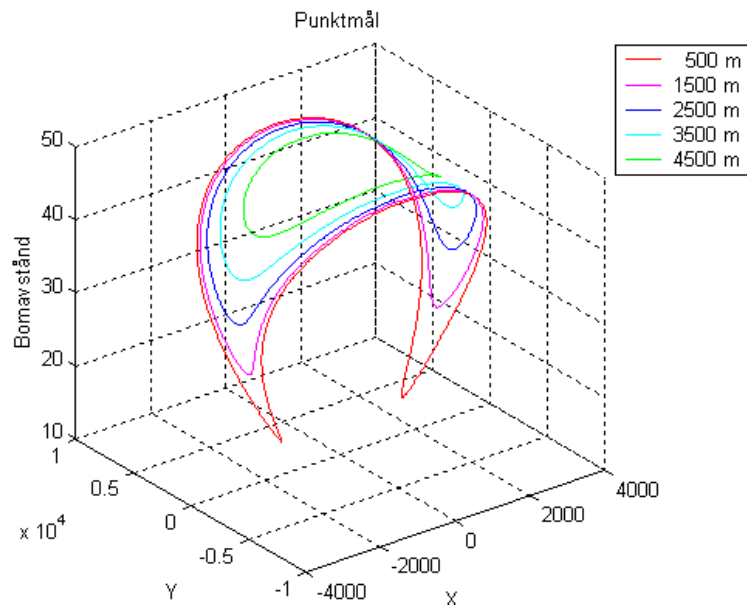
Figur 4.5 Definition av parametrar för beräkning av bomavstånd.

Geometrin enligt figur 4.5 ger

$$b = r_l * \sin(FOV/2)$$

Ekvation 4.1

och utnyttjas detta erhålls följande figur av bomavstånd för höjderna 500, 1500, 2500, 3500 och 4500 m.



Figur 4.6 Bomavstånd för vid 500, 1500, 2500, 3500 och 4500 meters höjd. Avståndet mellan mål och släpad fackla är 50 meter. FOV = 1 grad. Bomavståndet varierar mellan ca 10 till 50 meter beroende på aspektvinkel och flyghöjd.

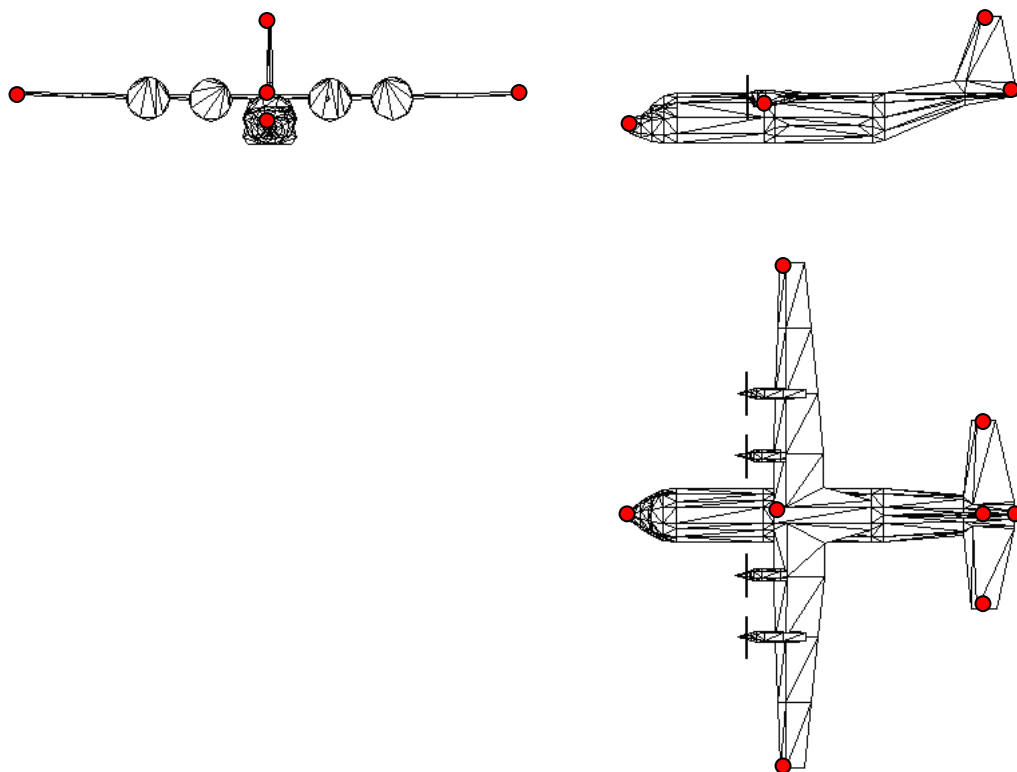
## 4.2 Utvecklad enkel geometrisk punktmodell

Den enkla modellen betraktar mål och släpat skenmål som punkter. Det kan som antytts stämma väl för det släpade skenmålet dock ej för flygplanet. I fallet med transportflygplanet TP84 som har ett vingspann på 40 meter och en längd på cirka 30 meter bör målmodellen beskrivas på ett annat sätt än som en punkt.

Figurerna på flygplanen i följande avsnitt är genererade i programmet CADIR[14] med modellunderlag från ett kommersiellt företag[15]. Då dessa modeller ibland behöver skalas har modellerna kontrollerats mot andra data[16],[17].

### 4.2.1 Modell TP84

I den utvecklade enkla geometriska punktmodellen beskrivs flygplanet med ett antal punkter. För TP84 valdes 8 punkter beskrivna i figur 4.7 a – c. Koordinaterna för punkterna är angivna i ett högerortogonalt koordinatsystem (positiva x-axeln i färdriktningen, och z-axeln nedåt) med origo i punkten som svarar mot intensitets-tyngdpunkten.



Figur 4.7 Röda punkter markerar vilka punkter på flygplanet som används vid beräkningar av bomavstånd.

De med rött markerade punkterna har givits följande koordinater.

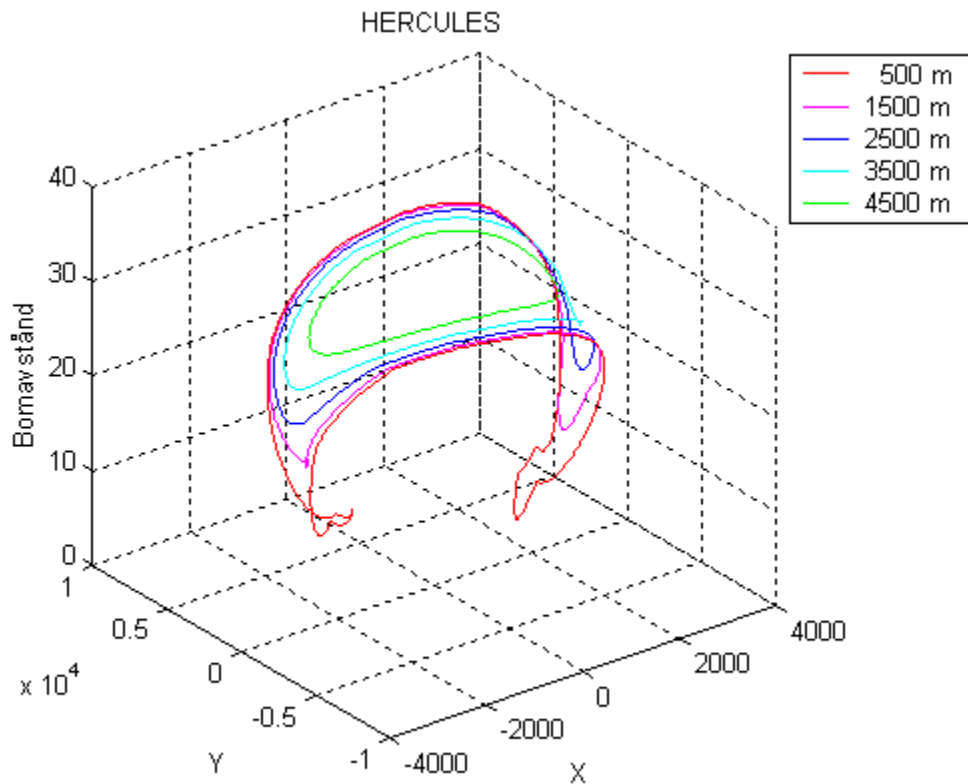
Index	X [m]	Y [m]	Z [m]	Kommentar
1	0	0	0	Intensitetstyngdpunkt
2	0	20	0	Höger vingpets
3	0	-20	0	Vänster vingpets
4	11	0	2	Nos
5	-18.5	0	0	Akter
6	-15.1	7	0	Höger bakre vinge
7	-15.1	-7	0	Vänster bakre vinge
8	-15.1	0	-5.7	Roder

Tabell 4.1. Tabell med koordinater för punktmodell TP84.

I detta fall då målet beskrivs med flera punkter, behöver beräkningsmodellen justeras m.a.p. fästpunkten för linan till det släpade skenmålet. Enklast är att ange detta som en offset i x, y



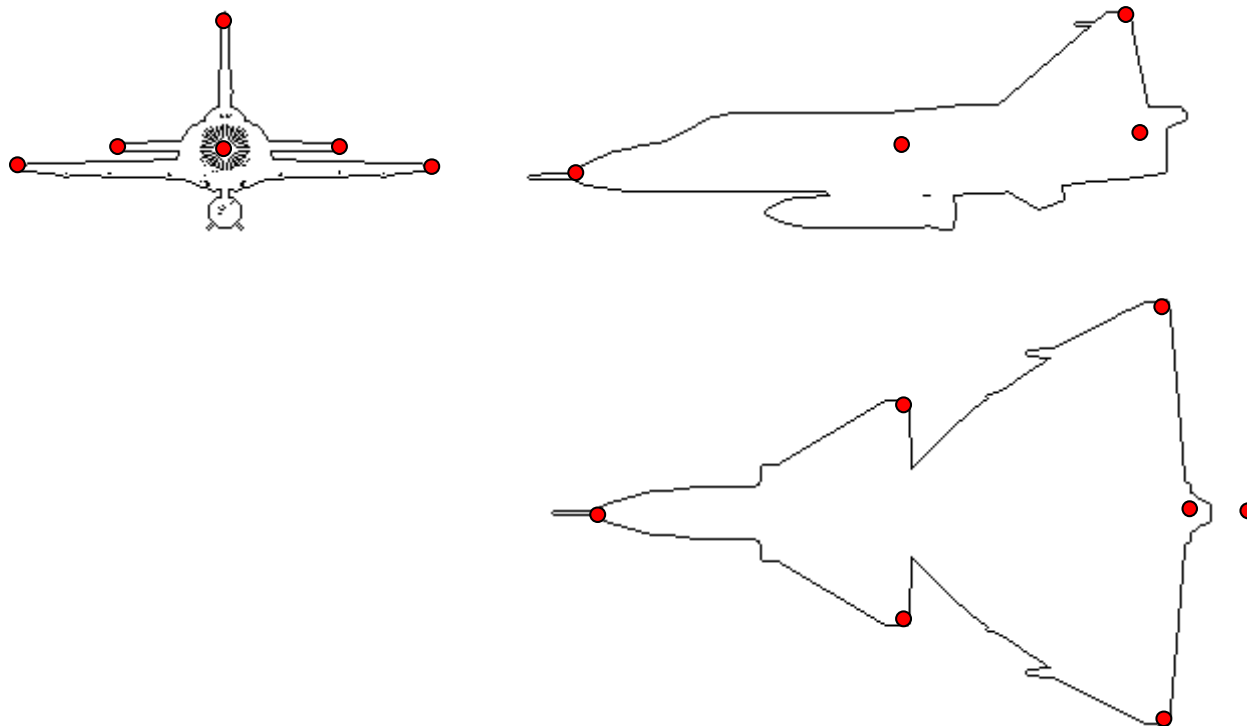
och  $z$  i förhållande till intensitetstyngdpunkten. Den som använts för figur 4.8 är  $(0, -7.4, 1)$  d.v.s. mellan motorerna på vänstra vingen.



Figur 4.8 Bomavstånd som funktion av position i  $x$  och  $y$ . Linlängd 50 m. Jämför med figur 4.6.

#### 4.2.2 Modell AJ 37 VIGGEN

På motsvarande sätt som för TP84 beskrivs Viggen med ett antal koordinatpunkter.



Figur 4.9 Röda punkter markerar vilka punkter på flygplanet som används vid beräkningar av bomavstånd.

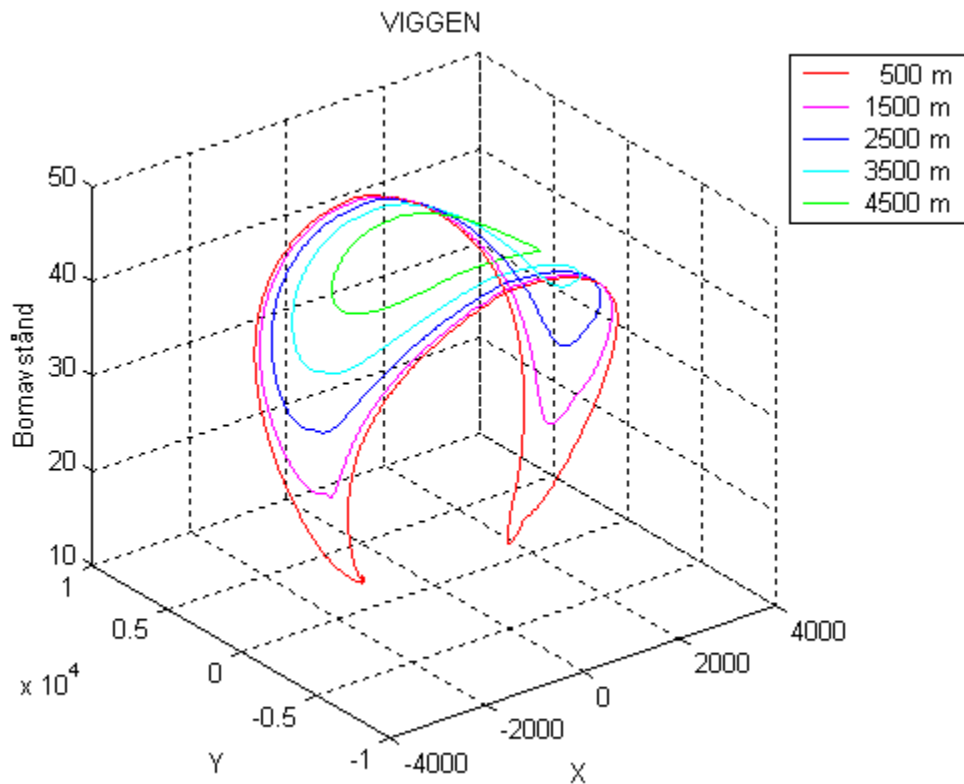
De med rött markerade punkterna har givits följande koordinater.

Index	X [m]	Y [m]	Z [m]	Kommentar
-	0	0	0	Intensitetstyngdpunkt
1	0	3	0.6	Höger främre vingpets
2	0	-3	0.6	Vänster främre vingpets
3	16.1	0	0.6	Nos
4	1	0	0	Akter
5	2	5.3	0	Höger bakre vinge
6	2	-5.3	0	Vänster bakre vinge
7	2	0	-3.7	Roder

Tabell 4.2. Tabell med koordinater för punktmodell AJ37. Intensitetstyngdpunkten är placerad ca 1 meter bakom flygplanet.

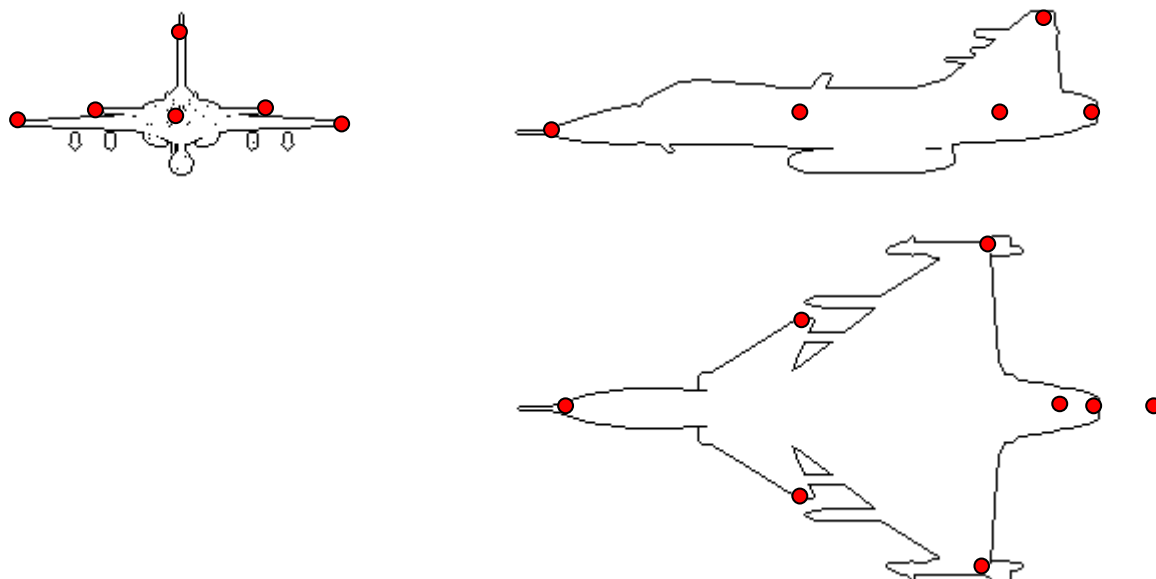
I detta fall då målet beskrivs med flera punkter, behöver beräkningsmodellen justeras m.a.p. fästpunkten för linan till det släpade skenmålet. Enklast är att ange detta som en offset i x, y

och  $z$  i förhållande till intensitetstygdpunkten. Den som använts för figur 4.10 är  $(3.8, -3, 0)$  d.v.s. på balk under vänstra vingen.



Figur 4.10 Bomavstånd som funktion av position i  $x$  och  $y$ . Linlängd 50 m Jämför med figur 4.6.

### 4.2.3 Modell JAS 39A GRIPEN



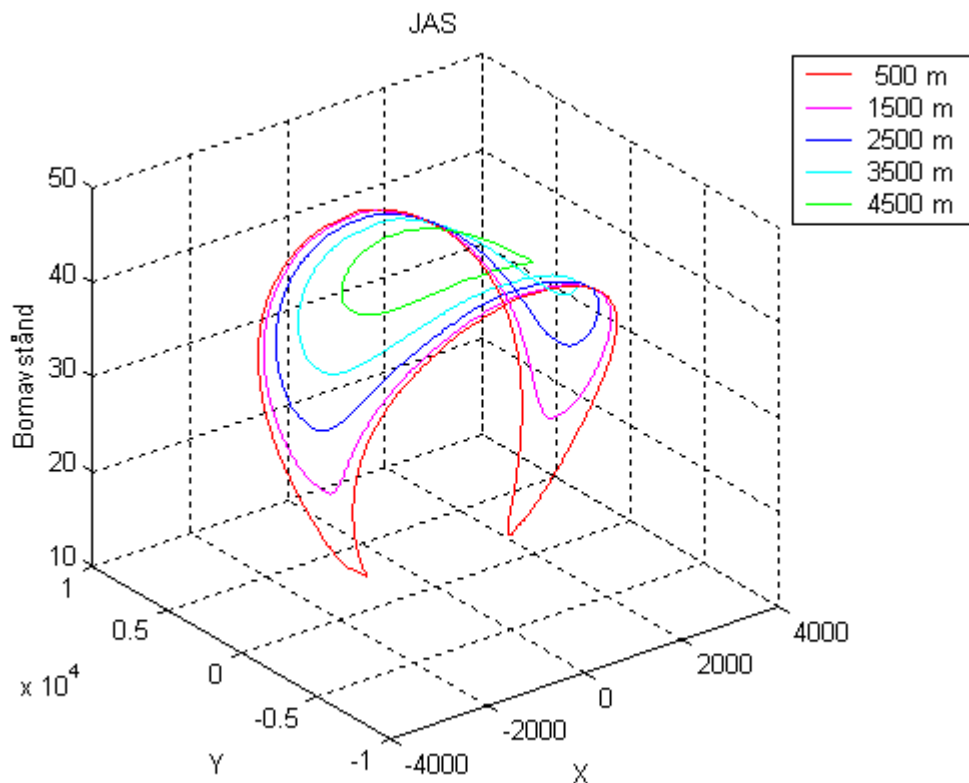
Figur 4.11 Röda punkter markerar vilka punkter på flygplanet som används vid beräkningar av bomavstånd.

De med rött markerade punkterna har givits följande koordinater.

Index	X [m]	Y [m]	Z [m]	Kommentar
-	0	0	0	Intensitetstyngdpunkt
1	0	2.2	-0.5	Höger främre vingpets
2	0	-2.2	-0.5	Vänster främre vingpets
3	14	0	0.5	Nos
4	1	0	0	Akter
5	3.5	4	0	Höger bakre vinge
6	3.5	-4	0	Vänster bakre vinge
7	2	0	-2.4	Roder

Tabell 4.3 Tabell med koordinater för punktmodell JAS39. Intensitetstyngdpunkten är placerad ca 1meter bakom flygplanet.

I detta fall då målet beskrivs med flera punkter, behöver beräkningsmodellen justeras m.a.p. fästpunkten för linan till det släpade skenmålet. Enklast är att ange detta som en offset i x, y och z i förhållande till intensitetstyngdpunkten. Den som använts för figur 4.12 är (5, -3.6, 0) d.v.s. på en balk under vänstra vingen.



Figur 4.12 Bomavstånd som funktion av position i x och y. Linlängd 50 m. Jämför med figur 4.6

### 4.3 Resultat

Utgående från de grafer redovisade i föregående avsnitt, samt viss statistik från de geometriska bomavståndsberäkningarna kan en tabell per modell ställas upp, totalt 4 tabeller (punktmål, TP84, Viggen och Jas).

Bomavstånd Punktmål					
Höjd	Medel	St. av	Median	Min	Max
<b>500</b>	34.2	10.5	35.6	14.6	50.0
<b>1500</b>	37.0	7.7	37.0	25.4	50.0
<b>2500</b>	40.1	5.3	39.6	32.9	50.0
<b>3500</b>	43.3	3.4	42.7	38.9	50.0
<b>4500</b>	46.3	1.7	45.9	44.2	50.0

Tabell 4.4 Tabell med statistik för bomavstånd för en punktmodell.

<b>Bomavstånd TP84</b>					
<b>Höjd</b>	<b>Medel</b>	<b>St. av</b>	<b>Median</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>
<b>500</b>	19.7	8.1	20.1	4.4	32.4
<b>1500</b>	22.9	5.5	22.6	12.8	32.4
<b>2500</b>	25.4	3.9	24.9	18.8	32.4
<b>3500</b>	27.9	2.5	27.6	23.9	32.4
<b>4500</b>	29.9	1.2	29.7	28.3	32.4

Tabell 4.5 Tabell med statistik för bomavstånd för punktmodell TP84.

<b>Bomavstånd VIGGEN</b>					
<b>Höjd</b>	<b>Medel</b>	<b>St. av</b>	<b>Median</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>
<b>500</b>	29.7	10.2	30.7	11.5	46.2
<b>1500</b>	33.2	7.0	32.8	22.7	46.2
<b>2500</b>	36.8	4.7	36.1	30.6	46.2
<b>3500</b>	40.3	2.7	39.7	37.0	46.2
<b>4500</b>	43.7	1.1	43.4	42.2	46.2

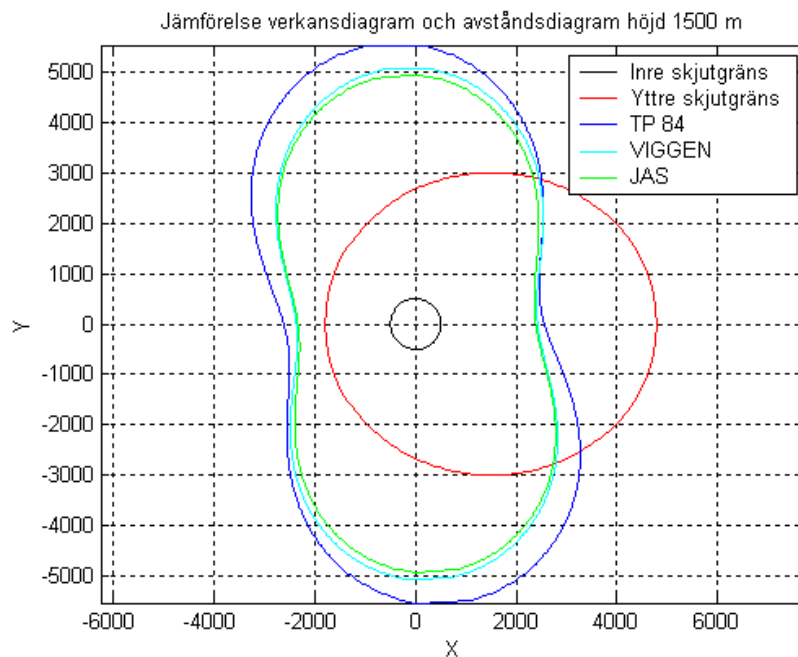
Tabell 4.6 Tabell med statistik för bomavstånd för punktmodell AJ 37 VIGGEN.

<b>Bomavstånd JAS</b>					
<b>Höjd</b>	<b>Medel</b>	<b>St. av</b>	<b>Median</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>
<b>500</b>	29.7	9.5	30.6	12.6	45.0
<b>1500</b>	32.9	6.6	32.6	23.2	45.0
<b>2500</b>	36.4	4.3	35.6	31.0	45.0
<b>3500</b>	39.8	2.4	39.2	36.8	45.0
<b>4500</b>	43.0	0.9	42.7	41.9	45.0

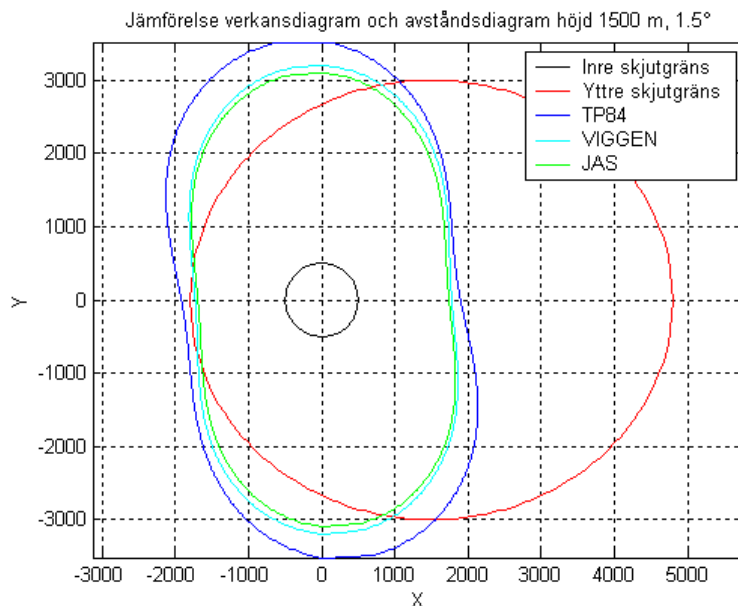
Tabell 4.7 Tabell med statistik för bomavstånd för punktmodell JAS39.

Innan jämförelse kan göras bör verkansdiagram jämföras med avståndsdigram. Då erhålls en kvantitativ uppfattning om under vilka förutsättningar som släpad fackla kan göra nytta för att undvika pålåsning .

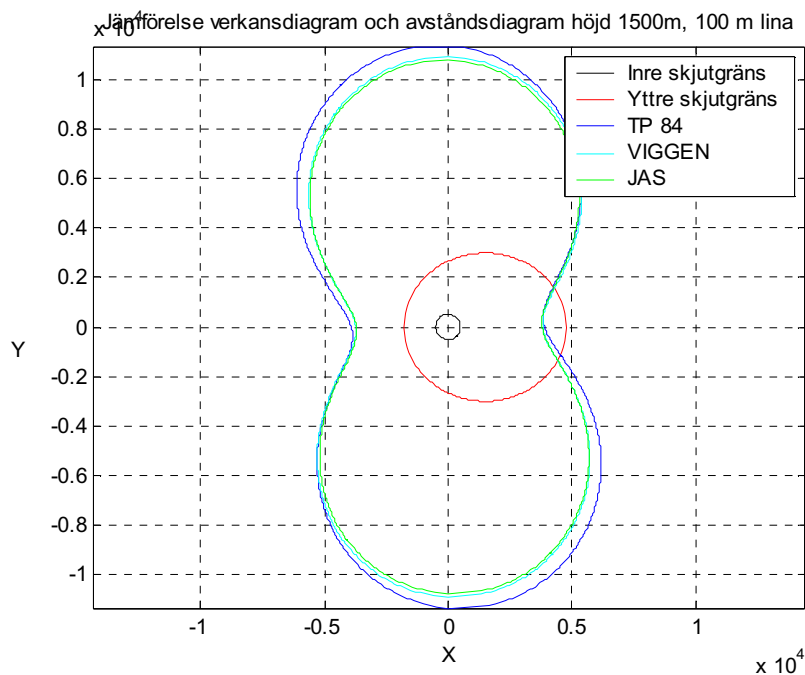
Figurerna 4.13 och 4.14 visar vilket område där släpat skenmål kan utnyttjas för påhakning, innanför den röda cirkel men utanför den blå, cyan och grön färgade kurvorna, för 1.0 respektive 1.5 ° synfält samt 1500 meters höjd och där draglinans längd är 50m. I figurerna 4.15 och 4.16 visar vilket område där släpat skenmål kan utnyttjas för påhakning, innanför den röda cirkel men utanför den blå, cyan och grön färgade kurvorna, för 1.0 respektive 1.5 ° synfält samt 1500 meters höjd och där draglinans längd är 100m. Som framgår av figurerna nedan är det optimala utfallet presenterat i figur 4.14 där ca 50% av verkansområdet kan klaras med släpat skenmål.



*Figur 4.13 Jämförelse mellan standardiserat verkansdiagram (avfyrings zon eng. launch zone) och avståndsdigram för de tre flygplanstyperna. Avståndsdigrammen visar utanför vilket avstånd flygplan och släpad fackla båda syns inom halva målsökarens synfält (0.5 grader). Flygplanets färdriktning från höger till vänster.*

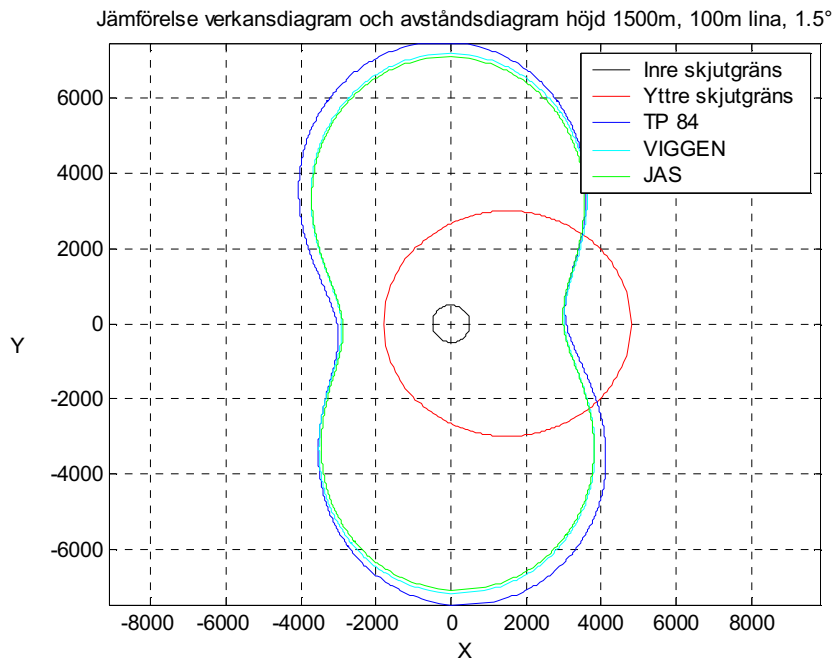


Figur 4.14 Jämförelse mellan standardiserat verkansdiagram (avfyrings zon eng. launch zone) och avståndsdigram för de tre flygplanstyperna. Avståndsdigrammen visar vid vilket avstånd flygplan och släpad fackla båda syns inom halva målsökarens synfält (0.75 grader).



Figur 4.15 Jämförelse mellan standardiserat verkansdiagram (avfyrings zon eng. launch zone) och avståndsdigram för de tre flygplanstyperna där draglinan är 100 m. FOV = 1 grad.





Figur 4.16 Jämförelse mellan standardiserat verkansdiagram (avfyrings zon eng. launch zone) och avståndsdigram för de tre flygplanstyperna där draglinan är 100 m. FOV = 1.5 °.

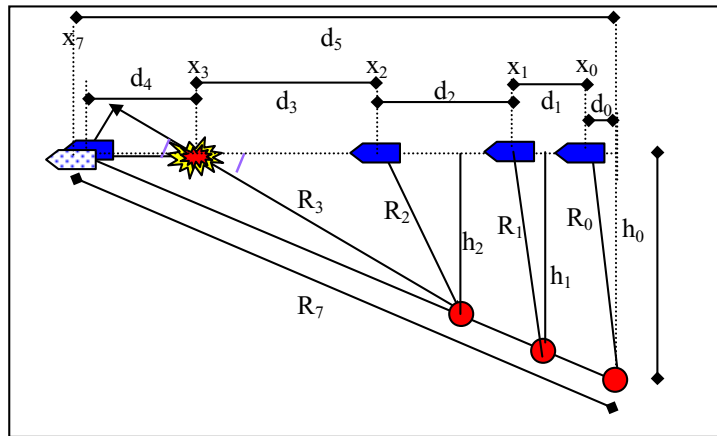
## 5. Avhakning

Tidigare avsnitt pekar på vissa svårigheter, p.g.a. geometriska förhållanden, med att lyckas med påhakning av manburna IR-robotar (manpads) mot luftmål. Konceptet kan kanske utnyttjas för avhakning mot IR-målsökare. För att se om avhakning kan lyckas har konceptet studerats närmare genom att geometriska beräkningar gjorts. Det som beräknas är bomavstånd, linlängd givet bl.a vinschhastighet. Vissa antaganden har gjorts inför beräkningarna. Dessa är:

- Flygplanet betraktas som en punktmål som flyger på konstant höjd med konstant fart
- Robotens målsökare har låst på flygplanet vid avfyring
- Robotens hastighet är konstant
- Roboten har en ideal syftbäringsstyrning
- När skenmålet aktiveras låser målsökaren direkt över på skenmålet

## 5.1 Beräkningsmodell avseende geometri

Betrakta figuren nedan som visar det förenklade scenario som simulerats.



Figur 5.1 Schematisk bild över förlopp och positioner i tid och rum. Blått objekt symboliserar flygplanets position och rött objekt robotens position vid olika tidsögonblick. Det blå prickiga objektet indikerar var roboten skulle träffa flygplanet om motmedel ej sätts in.

Det finns ett antal tidpunkter som är av intresse för beräkningarna. Dessa är

$t_0$	Roboten avfyras
$t_{träff}$	Roboten träffar flygplanet om skenmål ej används
$t_d$	Roboten detekteras av flygplanets varnarsystem
$t_a$	Skenmål aktiveras efter tiden $t_a$ från detektion
$t_i$	Roboten träffar skenmålet (tid från aktivering till träff)
$t_p$	Roboten passerar flygplanet (i fallet kommande flygplan händer $t_p$ före $t_i$ )

Vid avfyring ges flygplanets koordinater av  $(x_0, y_0, z_0)$  och roboten är placerad i origo. Flygplanet flyger parallellt med x-axeln i positiv riktning. För att beräkna positionerna för robot och flygplan vid tidpunkterna  $t_d$  och  $t_a$  beräknas först tidpunkt för träff om motmedel ej sätts in. Ur figuren ovan erhålls

$$d_7^2 + h_0^2 = R_7^2 \quad \text{Ekvation 5.1}$$

Vilket kan skrivas i kända storheter som

$$(x_0 + v_{fpl} t_{träff})^2 + (y_0^2 + z_0^2) = v_{rb}^2 t_{träff}^2 \quad \text{Ekvation 5.2}$$

Genom att beräkna  $t_{träff}$  kan robotens hastighetsvektor beräknas.

$$\hat{v}_{rb} = \begin{cases} v_x = (x_0 + v_{fpl} t_{träff}) / t_{träff} \\ v_y = y_0 / t_{träff} \\ v_z = z_0 / t_{träff} \end{cases} \quad \text{Ekvation 5.3}$$

Robotens hastighetsvektor utnyttjas för att beräkna tiden  $t_d$  från avfyring tills roboten detekteras enligt:

$$(x_0 + v_{fpl} t_d - v_x t_d)^2 + (y_0 - v_y t_d)^2 + (z_0 - v_z t_d)^2 = d_d^2 \quad \text{Ekvation 5.4}$$

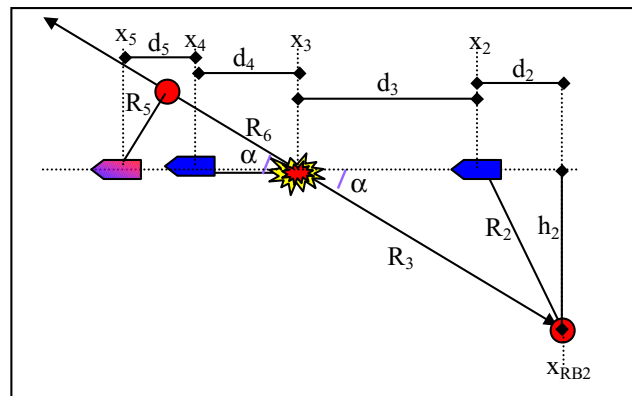
Till tiden  $t_d$  läggs tiden  $t_a$  (tid från detektion till aktivering) vilket ger

$$t_a = t_d + t_r \quad \text{Ekvation 5.5}$$

Som utnyttjas för att beräkna positioner för robot och flygplan

$$P_{rb} = \begin{cases} x_{rb} = v_x t_a \\ y_{rb} = v_y t_a \\ z_{rb} = v_z t_a \end{cases} \quad P_{fpl} = \begin{cases} x_{fpl} = x_0 + v_{fpl} t_a \\ y_{fpl} = y_0 \\ z_{fpl} = z_0 \end{cases} \quad \text{Ekvation 5.6}$$

Betrakta nu figur 5.2 för härledning av de ekvationer som behövs.



Figur 5.2 Schematisk bild över förlopp och positioner i tid och rum.

För att kunna beräkna bomavstånd måste först tiden  $t_i$  (tid från aktivering till träff i skenmål) beräknas.  $t_i$  kan erhållas ur

$$(d_2 + d_3)^2 + h_2^2 = R_3^2 \quad \text{Ekvation 5.7}$$

Vilket kan tecknas som

$$(x_{fpl} + v_{fpl} t_i - v_{insch} t_i - x_{rb})^2 + \sqrt{(y_{fpl} - y_{rb})^2 + (z_{fpl} - z_{rb})^2}^2 = t_i^2 v_{rb}^2 \quad \text{Ekvation 5.8}$$

När tiden är beräknad kan nu vinkeln alfa beräknas ur

$$\sin(\alpha) = \frac{h_2}{R_3} = \frac{\sqrt{(y_0 - y_{rb})^2 + (z_0 - z_{rb})^2}}{v_{rb} t_i} \quad \text{Ekvation 5.9}$$

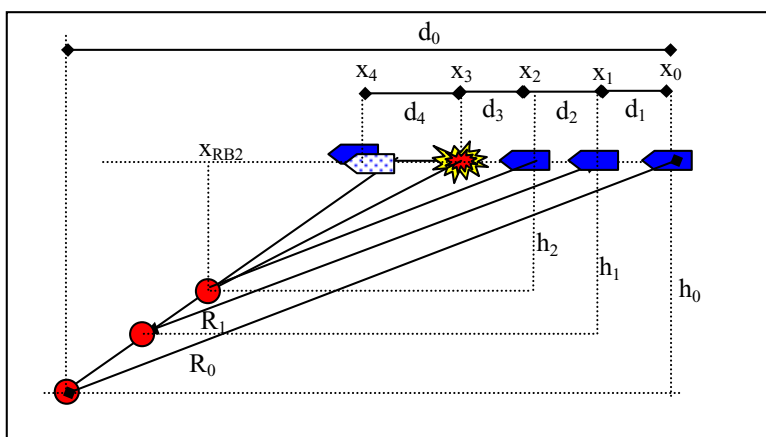
Beräkning av tiden för passage fås ur

$$\cos(\alpha) = \frac{R_6}{d_4 + d_5} = \frac{{}^t_p v_{rb}}{{}^t_i v_{vinsch} + {}^t_p v_{fpl}} \quad \text{Ekvation 5.10}$$

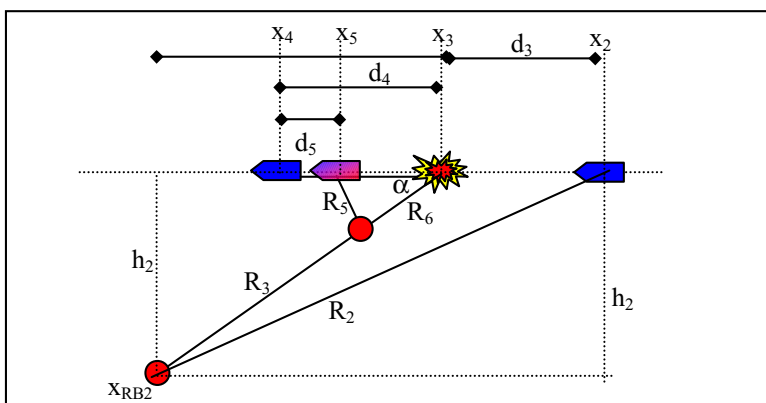
Bomavstånd kan nu beräknas ur

$$\tan(\alpha) = \frac{R_5}{R_6} = \frac{d_{miss}}{{}^t_p v_{rb}} \quad \text{Ekvation 5.11}$$

Härledningar finns utvecklade i bilaga 2.1. Det som beskrivits ovan är gående mål. För kommande mål är det endast beräkning av tid för passage som ändras. Se nedan.



Figur 5.3 Schematisk bild över förlopp och positioner i tid och rum för kommande mål. Jmfr med fig 5.1.



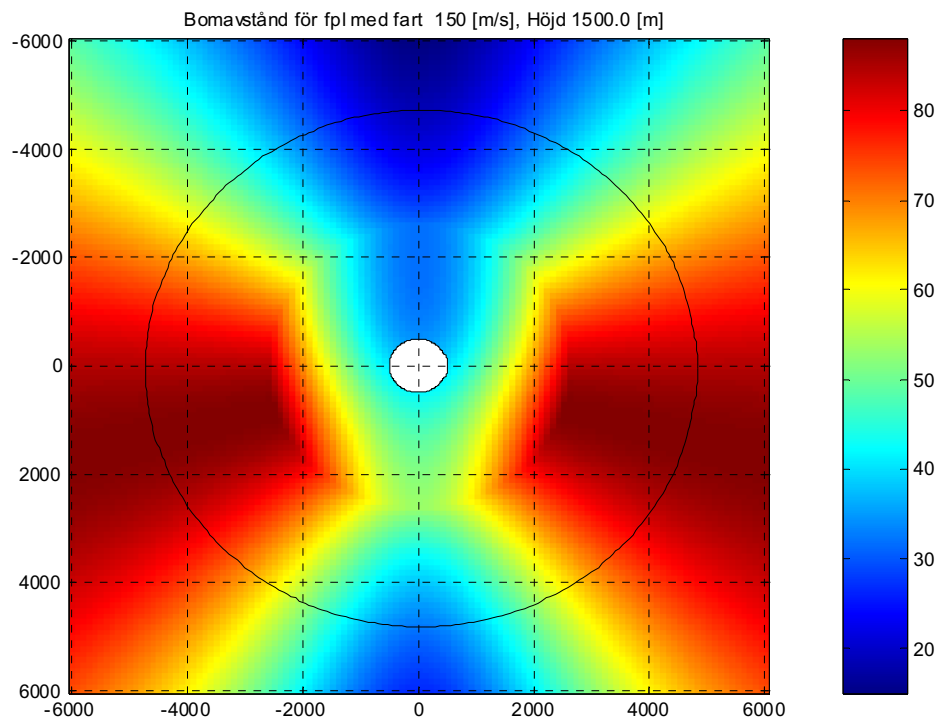
Figur 5.4 Schematisk bild över förlopp och positioner i tid och rum för kommande mål. Jmfr med fig 5.2 .

Beräkning av tiden för passage fås ur

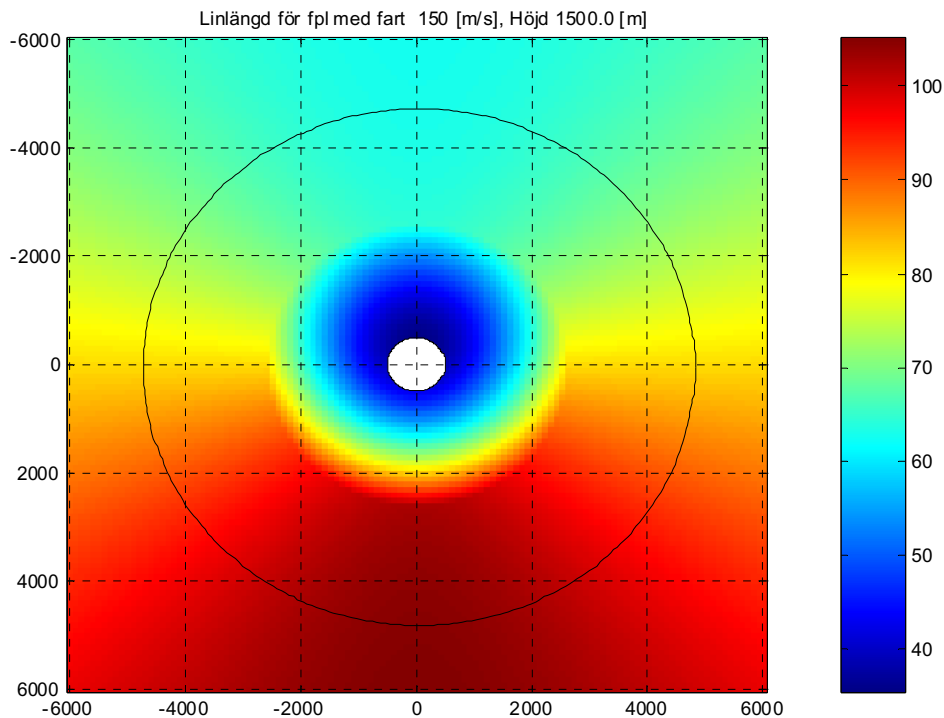
$$\cos(\alpha) = \frac{R_6}{d_4 - d_5} = \frac{{}^t_p v_{rb}}{{}^t_i v_{vinsch} - {}^t_p v_{fpl}} \quad \text{Ekvation 5.12}$$

## 5.2 Resultat

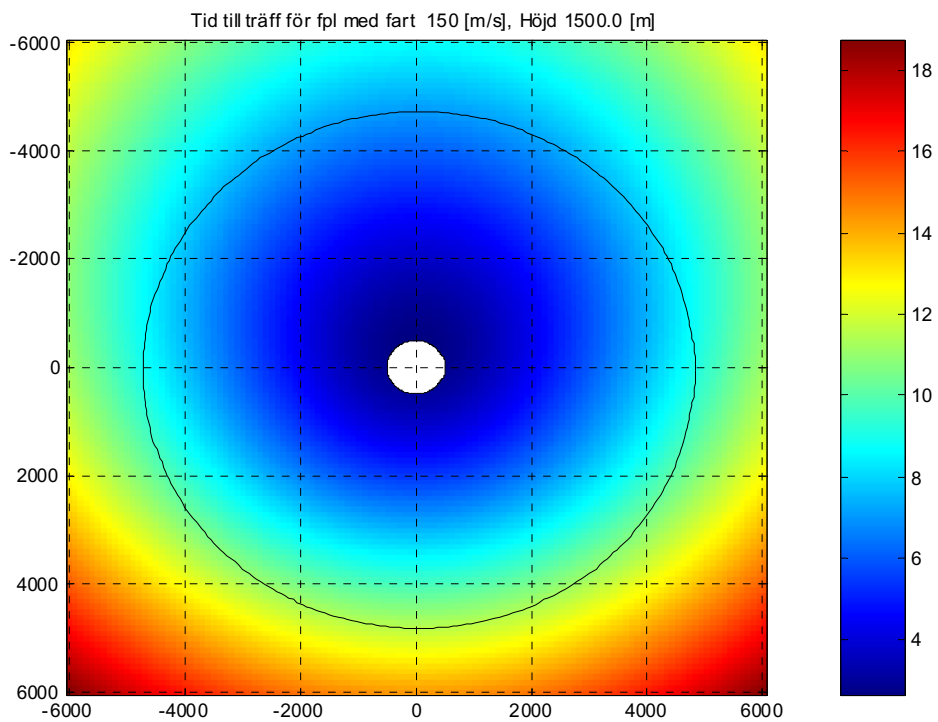
Det som har beräknats är bomavstånd ( $R_5$  - beteckning i figur 5.2 och 5.4) som funktion av vinschhastighet. I beräkningarna har vinschhastigheten satts till 17 m/s vilket svarar mot den hastighet med vilken det släpade skenmålet bedöms kunna släppas ut. Vidare beräknas linlängd, samt tid till träff. I de beräkningar som har gjorts har flygplanets hastighet satts till 150 m/s (ungefärlig hastighet TP84) respektive 300 m/s (svarande mot jaktflyg). Robotens medelhastighet har satts till 570 m/s vilket motsvarar värsta fallet. Vidare har avstånd för pålåsning satts till ca 5 km avstånd horisonten runt. Varnarfunktionen hos flygplanet har satts till 3 km avstånd. Reaktionsid från varning till utvinschning av släpmål har satts till 0.5 sekunder. Se figurerna nedan för resultat. Färdriktningen för flygplanet är nedåt i figurerna.



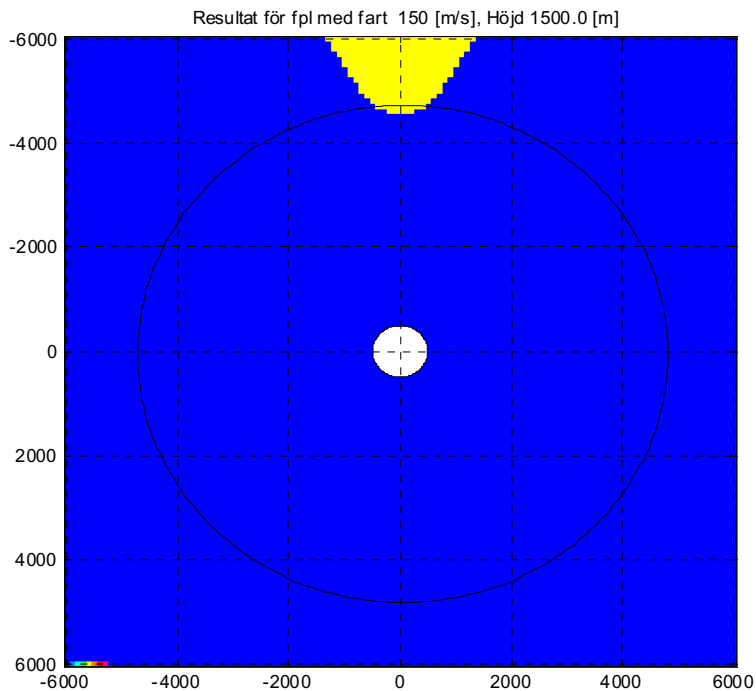
Figur 5.5 Minsta bomavstånd 14.92 m .



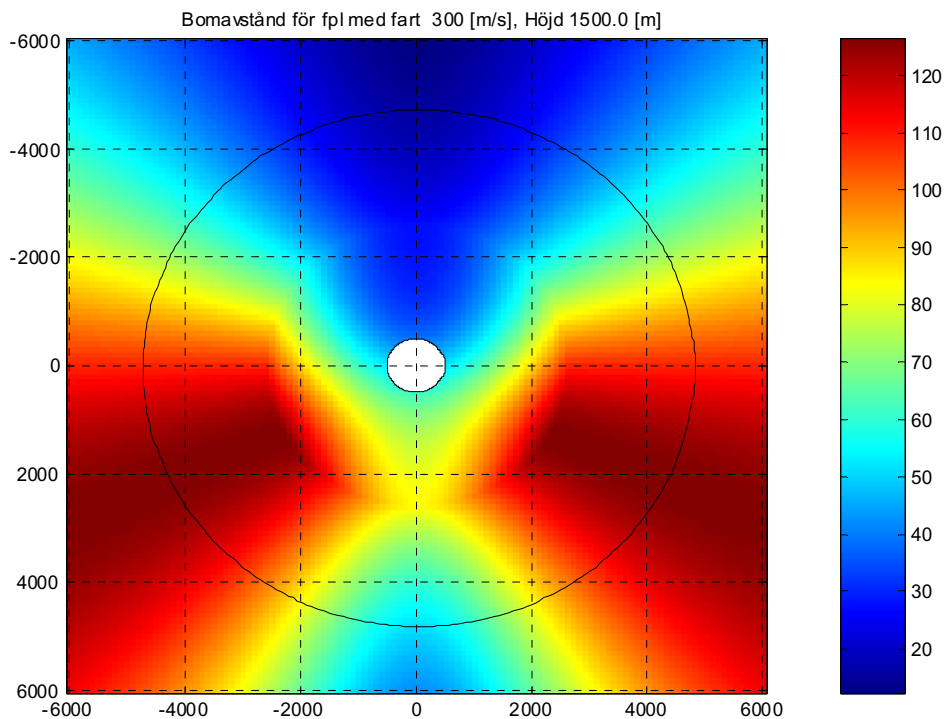
Figur 5.6 Linlängd.



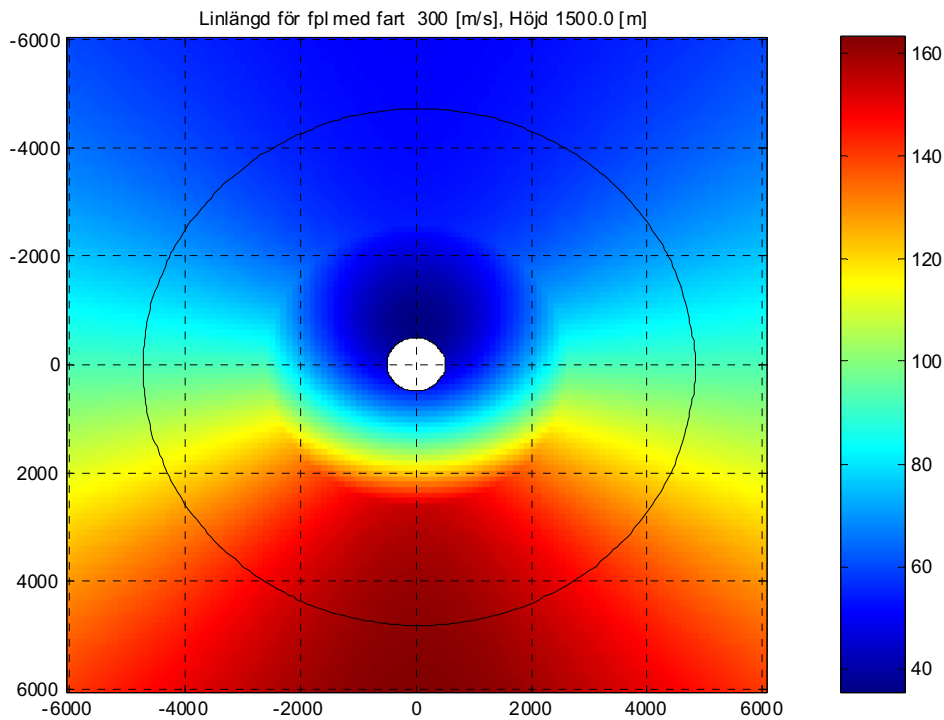
Figur 5.7 Tid från avfyring till träff i skenmål.



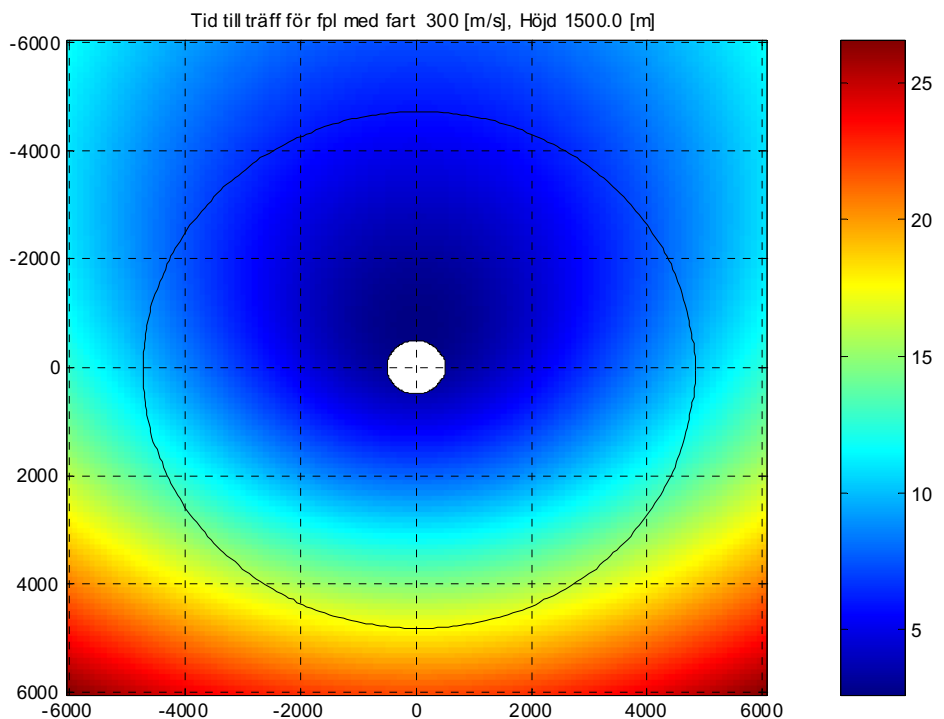
Figur 5.8 Sammanvägt resultat. Det gulmarkerade området indikerar var bomavståndet understiger 20 meter.



Figur 5.9 Minsta bomavstånd 12.18 m .

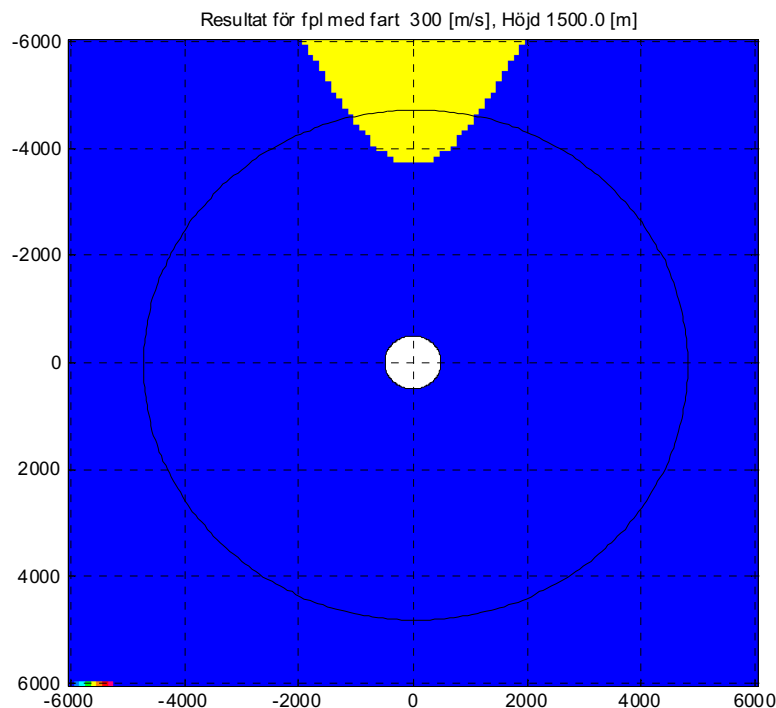


Figur 5.10 Linlängd.



Figur 5.11 Tid till träff.





Figur 5.12 Sammanvägt resultat. Det gulmarkerade området indikerar var bomavståndet understiger 20 meter.

## 6. Diskussion och slutsatser

I rapporten har konceptet släpat IR-skenmål studerats avseende påhakning och avhakning mot manburet luftvärn. De beräkningar som gjorts bygger enbart på de geometrier som kan uppstå och är gjorda i beräkningsprogrammet MatLab. Härledningar för de ekvationer som utnyttjats är angivna i bilagorna 1 och 2.

För påhakningsfallet har beräkningar gjorts under förutsättningen att flygplanet (målet) är i centrum av synfältet vid pålåsning. Det är naturligt att anta att i realiteten kommer detta inte vara helt sant beroende på svårigheten att hålla det manburna systemet utan skakning. Detta inverkar naturligtvis på det i tidigare redovisade resultatet i vissa fall till det bättre och i vissa till det sämre.

För påhakning med en längd på draglinan om 100 meter är det tveksamt om det är möjligt att få någon påhakningseffekt. Om draglinans längd minskas till 50 meter uppnås effekt i större utsträckning och i det område rör sig de kortaste bomavstånden kring 12 till 31 meter beroende på vilken flygplanstyp som studeras.

Uppväger då ett aktivt släpat skenmål de eventuella nackdelarna i form av ökade upptäckts-  
möjligheter? Det är tveksamt då optimala påhåkningsfallet är 50 meters längd på draglinan  
och ett synfält om  $1.5^\circ$  hos målsökaren (för flyghöjden 1500 meter). Då erhålls en möjlig  
effekt på ca 35-50% av lv-systemets täckningsområde. Vidare kan det bli problem med  
varaktigheten för skenmålet. Med varaktighet avses här möjligheten att under tillräckligt lång  
tid ha ett aktivt skenmål.

Slutsatsen av ovanstående tyder på att det är mycket tveksamt att utnyttja släpat IR-skenmål i  
påhåkningssyfte mot manburet luftvärn.

Om släpat skenmål ska användas i avhåkningssyfte kräver det integration med ett  
varnarsystem, som initierar det släpade skenmålet för att få avhåkningseffekt. I exemplen  
ovan har robothastigheten valts till 570 m/s vilket representerar en av de högsta hastigheterna  
för denna typ av system. Räckviddsgränsen 5 km vid avfyring bygger på att låsning erhållits  
tidigare vilket framförallt i framifrånsektorn kan vara tvivelaktigt. För varnarfunktionen är 3  
km vad systemen idag förväntas kunna klara. Tiden från varning till aktivering av skenmålet  
har satts till 0.5 sekunder vilket nog får anses var något optimistiskt. Men simuleringsresultat  
visar att det endast är en marginell ändring om aktiveringstiden ändras från 0.5 till 1.0 sekund.  
Resultaten och slutsatserna av det redovisade pekar på stora möjligheter med ett släpat IR-  
skenmål mot "manpads" i avhåkningssyfte. Nu bygger detta på statiska beräkningar ej på  
dynamiska simuleringar (d.v.s. ingen hänsyn har tagits till bl.a. målsökarens följeförmåga och  
störskydd). För det fortsatta arbetet bör nu de redovisade fallen studeras med dynamiska  
simuleringar, med utgångspunkt från detta dokument. Vidare bör de krav som ställs på  
varnare för flygplan studeras närmare.

## 7. Referenser

- [ 1 ] Alfred Price, The US History of Electronic Warfare, vol II The Renaissance Years, 1946 to 1964, The Association of Old Crows, oktober 1989
- [ 2 ] Don Herskovitz , IS Seeing Believing? , Journal of Electronic Defense april 1998
- [ 3 ] Kenneth B. Sherman, When Weapons Cheat, Journal of Electronic Defense juli 2000
- [ 4 ] H Gersanoff & Don Herskovitz , Smart IR Towed Decoy to be Tested, Journal of Electronic Defense mars 1999
- [ 5 ] Kenneth B. Sherman and Brendan P.Rivers, A new generation of advanced decoys throws its hat in the ring., Journal of Electronic Defense jan 2001
- [ 6 ] Lars Berglund , Passiv Optronisk Målföljning, Kurskompendium FOI, 1999
- [ 7 ] Mikael Hansson, Lektionsanteckningar 1-2, Retikelsystem ingående i Robusta Optroniksystem, FOI
- [ 8 ] Anatoly Sokolov , Russian-made SAMS as Mainstay of Emerging Layered Air Defences , ARMS Russian Defence Technologies 2(3). 2001 sid 28-31
- [ 9 ] Steven Zaloga , Russian Manportable Surface-to-Air Missiles, Jane's Intelligence Review, Europe – April 1994, (sid 147 – 153)
- [ 10 ] Vyacheslav Kokurin & Valery Parkhomenko, Modernization of Strela-10 Air Defence Missile Systems , Military Parade November December 2000, sid 46-47
- [ 11 ] källa Armenejskij Sbornik, nr 3, 1994, Notiser från flygmateriel und nr 11 1994, Översättning av Gösta Bergman, FMV:FMLUnd
- [ 12 ] Mark Hewish, Surviving a SAM Attack, Jane's International Defense Review 1996:6, sid 61-66
- [ 13 ] Ingelstam, Rönngren och Sjöberg, Tefyma, Sjöbergs förlag Stockholm/Bromma, 1977, sidan 14
- [ 14 ] Lars Berglund, Carl Hedberg, CADIR – A Model For Generating Infrared Images, FOA-R-94-00059-3.6--SE, December 1994
- [ 15 ] Viewpoint, modell bibliotek Air\_power  
VP4633 C130  
VP19963 AJ-37 VIGG  
VP144462 JAS-39A
- [ 16 ] Flygplanskort 1987, M7745-500062, Gunnarssons Tryckeri AB, Falköping 1987
- [ 17 ] John W. R. Taylor, Jane's All the Worlds Aircraft 1985-86



## Bilaga 1.1 Beräkning av generella fallet för y-värden då x, z, d, dv och FOV givna

$$\cos \varphi = \frac{v_1 v_2}{|v_1| |v_2|} = \frac{x_1 x_2 + y_1 y_2 + z_1 z_2}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2} \sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2}}$$

$$\varphi = \frac{FOV}{2}; x_1 = x; x_2 = x + d_x - d; y_1 = y; y_2 = y + d_y; z_1 = z; z_2 = z + d_z;$$

$$\cos\left(\frac{FOV}{2}\right) = \frac{x(x + d_x - d) + y(y + d_y) + z(z + d_z)}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \sqrt{(x + d_x - d)^2 + (y + d_y)^2 + (z + d_z)^2}}$$

$$c_1 = \cos\left(\frac{FOV}{2}\right); c_2 = x(x + d_x - d) + z(z + d_z); c_3 = x^2 + z^2; c_4 = (x + d_x - d)^2 + (z + d_z)^2;$$

$$c_1 = \frac{y(y + d_y) + c_2}{\sqrt{y^2 + c_3} \sqrt{(y + d_y)^2 + c_4}}$$

$$c_1 \sqrt{y^2 + c_3} \sqrt{(y + d_y)^2 + c_4} = y(y + d_y) + c_2$$

$$c_1^2 (y^2 + c_3) (y^2 + 2d_y y + d_y^2 + c_4) = (y^2 + yd_y + c_2)^2$$

$$\begin{aligned} c_1^2 (y^4 + 2d_y y^3 + (d_y^2 + c_4 + c_3) y^2 + 2d_y c_3 y + (d_y^2 + c_4) c_3) = \\ = y^4 + 2d_y y^3 + (2c_2 + d_y^2) y^2 + 2yd_y c_2 + c_2^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (c_1^2 - 1) y^4 + (c_1^2 - 1) 2d_y y^3 + [c_1^2 (d_y^2 + c_4 + c_3) - (2c_2 + d_y^2)] y^2 + \\ 2d_y (c_1^2 c_3 + c_2) y + (d_y^2 + c_4) c_3 c_1^2 - c_2^2 = 0 \end{aligned}$$

$$k_1 = c_1^2 - 1$$

$$k_2 = k_1 2d_y$$

$$k_3 = c_1^2 (d_y^2 + c_4 + c_3) - (2c_2 + d_y^2)$$

$$k_4 = 2d_y (c_1^2 c_3 - c_2)$$

$$k_5 = (d_y^2 + c_4) c_3 c_1^2 - c_2^2$$

**Bilaga 1.2 Beräkning av generella fallet för x-värden då y, z, d, dv och FOV givna**

$$\cos \varphi = \frac{v_1 v_2}{|v_1| |v_2|} = \frac{x_1 x_2 + y_1 y_2 + z_1 z_2}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2} \sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2}}$$

$$\varphi = \frac{FOV}{2}; x_1 = x; x_2 = x + d_x - d; y_1 = y; y_2 = y + d_y; z_1 = z; z_2 = z + d_z;$$

$$\cos\left(\frac{FOV}{2}\right) = \frac{x(x + d_x - d) + y(y + d_y) + z(z + d_z)}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \sqrt{(x + d_x - d)^2 + (y + d_y)^2 + (z + d_z)^2}}$$

$$c_1 = \cos\left(\frac{FOV}{2}\right); c_2 = y(y + d_y) + z(z + d_z); c_3 = y^2 + z^2; c_4 = (y + d_y)^2 + (z + d_z)^2;$$

$$c_1 = \frac{x(x + d_x - d) + c_2}{\sqrt{x^2 + c_3} \sqrt{(x + d_x - d)^2 + c_4}}$$

$$c_1 \sqrt{x^2 + c_3} \sqrt{(x + d_x - d)^2 + c_4} = x(x + d_x - d) + c_2$$

$$c_1^2 (x^2 + c_3) (x^2 + 2(d_x - d)x + (d_x - d)^2 + c_4) = (x^2 + (d_x - d)x + c_2)^2$$

$$\begin{aligned} c_1^2 (x^4 + 2(d_x - d)x^3 + ((d_x - d)^2 + c_4 + c_3)x^2 + 2c_3(d_x - d)x + ((d_x - d)^2 + c_4)c_3) = \\ = x^4 + 2(d_x - d)x^3 + (2c_2 + (d_x - d)^2)x^2 + 2c_2(d_x - d)x + c_2^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (c_1^2 - 1)x^4 + (c_1^2 - 1)2(d_x - d)x^3 + [c_1^2((d_x - d)^2 + c_4 + c_3) - (2c_2 + (d_x - d)^2)]x^2 + \\ 2(d_x - d)(c_1^2 c_3 - c_2)x + ((d_x - d)^2 + c_4)c_3 c_1^2 - c_2^2 = 0 \end{aligned}$$

$$k_1 = c_1^2 - 1$$

$$k_2 = k_1 2(d_x - d)$$

$$k_3 = c_1^2 ((d_x - d)^2 + c_4 + c_3) - (2c_2 + (d_x - d)^2)$$

$$k_4 = 2(d_x - d)(c_1^2 c_3 - c_2)$$

$$k_5 = ((d_x - d)^2 + c_4)c_3 c_1^2 - c_2^2$$

**Bilaga 1.3 Beräkning av avstånd d mellan mål och släpat IR-skenmål**

$$\cos \varphi = \frac{v_1 v_2}{|v_1| |v_2|} = \frac{x_1 x_2 + y_1 y_2 + z_1 z_2}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2} \sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2}}$$

$$\varphi = \frac{FOV}{2}; x = x_1; y = y_1 = y_2; z = z_1 = z_2;$$

$$\cos\left(\frac{FOV}{2}\right) = \frac{xx_2 + y^2 + z^2}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \sqrt{x_2^2 + y^2 + z^2}}$$

$$c_1 = \cos\left(\frac{FOV}{2}\right); c_2 = y^2 + z^2; c_3 = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

$$c_1 = \frac{xx_2 + c_2}{c_3 \sqrt{x_2^2 + c_2}}$$

$$c_1 c_3 \sqrt{x_2^2 + c_2} = xx_2 + c_2$$

$$\sqrt{x_2^2 + c_2} = \frac{xx_2 + c_2}{c_1 c_3}$$

$$x_2^2 + c_2 = \left(\frac{xx_2 + c_2}{c_1 c_3}\right)^2$$

$$c_1^2 c_3^2 (x_2^2 + c_2) = x^2 x_2^2 + 2xx_2 c_2 + c_2^2$$

$$c_1^2 c_3^2 x_2^2 - x^2 x_2^2 - 2xx_2 c_2 + c_1^2 c_3^2 c_2 - c_2^2 = 0$$

$$(c_1^2 c_3^2 - x^2) x_2^2 - 2xx_2 c_2 + (c_1^2 c_3^2 c_2 - c_2^2) = 0$$

$$x_2^2 - \frac{2xc_2}{(c_1^2 c_3^2 - x^2)} x_2 + \frac{(c_1^2 c_3^2 c_2 - c_2^2)}{(c_1^2 c_3^2 - x^2)} = 0$$

$$c_4 = \frac{xc_2}{(c_1^2 c_3^2 - x^2)}; c_5 = \frac{(c_1^2 c_3^2 c_2 - c_2^2)}{(c_1^2 c_3^2 - x^2)};$$

$$x_2 = c_4 \pm \sqrt{c_4^2 - c_5}$$

$$d = \text{abs}(x_1 - x_2)$$

## Bilaga 2.1 Beräkningar för avhakning

Beräkning av tid till träff om motmedel ej används

$$\begin{aligned}
 d_7^2 + h_0^2 &= R_7^2 \\
 (x_0 + x_7)^2 + h_0^2 &= R_7^2 \\
 (x_0 + v_{fpl} t_{träff})^2 + (y_0^2 + z_0^2) &= v_{rb}^2 t_{träff}^2 \\
 x_0^2 + 2x_0 v_{fpl} t_{träff} + v_{fpl}^2 t_{träff}^2 + y_0^2 + z_0^2 - v_{rb}^2 t_{träff}^2 &= 0 \\
 (v_{fpl}^2 - v_{rb}^2) t_{träff}^2 + 2x_0 v_{fpl} t_{träff} + x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 &= 0 \\
 t_{träff} &= \frac{x_0 v_{fpl}}{v_{rb}^2 - v_{fpl}^2} \pm \sqrt{\left( \frac{x_0 v_{fpl}}{v_{rb}^2 - v_{fpl}^2} \right)^2 + x_0^2 + y_0^2 + z_0^2}
 \end{aligned}$$

Beräkning av hastighetsvektor för roboten

$$\hat{v}_{rb} = \begin{cases} v_x = (x_0 + v_{fpl} t_{träff}) / t_{träff} \\ v_y = y_0 / t_{träff} \\ v_z = z_0 / t_{träff} \end{cases}$$

Beräkning av tid punkt (från t0) för varnares detektion av robot

$$\begin{aligned}
 (x_0 + v_{fpl} t_d - v_x t_d)^2 + (y_0 - v_y t_d)^2 + (z_0 - v_z t_d)^2 &= d_d^2 \\
 (v_{fpl}^2 - 2v_{fpl} v_x + v_x^2 + v_y^2 + v_z^2) t_d^2 + \\
 + (2x_0 v_{fpl} - 2x_0 v_x - 2y_0 v_y - 2z_0 v_z) t_d + x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 - d_d^2 &= 0 \\
 t_d &= \frac{x_0 v_x + y_0 v_y + z_0 v_z + x_0 v_{fpl}}{v_{fpl}^2 - 2v_{fpl} v_x + v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \pm \sqrt{\left( \frac{x_0 v_x + y_0 v_y + z_0 v_z + x_0 v_{fpl}}{v_{fpl}^2 - 2v_{fpl} v_x + v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \right)^2 - \frac{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 - d_d^2}{v_{fpl}^2 - 2v_{fpl} v_x + v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}}
 \end{aligned}$$

Beräkning av positioner för robot och flygplan vid aktivering av skenmål

$$\begin{aligned}
 t_a &= t_d + t_r \\
 P_{rb} &= \begin{cases} x_{rb} = v_x t_a \\ y_{rb} = v_y t_a \\ z_{rb} = v_z t_a \end{cases} & P_{fpl} &= \begin{cases} x_{fpl} = x_0 + v_{fpl} t_a \\ y_{fpl} = y_0 \\ z_{fpl} = z_0 \end{cases}
 \end{aligned}$$



Beräkning av tid från ta (aktivering) till träff i skenmål

$$(d_2 + d_3)^2 + h_2^2 = R_3^2$$

$$(x_{fpl} + v_{fpl} t_i - v_{vinsch} t_a - x_{rb})^2 + \sqrt{(y_{fpl} - y_{rb})^2 + (z_{fpl} - z_{rb})^2}^2 = t_i^2 v_{rb}^2$$

$$(x_{fpl} - x_{rb} + v_{fpl} t_i - v_{vinsch} t_i)^2 + (y_{fpl} - y_{rb})^2 + (z_{fpl} - z_{rb})^2 = t_i^2 v_{rb}^2$$

$$((x_{fpl} - x_{rb}) + (v_{fpl} - v_{vinsch}) t_i)^2 + (y_{fpl} - y_{rb})^2 + (z_{fpl} - z_{rb})^2 = t_i^2 v_{rb}^2$$

$$(x_{fpl} - x_{rb})^2 + 2(x_{fpl} - x_{rb})(v_{fpl} - v_{vinsch}) t_i + (v_{fpl} - v_{vinsch})^2 t_i^2 + (y_{fpl} - y_{rb})^2 + (z_{fpl} - z_{rb})^2 - t_i^2 v_{rb}^2 = 0$$

$$((v_{fpl} - v_{vinsch})^2 - v_{rb}^2) t_i^2 + 2(x_{fpl} - x_{rb})(v_{fpl} - v_{vinsch}) t_i + (x_{fpl} - x_{rb})^2 + (y_{fpl} - y_{rb})^2 + (z_{fpl} - z_{rb})^2 = 0$$

$$k_1 = (v_{fpl} - v_{vinsch})^2 - v_{rb}^2$$

$$k_2 = 2(x_{fpl} - x_{rb})(v_{fpl} - v_{vinsch})$$

$$k_3 = (x_{fpl} - x_{rb})^2 + (y_{fpl} - y_{rb})^2 + (z_{fpl} - z_{rb})^2$$

$$t_i = -\frac{k_2}{2k_1} \pm \sqrt{\left(\frac{k_2}{2k_1}\right)^2 - \frac{k_3}{k_1}}$$

Beräkning av vinkeln alfa

$$\sin(\alpha) = \frac{h_2}{R_3} = \frac{\sqrt{(y_0 - y_{rb})^2 + (z_0 - z_{rb})^2}}{v_{rb} t_i}$$

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{\sqrt{(y_0 - y_{rb})^2 + (z_0 - z_{rb})^2}}{v_{rb} t_i}\right)$$

Beräkning av tiden för passage

Gående

$$\cos(\alpha) = \frac{R_6}{d_4 + d_5} = \frac{t_p v_{rb}}{t_i v_{vinsch} + t_p v_{fpl}}$$

$$t_p = \frac{t_i v_{vinsch} \cos(\alpha)}{v_{rb} - v_{fpl} \cos(\alpha)}$$

Kommande

$$\cos(\alpha) = \frac{R_6}{d_4 - d_5} = \frac{t_p v_{rb}}{t_i v_{vinsch} - t_p v_{fpl}}$$

$$t_p = \frac{t_i v_{vinsch} \cos(\alpha)}{v_{rb} + v_{fpl} \cos(\alpha)}$$

Beräkna bomavstånd

$$\tan(\alpha) = \frac{R_5}{R_6} = \frac{d_{miss}}{t_p v_{rb}}$$

$$d_{miss} = \tan(\alpha) t_p v_{rb}$$