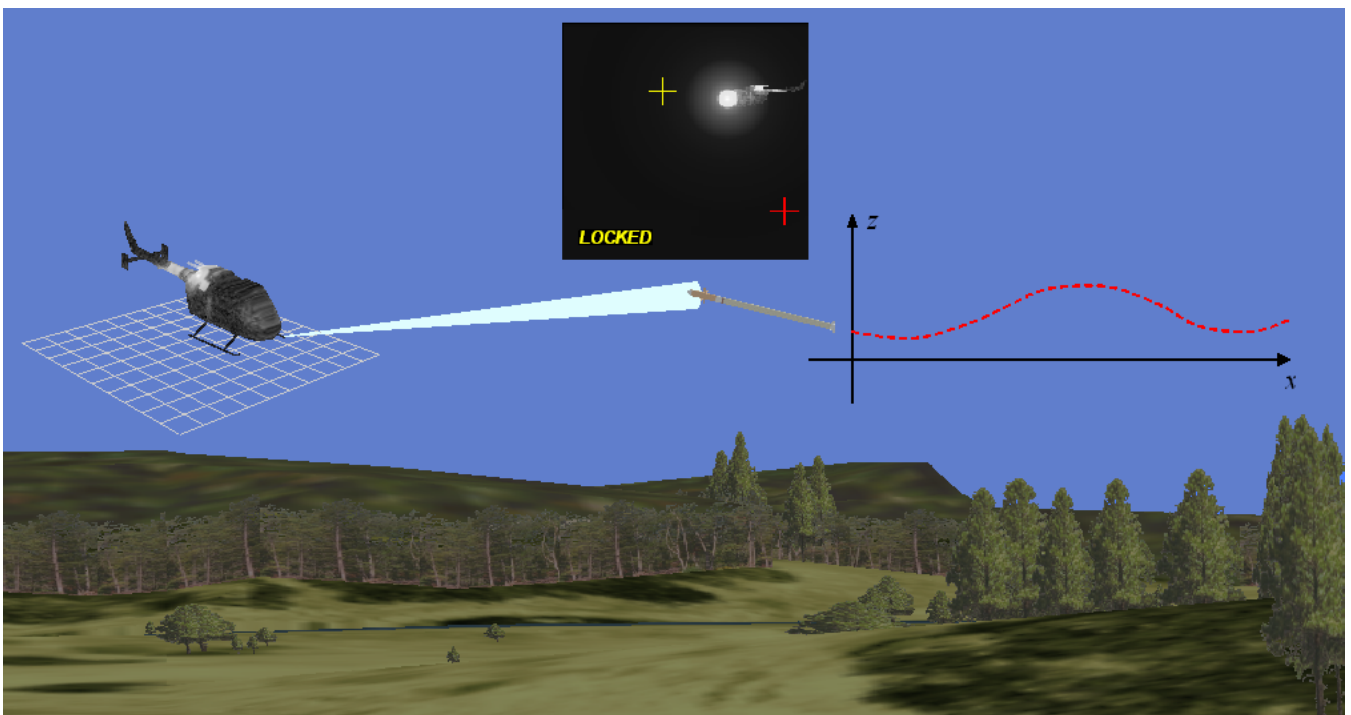


Mikael Petersson

Implementering, simulering och verifiering av en laserstörmodell (DIRCM) i ett realtidsramverk



TOTALFÖRSVARETS FORSKNINGSSINSTITUT

Ledningssystem
Box 1165
581 11 Linköping

FOI-R--1337--SE

September 2004

ISSN 1650-1942

Metodrapport

Mikael Petersson

Implementering, simulering och verifiering av en laserstörmmodell (DIRCM) i ett realtidsramverk

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Ledningssystem Box 1165 581 11 Linköping	Rapportnummer, ISRN FOI-R--1337--SE	Klassificering Metodrapport
	Forskningsområde 6. Telekrig och vilseledning	
	Månad, år September 2004	Projektnummer E7015
	Delområde 61 Telekrigföring med EM-vapen och skydd	
	Delområde 2	
Författare/redaktör Mikael Petersson	Projektledare Lars Tydén	
	Godkänd av Mikael Sjöman	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning FM	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig Lars Tydén	
Rapportens titel Implementering, simulering och verifiering av en laserstörmödel (DIRCM) i ett realtidsramverk		
Sammanfattning (högst 200 ord) Riktade lasermotmedel (Directed infrared countermeasures – DIRCM) spelar en allt viktigare roll inom telekrig för att motverka hot från målsökare inom det infraröda våglängdsbandet. Systemets prestanda och användbarhet beror t.ex. på atmosfärsförhållanden och plattformsvibrationer vilka försvårar målföljningen och begränsar den lasereffekt som överförs till målsökaren. Denna rapport beskriver en datormodell av ett DIRCM-system som har utvecklats och implementerats som en del av ett stort realtidsramverk, EWSim. Ramverket innehåller också bl.a. ett flertal målsökar- och robotdynamikmodeller. Verkan av en störlaser på ett specifikt hot kan smidigt undersökas genom simuleringar med ramverkets hjälp. Rapporten täcker hela kedjan från modellbygge till simulering och verifiering. Simuleringar av målföljning och störning presenteras, alla med rimliga och förväntade resultat. Störsimuleringarna jämfördes också med experimentella data i ett försök att verifiera modellen. För det specifika fall som testades kunde modellen anpassas (m.h.a. dess parameteruppsättning) att ge god överensstämmelse med experimenten. Således är det troligt att modellen kan producera realistiska resultat i snarlika fall.		
Nyckelord DIRCM, modell, EWSim, ramverk, realtid, simulering, verifiering, målföljning, störning		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 40 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--1337--SE	Report type Methodology report
	Programme Areas 6. Electronic Warfare and deceptive measures	
	Month year September 2004	Project no. E7015
	Subcategories 61 Electronic Warfare, EM weapons and protection	
	Subcategories 2	
Author/s (editor/s) Mikael Petersson	Project manager Lars Tydén	
	Approved by Mikael Sjöman	
	Sponsoring agency FM	
	Scientifically and technically responsible Lars Tydén	
Report title (In translation) Implementing, simulating and verifying a DIRCM model in a real-time framework		
Abstract (not more than 200 words) <p>Directed infrared countermeasures (DIRCM) play an increasingly important role in electronic warfare to counteract threats posed by infrared seekers. The usefulness and performance of such countermeasures depend for example on atmospheric conditions and platform vibrations, causing pointing and tracking errors for the laser beam and reducing the power transferred to the seeker aperture.</p> <p>This report describes a computer model of such a system that has been developed and implemented as a part of a large real-time simulation framework, EWSim. The framework also incorporates several seekers and models of robot dynamics. Effects of a jamming laser on a specific threat can be readily verified by simulations within this framework.</p> <p>The report covers the whole chain from modelling to simulation and verification. Simulations of tracking and jamming are included, all of which producing plausible results. The jamming simulations were compared to experimental data in an attempt to verify the models. For the special case that was tested, the model could be adjusted by its parameters to agree well with the experiments. Thus it is likely that the model can produce realistic results in similar cases.</p>		
Keywords DIRCM, model, EWSim, framework, real-time, simulation, verification, tracking, jamming		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 40 p.	
Price acc. to pricelist		

Innehåll

1	INLEDNING	6
2	MODELLBYGGE	8
2.1	EWSIM	8
2.2	DIRCM-MODELLEN – EN KORT ÖVERSIKT	8
2.3	VARNINGSSYSTEM OCH LOKALISERING AV HOT.....	9
2.4	MÅLFÖLJNING	10
2.4.1	<i>Effektberäkningar</i>	10
2.4.2	<i>Uppskattning av mårluktningen</i>	12
2.4.3	<i>Prediktton av mårlörelser</i>	14
2.4.4	<i>Pekdynamik</i>	15
2.4.5	<i>Källor till pekfel</i>	18
2.5	BILDGENERERING	19
2.5.1	<i>Bildgenerering i turbulens</i>	19
2.5.2	<i>Ströljus</i>	21
3	SIMULERING & VERIFIERING	23
3.1	SIMULERING – ETT EXEMPEL.....	23
3.2	MÅLFÖLJNING	26
3.2.1	<i>Lokalisering av målet aktivt</i>	26
3.2.2	<i>Plattformsvibrationer</i>	27
3.2.3	<i>Image dancing</i>	28
3.2.4	<i>Snabba mål</i>	30
3.3	BILDGENERERING – STÖRNING AV MÅLSÖKARE.....	31
3.3.1	<i>Försöksuppställning</i>	31
3.3.2	<i>Mätning av ströljuset</i>	31
3.3.3	<i>Simulering</i>	32
3.3.4	<i>Verifiering</i>	36
4	SLUTSATSER	39
5	REFERENSER	40

1 Inledning

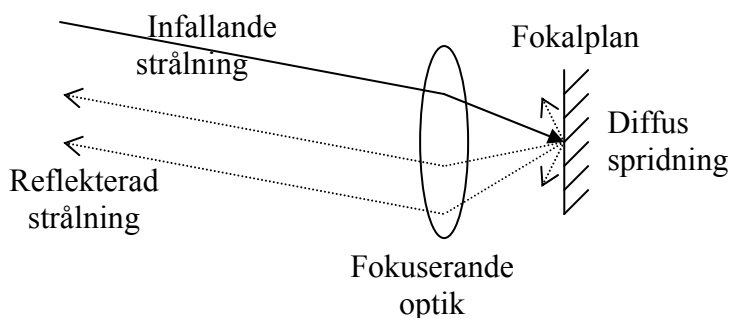
För att skydda sina plattformar mot en allt modernare flora av hot inom IR-området krävs alltmer sofistikerade motmedel. I takt med att målsökare utrustas med bildalstrande teknik och avancerad signalbehandling blir dagens traditionella motmedel i form av t.ex. facklor allt omodernare och mer verkningslösa.

DIRCM (Directed Infrared Counter Measure) tillhör denna nya klass av mer sofistikerade motmedel, tänkt att kunna verka mot dagens och morgondagens hot. Som namnet antyder är det ett riktat motmedel. Grundtanken är att störa ut ett angripande hot genom att rikta en laser mot det. Verkan man vill åstadkomma kan vara att blända, vilseleda eller förstöra hotsensorn.

Det finns många fördelar med det riktade motmedel som lasern erbjuder jämfört med exempelvis facklor. Jämför man strålningsintensitet är lasern överlägsen facklan som strålar i alla riktningar. Det är därmed lättare att erhålla störande eller förstörande verkan i hotsensorn. Andra fördelar är att lasern är direktriktande och direktverkande, det finns ingen ballistik att ta hänsyn till. Dessutom förbrukas inte motmedlet vid användning och det är relativt billigt att använda. En annan klar fördel är systemets flexibilitet, inte bara genom att kunna verka som motmedel mot många typer av hot, utan exempelvis även för kommunikation där laserstrålens modulation kan användas för att bära informationen.

För att uppnå önskad verkan med ett motmedel av denna typ måste laserstrålen noggrant följa målet. Med tanke på att laserstrålen är väldigt smal är detta ingen enkel uppgift. Problemet förvärras av att laserstrålen måste propagera genom atmosfärens turbulens, vilket medför bl.a. strålbreddning, intensitetsvariationer och strålvandring. Denna atmosfärspåverkan beskrivs mer utförligt i en tidigare rapport vid FOI [1]. Användbarheten av en laserstörare av denna typ är således i allra högsta grad beroende av rådande väderförhållanden. Vibrationer från plattformen som lasern sitter på introducerar ytterligare problem i form av pekfel för laserstrålen.

Det finns två i grunden olika metoder att få lasern att följa ett givet mål: öppen och sluten styrning (eng: open resp. closed loop). Öppen styrning är en passiv metod som vanligtvis utnyttjar en passiv bildgenererande sensor i IR-området för att centrera laserstrålen på målet. Sluten styrning å andra sidan är en aktiv metod, där lasern används för att förstärka målets signatur. Det bygger på en inneboende egenskap hos de allra flesta optiska målsökarsensorer. En optisk sensor är oftast uppbyggd av en fokuserande optik med en detektor i fokalplanet. En sådan sensor kommer att reflektera det infallande ljuset tillbaka i samma riktning som ljuset kom från, se figur 1. Det infallande ljuset reflekteras av detektorn och den fokuserande optiken ser till att det reflekterade ljuset sänds tillbaka i infallsriktningen. Detta fenomen går under namnet retroreflexion och ger en väldigt kraftig reflex tillbaka i belysningsriktningen. Man kan se detta fenomen i t.ex. kattögon. Genom att på detta sätt belysa hotsensorn med lasern och registrera retroreflexen kan hotets signatur förstärkas väsentligt.



Figur 1: En retroreflex uppstår när infallande strålning sprids i ett fokalplan.

Det stora intresset för DIRCM-system som blommat upp på senare tid gör det viktigt att samla kunskap om dess användningsområden och begränsningar. Ett naturligt steg i denna process är att skapa en DIRCM-modell som kan användas för datorsimuleringar. Denna rapport beskriver den DIRCM-modell som är under utveckling vid FOI, i syfte att simuleras i ett telekrigsperspektiv. Modellen implementeras som en del i ett realtidsramverk, EWSim [2], tillsammans med olika typer av målsökare, robotmodeller, motmedel osv. Med hjälp av ramverket kan telekrigsdueller mellan medel och motmedel simuleras och värderas.

Rapporten kommer främst behandla de delar som är viktigast för en realistisk beskrivning av ett DIRCM-system och telekrigsduellen mot en målsökande robot. Fokus ligger på målföljningen med lasern och störeffekter i målsökaren. Den första delen av rapporten beskriver modellbygget. Till viss del återkommer samma material som i ett tidigare utgivet FOI-memo [3], men i mer kortfattad form. Några delar är förändrade medan andra är helt nya. Blicka gärna tillbaka på nämnda memo för en något fullständigare beskrivning. Dock borde presentationen i denna rapport vara fullt tillräcklig i de flesta fall.

Efter modellbeskrivningen följer ett kapitel om simulering och verifiering. Där kommer modellens prestanda att undersökas i en mängd avseenden, med fortsatt tonvikt på målföljning och störning. Åtskilliga simuleringsresultat presenteras och granskas kritiskt. Avslutningsvis jämförs simuleringsresultaten med verkliga experiment där en retikelmålsökare störs av en laser, i syfte att få en bättre verklighetsförankring av modellen.

2 Modellbygge

2.1 EWSim

DIRCM-modellen som beskrivs i denna rapport är en datormodell som ingår i ett omfattande ramverk kallat EWSim (Electronic Warfare Simulation Interface Model) [2]. Syftet med ramverket är att värdera motmedel och deras användning genom datorsimuleringar. När ett scenario ska simuleras i en miljö med klotter är det viktigt att beskrivningen av mål, bakgrund och motmedel ges i tre dimensioner. Detta är en av styrkorna med EWSim – scenarierna simuleras i en tredimensionell värld och visualiseras snyggt. Ramverket är konstruerat med många olika plattformar och scenarier i åtanke; i luften, på land eller till sjöss.

EWSim byggde från början på en kommersiell produkt Vega, utvecklat av Multigen/Paradigm. På senare tid har en övergång skett till ett paket med öppen källkod, men i skrivande stund används fortfarande Vega vid simulering av DIRCM. Vega är en mjukvara för realtidssimuleringar i en virtuell tredimensionell miljö. Tredimensionella scenarier kan konfigureras, simuleras och visualiseras relativt smidigt.

Funktionaliteten tillgänglig genom Vega har utökats genom egenutvecklade moduler som beskriver målsökare (t.ex. retikel, centroid och korrelation), missiler, motmedel (t.ex. rök och facklor) och andra vitala funktioner för telekrig. Dessa moduler tillsammans med Vega utgör ramverket EWSim. EWSim är inte en applikation i sig självt utan mer precis en samling moduler som kan skraddarsys för användning i olika applikationer. En sådan befintlig applikation använder exempelvis EWSim för fackeltaktik på helikoptrar [4].

När en datormodell utvecklas måste modellens noggrannhet vägas mot den tid det tar att utföra en simulering. Modeller som körs i realtid är oftast förenklade, medan modeller som är mycket detaljerade kräver långa simuleringstider. Realtidssimuleringar är att föredra om det finns ett behov av att köra många simuleringar, exempelvis då simuleringens resultat är tänkta att användas som grund för taktiska beslut. Vidare kan realtidsmodeller användas i realistiska träningssimulatorer för utbildning av personal (human in the loop). Ett mål som är uppsatt för EWSim är att alla simuleringar ska gå i realtid, vilket förstås även gäller för DIRCM-modellen i denna rapport.

2.2 DIRCM-modellen – en kort översikt

Detta avsnitt är avsett att ge läsaren en bra bild av DIRCM-modellens byggstenar, och därmed underlätta den fortsatta läsningen.

Huvudbeståndsdelen är en laser som modelleras av ett antal parametrar, exempelvis effekt, våglängd, divergens, strålprofil och modulation. Lasern är fastmonterad på en plattform som motsvaras av ett objekt i Vega och kan vara en helikopter, ett fartyg eller något annat som ska skyddas från robotangrepp. Laserstrålen riktas m.h.a. två reglerkretsar som i denna rapport benämns grov- respektive finföljare (eng: coarse/fine tracker). Båda reglerkretsar utgörs av en detektor och ett reglerat vinkelservo som styr strålens riktning. Mer om hur detta fungerar beskrivs i avsnitt 2.4.4.

Då lasern belyser ett givet mål bestämmer laserns avbildning genom målets optik hur målet kommer att påverkas. Optiken registrerar den infallande strålningen, både från lasern och den övriga omgivningen, som funktion av infallsvinkeln (azimut och elevation relativt optikens siktlinje) och skapar på så sätt en bild av omgivningen. Bilderna som genereras spelar en

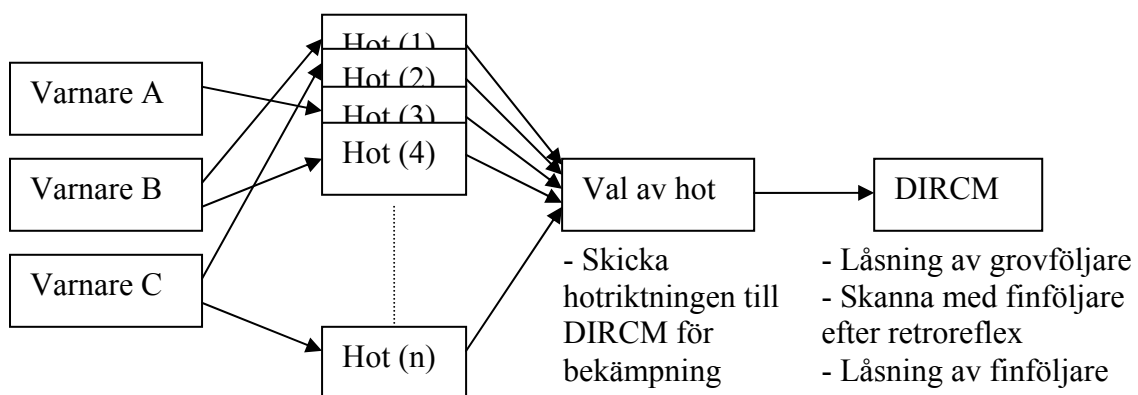
central roll för målsökarmodellerna, som använder dem för att följa ett givet mål (m.h.a. bildbehandling på olika sätt). Hur lasern avbildas är därför helt avgörande för hur en målsökare störs av ett DIRCM-system. Bildgenereringen av lasern beskrivs i detalj i avsnitt 2.5. Optiken som är knuten till målet innehåller också en mängd viktiga parametrar, såsom aperturens diameter och den effektiva lasermålarean (som behövs för att kunna beräkna målets retroreflex).

2.3 Varningssystem och lokalisering av hot

En annan viktig del av DIRCM-modellen, för att olika hot ska kunna bekämpas, är att hoten kan lokaliseras. Detta sker med stöd av en enkel modell av ett robotvarnarsystem, som har förmågan att upptäcka olika hot och deras position. Uppskattningen av hotens position, eller riktningen mot dem, är inte perfekt utan har en viss osäkerhet som sätts av varningssystemets noggrannhet (som i sin tur sätts av användaren). Varningssystemet består av ett flertal olika varnare som reagerar då vissa villkor är uppfyllda, t.ex. om ett hot befinner sig inom ett visst avstånd. Bland alla varningar som genereras väljer varningssystemet ut ett specifikt hot för bekämpning, beroende på dess hotklassificering (bl.a. avståndet), och överlämnar detta till DIRCM-systemet.

Innan aktiv finföljning av hotet kan etableras krävs ett par mellanliggande steg. Först upprättas grovföljning av hotet. Grovföljaren i modellen beskrivs för närvarande bäst som en perfekt IR-målsökare (den styrs mot målets sanna position inom ett begränsat synfält). För ett stillastående mål blir inriktningen så småningom helt perfekt, medan grovföljningens noggrannhet mot ett rörligt mål begränsas av olika rörelserestriktioner, se avsnitt 2.4.4. Då grovföljaren lyckats hålla målet centrerat med en viss liten felmarginal under en given tid anses målet vara låst och lasern slås på för att etablera aktiv finföljning på målets retroreflex. Felmarginalen sätts av användaren och benämns fortsättningsvis finföljarens låsningsområde.

Nästa steg är att söka av låsningsområdet med finföljaren. Så fort en retroreflex påträffas startar den aktiva låsningen av målet. Storleken på finföljarens låsningsområde sätts med hänsyn till laserstrålens divergens. Området får inte vara för stort, då det skulle ta alltför lång tid att söka av. Helst bör det väljas så att en retroreflex kan detekteras omedelbart då lasern slås på. Det finns också begränsningar för hur litet området kan väljas som hör ihop med att grovföljaren måste kunna låsa målet inom området. Detta undersöks i avsnitt 3.2.1. Vägen från varning till finföljning sammanfattas i figur 2.



Figur 2: Ett schema över hur hotlokaliseringen modelleras.

2.4 Målföljning

Prestandan hos ett DIRCM-system beror till stor del på dess förmåga att följa ett mål, d.v.s. om det klarar av att belysa ett hot under en tillräckligt lång tid för att neutralisera det. Hotet kommer hela tiden att röra sig och det gäller även plattformen som lasern sitter på. Dessutom utsätts DIRCM-systemet för vibrationer som kommer från plattformen och laserstrålen degraderas av atmosfärens turbulens. Målföljningen är på så vis ett komplicerat och intressant problem och en viktig del av modellen. Detta stycke beskriver följefasen, då lasern efter lokalisering av målet ska fås att följa det.

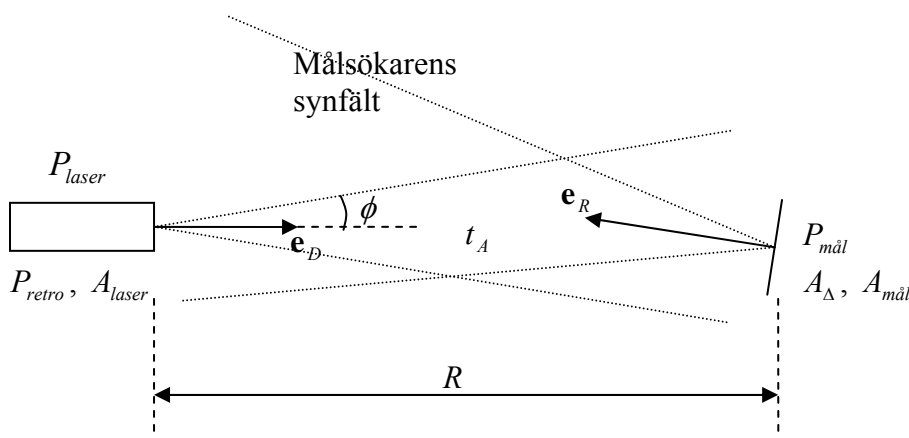
Målföljningen i modellen är som tidigare nämnts uppdelad i två reglerkretsar, grov- och finföljning. I ett verkligt system skulle var och en av dessa bestå av en länkspegel, en detektor och ett reglersystem. Reglersystemet använder information från detektorn för att vrida spegeln så att laserstrålen centreras mot målet. Finföljaren är snabbare och känsligare och kan därför följa målet mer noggrant, men är å andra sidan oftast begränsad till att arbeta över ett litet vinkelområde på ett fåtal grader. Därför behövs grovföljaren för att erhålla en god centrering av målet innan finföljaren kan börja arbeta. Grovföljaren fungerar också som extra säkerhet om finföljaren skulle tappa målet.

Dessa förutsättningar återspeglas väl i modellen. En liten skillnad är att länkspeglarna modelleras direkt av deras följeriktning. Det finns två riktningar av intresse, givna av grov- resp. finföljaren. Finföljarens riktning är också den i vilken laserstrålen är riktad och ges relativt grovföljaren med två vinklar; azimuth och elevation. Båda följeriktningar sammanfaller närhelst dessa båda vinklar är noll. Grovföljeriktningen i sin tur relateras till plattformens lokala koordinatsystem på samma sätt, med två vinklar. En mer noggrann utredning av modellens olika koordinatsystem återges i [3].

Presentationen som följer kommer främst att handla om den aktiva målföljningen. En del av det som nämns gäller även vid passiv målföljning, framför allt avsnittet om pekodynamik.

2.4.1 Effektberäkningar

Den aktiva följningen bygger på att laserstrålning retroreflekteras i hotsensorn. För att ta reda på hur mycket lasereffekt som reflekteras tillbaka till detektorn i DIRCM-systemet i modellen används laserradarekvationen. Den uppställning som används vid beräkningarna visas i figur 3.



Figur 3: Uppställningen som används vid effektberäkningar i modellen.

P_{laser} = laserns effekt [W], $P_{mål}$ = effekten från lasern som träffar målet [W], P_{retro} = den retroreflekterade effekten som når detektorn [W], ϕ = (halva) laserstrålens divergensvinkel [rad], R = avståndet mellan lasern och målet [m], A_{Δ} = målets lasermålarea [m^2/sr], $A_{mål}$ = måloptikens area [m^2], A_{laser} = mottagaroptikens area [m^2], t_A = atmosfärens transmission över sträckan R , \mathbf{e}_D = laserns riktning, \mathbf{e}_R = målsökarens observationsriktning. De flesta av dessa storheter är modellparametrar och anges av användaren. Några beräknas under simulering, t.ex. R och t_A , då laserns och målets exakta positioner är kända.

För att laserstrålning ska reflekteras tillbaka till mottagardetektorn krävs att målet befinner sig i laserstrålen och inom mottagardetektorns synfält. Dessutom måste målsökareoptiken vara riktad mot laserkällan, d.v.s. lasern måste vara inom målsökarens synfält. Ytterligare ett krav är fri sikt mellan målet och lasern, inga andra föremål får blockera strålgången.

När allt detta är kontrollerat beräknas den effekt som når målsökarsensorn. Laserns stråldiameter beräknas på avståndet R , kompenserad för strålbreddning p.g.a. turbulens och diffraktion. Hur stor del av laserljuset som samlas in av måloptiken beror på optikens aperturdiameter i förhållande till strålens bredd och dessutom optikens läge i strålen. Detta problem utreds i en tidigare rapport [1]. Laserstrålningens irradians beräknas i målets plan (vinkelrätt mot laserstrålens utbredningsriktning). Genom att integrera irradiansen över optikens aperturarea erhålls den insamlade effekten.

Som exempel blir den insamlade effekten i fallet med homogen strålprofil

$$\langle P_{mål} \rangle = P_{laser} \cdot \frac{A_{common}}{A_{beam}(L)} \cdot \underbrace{\exp \left\{ \int_L \alpha(h) dL \right\}}_{t_A}, \quad (1)$$

där A_{beam} är den effektiva strålarean i mottagarplanet (avståndet L från lasern) och A_{common} är den överlappande arean av strålen och målets apertur. Atmosfärens dämpning fås genom att integrera extinktionskoefficienten α över strålbanan.

Returvågen behandlas på liknande sätt. Den insamlade medeleffekten av en apertur nära laserkällan beräknas genom uttrycket

$$\langle P_{retro} \rangle = \frac{\langle P_{mål} \rangle}{A_{mål}} \cdot A_{\Delta} \cdot \frac{A_{laser}}{L^2} \cdot t_A. \quad (2)$$

Turbulensen i atmosfären ger upphov till scintillationer eller slumpmässiga intensitetsvariationer. Statistiskt kan den mottagna effekten beskrivas av en lognormalfördelning. Detta innebär att logaritmen av den mottagna effekten i varje tidpunkt är normalfördelad:

$$X = \ln P \in N(m, s^2) \quad (3)$$

P är den mottagna effekten och m och s^2 är normalfördelningens väntevärde resp. varians. Effekten beräknas i modellen genom att vid varje given tidpunkt slumpa fram den normalfördelade variabeln X och därur få effekten $P = e^X$. Effekten vid varje given tidpunkt antas för enkelhets skull vara oberoende av värden vid tidigare tidpunkter.

För att kunna generera värden på X måste m och s^2 vara kända. Dessa båda kan erhållas ur effektens väntevärde, $\langle P \rangle$, beräknat enligt ovan, och det s.k. scintillationsindexet, σ_I^2 , som är den normerade effektvariansen. Hur scintillationsindex beräknas i modellen beskrivs i [1].

$$\sigma_I^2 = \frac{\langle P^2 \rangle - \langle P \rangle^2}{\langle P \rangle^2} \quad (4)$$

Genom sambandet mellan X och P kan man visa att

$$m = \ln(\langle P \rangle) - s^2 / 2 \quad (5)$$

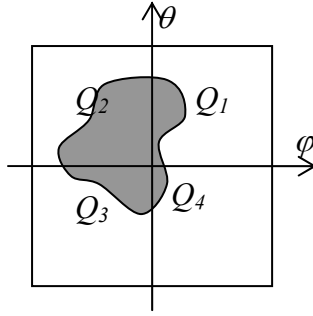
$$s^2 = \ln(\sigma_I^2 + 1) \quad (6)$$

Att beräkna den mottagna effekten i varje tidpunkt är således ganska enkelt. Att få med tidsberoendet (hur effekten vid närliggande tidpunkter är korrelerade) har dock visat sig mer komplicerat. En idé är att använda en stationär stokastisk process för detta ändamål. Variabeln X är i verkligheten påfallande lik färgat brus, så tanken är att en realistisk tidsserie därför kan genereras genom filtrering av gaussiskt vitt brus, som enkelt erhålls enligt ovan. Tidsberoendet skulle t.ex. kunna erhållas m.h.a. en ARMA-modell (Auto Regressiv Moving Average) [5]. Några inledande försök har gjorts med blandad framgång. Det största problemet är svårigheterna att koppla en sådan modell till atmosfärsbetingelserna. Fortsatt utforskning av dessa möjligheter lämnas tills vidare åt framtiden.

2.4.2 Uppskattning av målriktningen

Under den aktiva målföljningen använder DIRCM-systemet retroreflexen för att bestämma målets position. Då den mottagna lasereffekten är beräknad används atmosfärsmodellen för att räkna ut hur den fördelar sig över olika infallsvinklar mot mottagaren, vilket skapar en bild av retroreflexen på mottagarens detektorarray (mer om detta följer i avsnitt 2.5.1). Bilden av laserreflexen innehåller information om var målet befinner sig. Modellen kan använda sig av två olika metoder för att extrahera denna information.

Det som vanligast förekommer i praktiska fall är en kvadrantdetektor, där mottagaren består av fyra detektorer, en för varje kvadrant av det totala synfältet. I modellen delas detektorarrayen in i fyra delar och den insamlade effekten inom respektive kvadrant summeras och används för att uppskatta riktningen mot strålningskällan. Den insamlade effekten inom första kvadranten benämns Q_1 , den andra kvadranten Q_2 osv. (se figur 4).



Figur 4: En kvadrantdetektor väger samman den mottagna effekten från fyra kvadranter för att skatta målriktningen.

Målriktningen uppskattas av vinklarna

$$\theta_{mål} = \frac{Q_1 + Q_2 - Q_3 - Q_4}{Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4} \phi_\theta \quad (\text{elevation}) \quad (7)$$

$$\varphi_{mål} = \frac{Q_1 + Q_4 - Q_2 - Q_3}{Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4} \phi_\varphi \quad (\text{azimut}) \quad (8)$$

relativt finföljarens koordinatsystem och ϕ_θ och ϕ_φ anger synfältets storlek. För att få en mer exakt riktningssangivelse mot målet och därmed en jämnare styrning breddas laserfläcken. En smal laserfläck, kanske rent av punktformig, hamnar med stor sannolikhet helt inom en av kvadranterna, vilket resulterar i ett maximalt riktningsslag enligt formlerna ovan. Beräkningen av målriktningen fungerar bäst då alla kvadranter är upplysta. I verkligheten löses detta genom att flytta detektorn från optikens fokus, så att laserfläcken defokuseras och därmed breddas. Modellen löser breddningen av laserfläcken genom att lågpasfiltrera den infallande effektfördelningen.

I stället för att dela in detektorn i fyra kvadranter kan modellen utnyttja hela detektorns upplösning och på så vis få en noggrannare invisning mot målet. Då används en metod som beräknar tyngdpunkten av den mottagna effekten:

$$\theta_{mål} = \frac{\sum_{i,j} \theta_{ij} \cdot Q_{ij}}{\sum_{i,j} Q_{ij}} \quad \varphi_{mål} = \frac{\sum_{i,j} \varphi_{ij} \cdot Q_{ij}}{\sum_{i,j} Q_{ij}} \quad (9)$$

Q_{ij} anger den mottagna effekten för detektorelement (i, j) och θ_{ij} och φ_{ij} anger elevation och azimut för infallsriktningen. Summorna löper över alla detektorelement.

2.4.3 Prediktion av mål rörelser

Om ingen retroreflex detekteras kan inte den aktiva följningen av målet fortsätta. Det finns många tänkbara anledningar till att retroreflexen uteblir; målet kan vara utstört, lasern kan ha styrts fel så att målet har hamnat utanför strålen eller så kan den mottagna effekten genom fädning i atmosfären underskrida mottagardetektorns tröskelnivå (följer av scintillationerna p.g.a. turbulensen). Risken att tappa ett rörligt mål p.g.a. att det hamnar utanför strålen kan minskas genom att målets rörelser uppskattas i förväg, så att lasern hinner riktas i tid.

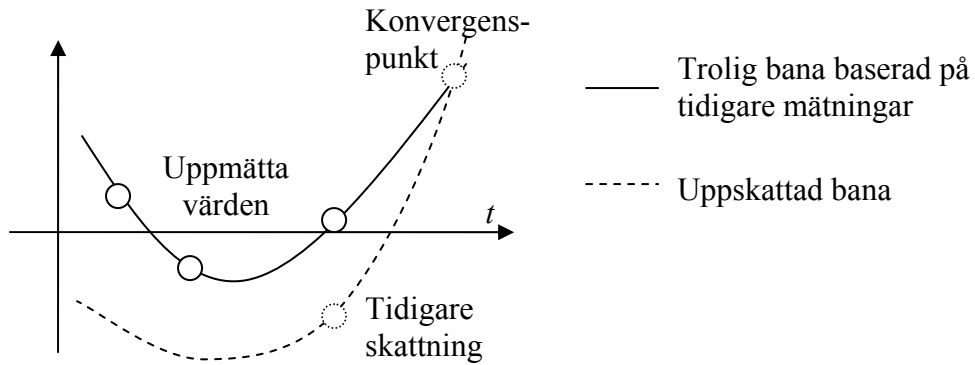
Regleringen av laserns riktning sker i modellen stegvis med en viss tidsperiod. I varje diskret tidpunkt fås en målinvisning från detektorn efter registrering av målets retroreflex. Målinvisningen jämförs med laserns aktuella pekriktning och med hjälp av detta kan lasern styras så att målet ligger mer centrerat i strålen till nästa tidpunkt. Samplingsintervallet för registreringen av retroreflexen bestämmer tidsstegets längd i regleringen.

Detta fungerar bra så länge riktningen mot målet är mer eller mindre konstant, men så fort målet börjar röra på sig kan det bli problem. Det första som händer i varje tidssteg i simuleringen är att alla objekt (plattform, mål osv.) uppdateras. Därefter ska lasern styras under hela det aktuella tidssteget. Styrningen sker mot den senaste målinvisningen, som kommer från det föregående tidssteget. Under tiden lasern styrs, fram till tidsstegets slut då målets position på nytt ska mätas med retroreflexen, hinner målet röra sig. Det är då inte längre troligt att målet är centrerat i strålen. Styrningen ligger hela tiden ett tidssteg efter och har man otur hinner målet på ett tidssteg röra sig ur laserstrålen, vilket resulterar i utebliven retroreflex, ingen ny målinvisning och bruten följning.

Problemet kan lösas genom att minska tidssteget, men nackdelen är att en simulering då går långsammare. Den bästa lösningen är att använda historiken för målets tidigare positioner för att uppskatta (extrapolera) målets position vid en kommande tidpunkt m.h.a. en prediktor. En annan fördel med att använda en prediktor för målets position är att det bör sänka kraven för DIRCM-systemet och förbättra målföljningen.

I modellen börjar varje tidssteg med att målets position predikteras för tidsstegets slut, varpå lasern styrs mot den uppskattade positionen. När lasern styrts färdigt för det aktuella tidssteget görs en ny inmätning av målets position m.h.a. retroreflexen i enlighet med föregående avsnitt. Avslutningsvis läggs målets uppmätta position till prediktorns historik. Målets tre positionskoordinater skattas i modellen oberoende av varandra vilket betyder att delproblemen behandlas som partikelrörelser i en dimension. En kort översikt hur skattningarna går till följer här. Mer information finns i [6].

Prediktorn beräknar en trolig bana för objektets fortsatta rörelse genom att anpassa en andragsgradskurva till tre tidigare uppmätta positioner för objektet. Prediktorns skattningar av objektets position följer dock en annan bana, som konvergerar mot den troliga banan med en given tidskonstant. På detta sätt tar prediktorn hänsyn både till tidigare uppmätta positioner och till tidigare skattade positioner, se figur 5.



Figur 5: Den uppskattade målbanan konvergerar mot en extrapolerad mål bana som baseras på tidigare mätningar.

2.4.4 Pekdynamik

Med pekodynamik menas DIRCM-systemets förmåga att peka i en önskad riktning, framför allt med hänsyn till rörliga förlopp. Begreppet inkluderar systemets snabbhet och stabilitet att följa en given riktning. Vikten av denna del, tillsammans med nästa avsnitt om vad som kan ge upphov till pekfel (främst image dancing och plattformsvibrationer), får inte underskattas om modellen för målföljningen ska bli någorlunda realistisk.

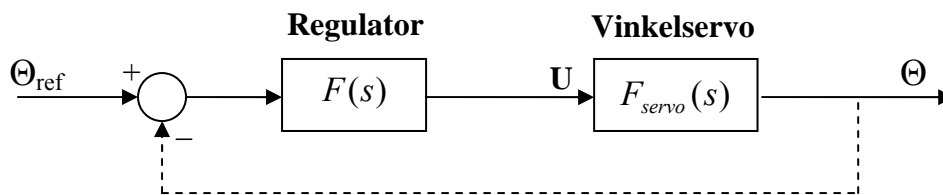
Prediktorn ger i varje tidssteg en skattning av målriktningen vid tidsstegets slut. Målriktningen transformeras till grovföljarens koordinatsystem och avvikelserna från grovföljarens riktning (i azimuth och elevation) används som referensvinklar för styrningen av finföljaren (θ_{ref} och φ_{ref}). Finföljarens riktning ges relativt grovföljaren på exakt samma sätt, med vinklarna θ_{fin} och φ_{fin} . Om dessa vinklar antar sina referensvärden pekar således finföljaren rakt emot målet. Detta är förutsättningarna för regleringen; felvinklarna $\theta_e = \theta_{ref} - \theta_{fin}$ och $\varphi_e = \varphi_{ref} - \varphi_{fin}$ ska minimeras.

Vid transformeringen av målriktningen är det önskvärt att använda den orientering av plattformen och grovföljaren som kommer att gälla vid det aktuella tidsstegets slut. Dessa kan erhållas genom att i förväg uppskatta hur de kommer att röra sig. Prediktionen kan i ett verkligt scenario exempelvis ta hänsyn till hur plattformen manövreras med styrreglagen och därur uppskatta plattformens framtida rörelse.

Var och en av vinklarna styrs av ett vinkelservo. Genom att skicka en positiv styrsignal till servot ökar vinkeln och vice versa. Servot beskrivs av överföringsfunktionen

$$F_{servo}(s) = \frac{1}{s} \cdot \frac{1}{s\tau + 1} \quad (10)$$

där τ är servots tidskonstant. Genom att återkoppla servot och använda felvinklarna som styrsignal fås vanlig P-reglering. Ett snabbare och mer stabilt system kan erhållas t.ex. genom att utgå från servots bodediagram och med stöd av detta finna en lämplig kompensationslänk [7]. Figur 6 visar ett schema hur en sådan reglering kan se ut. Notera att finföljaren har två frihetsgrader (azimut och elevation) som regleras oberoende av varandra.



Figur 6: Ett schema över en kompenserad servomotor. Det slutna systemet erhålls från det öppna genom att återkoppla utsignalen genom den streckade linjen.

Problemet är alltså att finna en lämplig kompensationslänk $F(s)$ så att det återkopplade systemet uppfyller de önskade kraven på snabbhet och stabilitet. Kraven för det återkopplade systemet kan överföras till krav på det öppna systemet som ges av $G_0(s) = F(s) \cdot F_{servo}(s)$, vilket underlättar en hel del vid syntetiseringen av regulatorn.

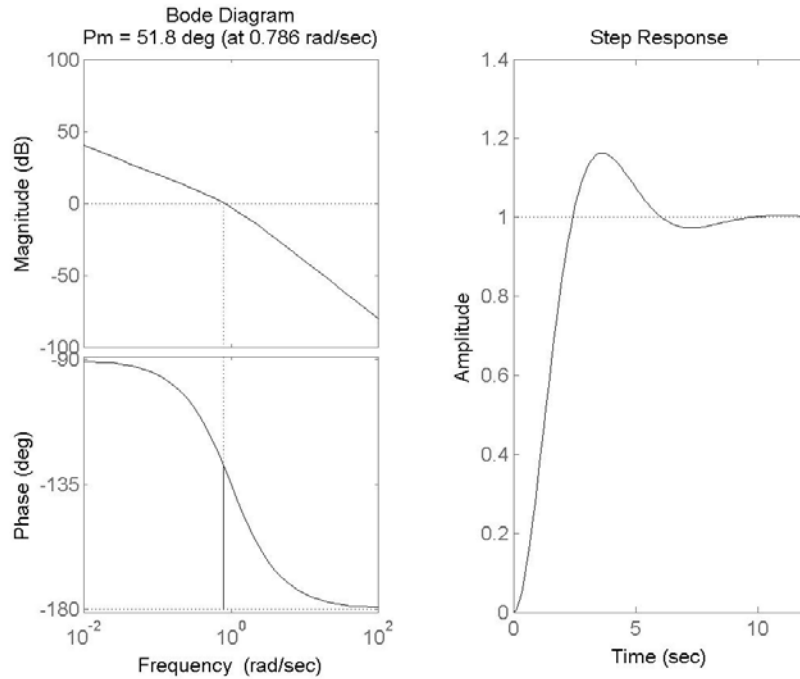
Kravet på snabbhet översätts till ett krav på en tillräckligt hög skärfrekvens, ω_c , och kravet på stabilitet översätts till krav på fasmarginalen, φ_m . Dessa båda storheter definieras i bodediagrammet för det öppna systemet. Vid en strängt avtagande amplitudkurva för G_0 definieras skärfrekvensen som den frekvens där amplitudkurvan skär 1, d.v.s. $|G_0(i\omega_c)| = 1$. Vid samma förutsättningar ges fasmarginalen som faskurvans avstånd till nivån -180° vid skärfrekvensen, d.v.s. $\varphi_m = \arg G_0(i\omega_c) + 180^\circ$.

Genom att välja regulator på ett smart sätt kan man erhålla önskad skärfrekvens och fasmarginal för det öppna systemet och därmed få det slutna systemet att uppföra sig som man vill. En begränsning är dock att servots styrsignal (betecknad u ovan) inte kan bli hur stor som helst. Denna begränsning är implementerad i DIRCM-modellen. En annan begränsning som gjorts i modellen är att regulatorn är på formen

$$F(s) = K \cdot F_{lead}(s) = K \cdot N \frac{s+b}{s+bN} \quad (11)$$

Detta är en fasavancerande länk (eng: lead compensator) som höjer faskurvan vid brytfrekvensen och alltså gör det slutna systemet stabilare. Konstanten K ökar förstärkningen hos det öppna systemet och gör systemet snabbare (ökar skärfrekvensen). Baserat på beskrivningen i [7] följer nedan ett exempel på hur konstanterna b , N och K väljs vid reglering av en servomotor för att systemet som helhet ska erhålla önskad karakteristik.

Antag att servomotorns tidskonstant ges av $\tau = 1$ s. Servots bodediagram ges av figur 7 tillsammans med det slutna systemets stegsvar (d.v.s. med $F(s) = 1$). Ur bodediagrammet kan man avläsa att brytfrekvensen ligger något under 1 rad/s och att fasmarginalen är ungefär 50° . Stegsvaret ser ut att ha en hygglig stigtid, men insvängningsförloppet är långsamt och den kraftiga överslängen tyder på att systemets stabilitet kan förbättras.



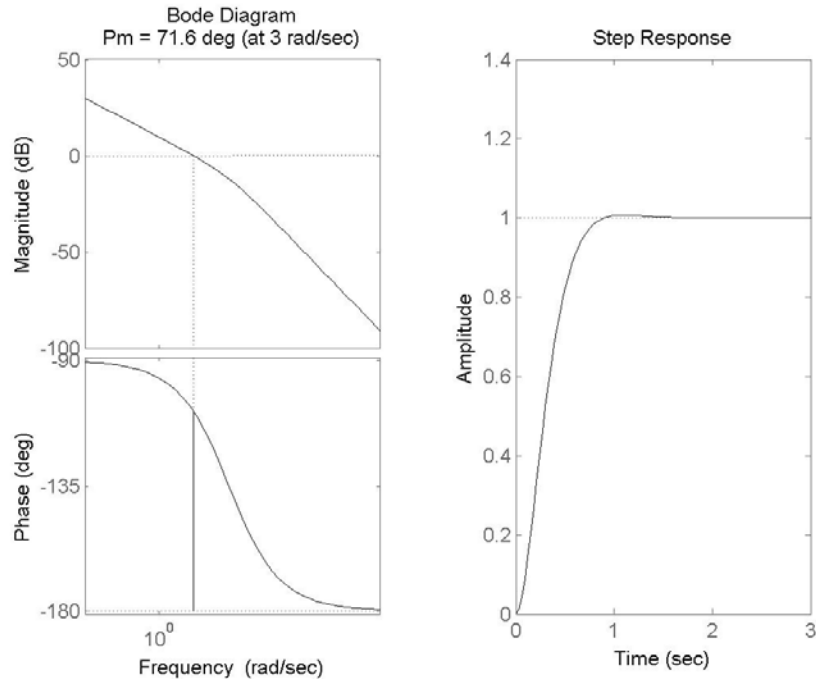
Figur 7: Till vänster ges servomotorns bodediagram och till höger plottas stegsvaret för det återkopplade systemet.

I DIRCM-modellen får användaren välja brytfrekvens och fasmarginal för det reglerade systemet. I detta fall skulle man kunna testa att öka brytfrekvensen till det dubbla för att få ett snabbare system och samtidigt öka fasmarginalen något. Kraven för det öppna systemet G_0 sätts till $\omega_c = 3$ rad/s och $\varphi_m = 70^\circ$.

Först bestäms konstanten N , som ger den maximala fasökningen för $F_{lead}(s)$, så att den räcker för att ge G_0 den önskade fasmarginalen vid frekvensen ω_c . I fallet ovan är $\arg F_{servo}(i\omega_c) = -162^\circ$. Fasökningen måste alltså vara minst 52° , vilket åstadkoms med $N = 9$. Den maximala fasökningen ges vid frekvensen $\omega = b\sqrt{N}$ vilket betyder att b måste ges värdet 1. Slutligen bestäms konstanten K så att förstärkningen vid den önskade brytfrekvensen blir 1, d.v.s. $|G_0(i\omega_c)| = 1$. Detta inträffar då $K = 3,16$. Därmed är alla konstanter beräknade och regulatorn ges av

$$F(s) = 28,44 \cdot \frac{s+1}{s+9} \quad (12)$$

Figur 8 visar bodediagrammet för det öppna systemet och stegsvaret för det återkopplade. Klart och tydligt är det reglerade systemet både snabbare och mer stabilt (minimal översläng). Beräkningsgången som presenterades i exemplet används även i DIRCM-modellen för att syntetisera regulatorn. De parametrar som användaren anger är servots tidskonstant, tillsammans med önskad skärfrekvens och fasmarginal.



Figur 8: De vänstra figurena ger bodediagrammet för det reglerade (öppna) systemet och den högra visar stegsvaret för det återkopplade. Bodediagrammet uppfyller den önskade karakteristiken och stegsvaret har blivit både snabbare och stabilare.

Det finns även något som kallas fasretarderande länk (eng: lag), som skulle kunna användas vid regleringen av vinkelservot i modellen. Denna är inte implementerad för tillfället och nämns mest som en parentes. Fördelen med en sådan länk är att den ökar förstärkningen för låga frekvenser. Därmed försnabbas vanligen insvängningsförloppet och dessutom kan eftersläpningen mot rörliga mål helt elimineras (genom att ytterligare en integration införs).

2.4.5 Källor till pekfel

Under ideala omständigheter skulle bara målets rörelser och laserns pekdynamik avgöra pekfelet vid målföljning. Nu är inte världen ideal utan det finns fler faktorer som påverkar, t.ex. atmosfärsturbulens i form av image dancing samt plattformsvibrationer.

Image dancing är ett fenomen som kommer att beskrivas mer utförligt i avsnitt 2.5.1 och påverkar uppskattningen av målets position. Då målets läge uppskattas felaktigt kommer lasern att styras iväg i fel riktning.

Plattformsvibrationer introduceras i modellen som slumpmässiga små rotationer av plattformen och dess koordinatsystem. Rotationsvinklarna är normalfördelade och oberoende i tiden. Detta påverkar DIRCM-systemet genom att grov- och finföljaren, positionerade relativt plattformen, roteras med plattformen och laserstrålen börjar därmed jitra.

Det visar sig viktigt att få med tidsberoendet i beskrivningen av dessa förlopp. Som exempel kan nämnas att så länge de slumpmässiga rotationerna av plattformen är oberoende i tiden spelar det ingen roll hur snabb pekdynamiken är. Följefelet kommer ändå att bestämmas helt av vibrationerna. Detta diskuteras mer i samband med simuleringarna, i avsnitt 3.2.2.

2.5 Bildgenerering

Målföljningen som beskrevs ovan spelar en avgörande roll för hur mycket laserstrålning som når aperturen hos ett närmande hot. Tillsammans med atmosfärsmodellen avgör de hur stor effekt som aperturen samlar in, men de säger inget om hur en sensor eller målsökare påverkas av detta.

Med bildgenerering menas i detta fall hur den infallande effekten från lasern avbildas i målsökaren. Målsökarmodellerna använder den bild som tillhandahålls av optiken för att följa målet. Det är endast genom påverkan av denna bild som målsökarna kan störas. Bilden skapas då strålningen från omvärlden faller in mot optiken och registreras av en detektorarray. Den anger hur stor den infallande effekten är som funktion av infallsvinkeln.

I ett idealt fall skulle lasern avtecknas i bilden som en enda pixel, eftersom all strålning normalt sätt faller in från en välbestämd riktning. En rad effekter påverkar dock strålningen innan den når detektorn. Först genom turbulensen i atmosfären, sedan genom bl.a. spridning i mottagaroptiken som genererar ströljus. Resultatet blir en mer eller mindre utsmetad fläck i bilden som beskriver laserns påverkan.

2.5.1 Bildgenerering i turbulens

Turbulensen i atmosfären påverkar elektromagnetisk strålning bl.a. genom att deformera vågfronten. Laserstrålens infallsvinkel mot mottagarens optik kommer därför variera slumpmässigt över strålens tvärsnitt. Fenomenet begränsar allmänt bildens upplösning och får objekt i bilden att defokuseras och bli suddiga.

Bilddegenereringen kan modelleras av en MTF (modulation transfer function), som beskriver hur den rumsliga upplösningen av ett system begränsas, i detta fall av atmosfärsturbulensen [8]. Beskrivningen ges i frekvensplanet och liknar matematiskt en överföringsfunktion (vanligt förekommande i t.ex. signalbehandling). MTF:er kan också användas för att beskriva andra delar av sensorsystemet, exempelvis diffraktion och abberationer i optiken. För att få en beskrivning av hela sensorsystemets prestanda kan MTF:erna från de olika delarna slutligen multipliceras samman [9]. I detta avsnitt ingår endast beskrivningen av atmosfärsturbulensen. Då integrationstiden i sensorn är lång i förhållande till turbulensens tidskonstant ges turbulensens MTF av

$$MTF(f) = \exp\left(-3.44(\lambda f / r_0)^{5/3}\right) \quad (13)$$

där f är den rumsliga frekvensen (rad^{-1}), λ är laserns våglängd och r_0 är Frieds koherensdiameter. Mer information finns i [1]. Ur uttryck (13) ser man att höga frekvenser blockeras, medan låga transmitteras. Atmosfären fungerar effektivt som ett lågpasfilter och suddar ut fina detaljer hos objekt. Bilden av laserkällan kommer på samma sätt att smetas ut då den betraktas av en bildgenererande sensor. Uttrycket gäller för en kontinuerlig rumsbeskrivning då variabeln f är kontinuerlig. I datormodellen genereras dock en bild där rumsbeskrivningen är diskret (uppdelad i ett antal bildelement). Nedan följer en beskrivning av modellens beräkningar.

Laserkällan ges ursprungligen som ett punktmål (en pixel) men påverkas här av atmosfären innan den avbildas på detektorarrayen (en diskret tvådimensionell array). Påverkan från atmosfären genereras i frekvensplanet genom att transformera laserkällan, multiplicera med MTF:en för att slutligen transformera tillbaka till bildplanet och erhålla resultatet. Eftersom

punktmålet innehåller lika mycket av alla frekvenser ges den slutliga avbildningen direkt genom invers diskret fouriertransform av MTF:en.

Om den cirkulära symmetrin för laserfläcken ska bevaras är en tvådimensionell diskret fouriertransform inget bra alternativ (valet av koordinataxlar för bilden bryter symmetrin vid transformeringen). I stället används i modellen en endimensionell transform där resultatet cirkelsymmetriskt utvidgas till två dimensioner. En annan fördel är att detta går mycket snabbare.

Då frekvensbeskrivningen är diskret får MTF:en ett något annorlunda utseende jämfört med det kontinuerliga fallet, p.g.a. vinkning av frekvenser. Då man väl bestämt sig för samplingsfrekvens f_s och frekvensupplösning f_{res} ges de diskreta frekvenserna av

$$f = 0, f_{res}, 2 \cdot f_{res}, \dots, f_s - f_{res} \quad (14)$$

Den diskreta MTF:en fås ur den kontinuerliga genom Poissons summationsformel [10]:

$$MTF[f] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} MTF(f + n \cdot f_s) \quad (15)$$

I modellen väljs f_s så pass stor ($f_s = 4 f_{BW}$, $MTF(f_{BW}) = e^{-1}$) att serien kan approximeras med bara två av termerna ($n = -1, 0$). Skulle bildens sampelfrekvens vara högre, så väljs denna i stället. Frekvensupplösningen avgörs av laserfläckens förväntade radie, r_{spot} . En nedre gräns för radien ges av (den kontinuerliga) MTF:ens bandbredd, $r_{spot} \cdot f_{BW} \leq 1$. En annan nedre begränsning för radien sätts i modellen till det dubbla avståndet mellan två pixlar i bilden. Frekvensupplösningen fås sedan genom $f_{res} = 1 / r_{spot}$.

MTF:en kan nu skapas genom (15) och laserfläckens utbredning i en dimension (radiellt) fås genom invers FFT (Fast Fourier Transform). Därefter sker cirkulärsymmetrisk utvidgning till två dimensioner och normering.

En annan aspekt, om vi återvänder till huvudtemat, är vilken tidsrymd som betraktas. Det nämndes tidigare att uttryck (13) gäller då integrationstiden i den betraktande sensorn är lång i förhållande till turbulensens tidskonstant. Vid korta exponeringstider ökar den rumsliga upplösningförmågan till [1]

$$MTF(f) = \exp\left\{-3.44(\lambda f / r_0)^{5/3} \left(1 - b(\lambda f / D)^{1/3}\right)\right\} \quad (16)$$

samtidigt som de långsammare förloppen i atmosfären tiltar hela laserstrålens vågfront så att strålens infallsvinkel mot optiken slumpmässigt fluktuerar. Laserkällans registrerade position i bilden kommer därmed att variera i tiden, ett fenomen som benämns med den engelska termen image dancing. Variansen för fluktuationen i infallsvinkel ges för en sfärisk våg och Kolmogorov-spektrum av [8]

$$\sigma_\beta^2 = 1,093 \cdot C_n^2 L D^{-1/3} \left(\frac{L}{k} = \frac{L\lambda}{2\pi} \ll D \right) \quad (17)$$

I uttryck (16) och (17) är D mottagarens apertur, L är avståndet mellan lasern och målet och $b = 1$ för närfält och $b = 0,5$ för avståndsfält (se [1,11]). Vid en lång integrationstid i sensorn bidrar fluktuationerna från image dancing till en effektiv minskning av den rumsliga upplösningförmågan, vilken beskrivs av MTF:en i uttryck (13).

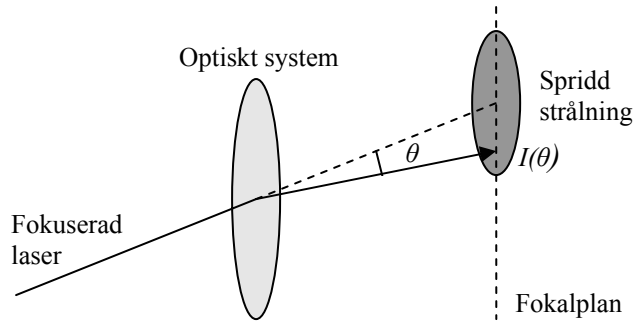
Diskussionen hittills har begränsat sig till enkelvägsfallet, då en sensor betraktar en laserälla. Bildgenerering har också stor betydelse vid målföljning, då målets position ska skattas m.h.a. retroreflexen (avsnitt 2.4.2). Infallsvinkeln för den retroreflekterade strålningen mot mottagaren kommer att fluktuera på liknande sätt som i enkelvägsfallet och ge styrsystemet en felaktig riktning information mot målet. En annan intressant detalj, som visserligen inte ingår i modellen för tillfället, men som kan vara värd att undersöka närmare i framtiden är scintillationen för de enskilda bildelementen. Ett exempel på detta är när en kvadrantdetektor används för att skatta målriktningen. Den mottagna effekten i varje kvadrant kommer då att fluktuera, till viss del oberoende av övriga kvadranter, vilket är fullt tillräckligt för att ge en felaktigt skattad målriktning (genom ekvation (7) och (8)).

2.5.2 Ströljus

När en målsökare belyses av en laser är dess funktion känslig för små defekter som kan förekomma i det optiska systemet. Defekter i linser, speglar och övriga delar kan sprida den elektromagnetiska strålningen och degradera bildkvaliteten. Den oönskade strålningen som uppstår vid spridning, reflektioner och diffraktion i ett optiskt system kallas ströljus och kan störa ut en målsökare som utsätts för kraftig belysning. Målsökaren kan störas även om lasern befinner sig utanför synfältet p.g.a. ströljuset. För att få realistiska simuleringar av hur en målsökare störs av laserstrålning måste ströljus inkluderas i modellen.

Ströljus kan uppträda på många olika sätt i ett optiskt system. Det skulle således behövas en specifik modell för varje verkligt system som ska simuleras. Ett exempel på hur ströljus kan modelleras i ett specifikt fall beskrivs i [12]. Att modellera varje tänkbart fall skulle dock vara alltför ansträngande, rentav omöjligt. En generell ströljusbeskrivning passar dessutom bättre in med övriga modeller i ramverket. Med en generell ströljusmodell måste dock ett lägre mått av realism accepteras under simulering, vid bildgenereringen i mer specifika system. Det är dock möjligt att komplettera med mer detaljerade modeller om så skulle behövas.

En vitt använd och generell beskrivning av ströljus är något som kallas PST (Point Source Transmittance), som specificerar hur stor andel av det infallande ljuset som når en given del av fokalplanet i ett optiskt system beroende på ljusets infallsvinkel mot optiken [13]. I DIRCM-modellen används en liknande beskrivning som anger hur strålningen sprids av optiken. Om man till en början försummar turbulensen kommer laserstrålens intensitet att vara koncentrerad till en enda infallsvinkel när den når sensorn. Vid passagen av det optiska systemet sprids strålningen från sin "normala" bana. Den detekterade intensiteten ges av funktionen $I(\theta)$, där θ är avvikelser från den ursprungliga infallsriktningen. Figur 9 gör ett försök att förtydliga detta ytterligare.



Figur 9: Defekter i optiken sprider den infallande strålningen. I stället för att avbildas på en punkt i fokalplanet ges bilden av laserstrålen som en utspridd fläck, vars intensitet ges av $I(\theta)$.

$I(\theta)$ normeras så att

$$2\pi \int_0^{\pi/2} I(\theta) \sin \theta d\theta = 1. \quad (18)$$

Den mottagna effekten av ett detektorelement i fokalplanet ges då av

$$P_{\text{detektor}} = P_{\text{apertur}} \cdot I(\theta) \cdot \Omega_{\text{IFOV}}, \quad (19)$$

där P_{apertur} är den effekt som samlas in av sensors apertur, Ω_{IFOV} är detektorelementets synfält och θ är vinkeln mellan detektorelementets siktlinje och strålningens infallsvinkel. Det antas att Ω_{IFOV} är litet. Ströljuset modelleras alltså helt enkelt av funktionen $I(\theta)$, d.v.s hur det optiska systemet sprider den infallande strålningen.

För det mesta inkluderas även atmosfärsturbulensen i simuleringarna, vilket degenererar bildkvaliteten ytterligare. I detta fall beräknas den diskreta fouriertransformen av funktionen $I(\theta)$ och multipliceras med MTF:en för atmosfären, för att erhålla hela systemets prestanda. Bilden av laserkällan ges sedan som tidigare genom invers diskret fouriertransform (FFT), se avsnitt 2.5.1.

3 Simulering & Verifiering

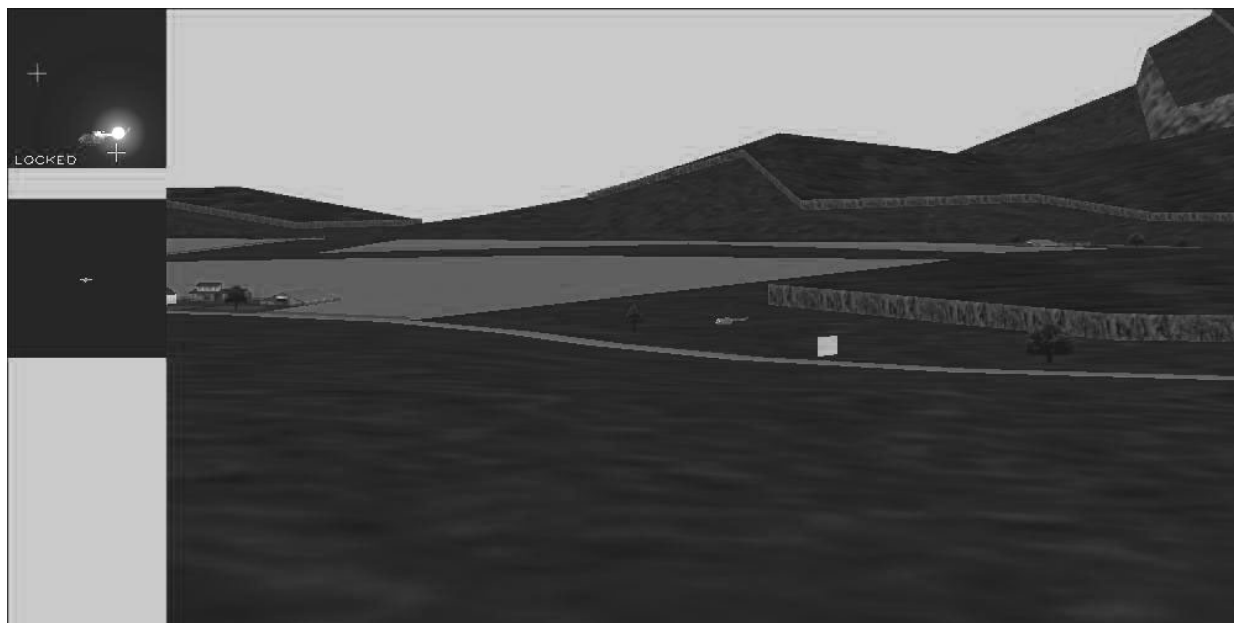
I detta kapitel flyttas fokus från modellbygget till användningen av den ”färdiga produkten” då DIRCM-modellen har blivit implementerad i ramverket EWSim. Syftet är att presentera olika resultat som kan erhållas genom datorsimuleringar, att kritiskt granska dessa och att i möjligaste mån verifiera modellen genom jämförelser av resultaten med experiment och teori. Uppmärksamheten kommer att riktas mot målföljning samt störning av målsökare, där bildgenereringen med ströljus spelar en central roll.

3.1 Simulering – ett exempel

Simuleringarna som presenteras i denna rapport utförs i en applikation som ursprungligen utvecklades för att utvärdera facklor som motmedel mot IR-robotar, men där det nu också är möjligt att simulera DIRCM. Scenariot består av en helikopter och en målsökande missil i landnära miljö. Missilen kan styras av en rad olika målsökare, t.ex. centroid, korrelation eller retikel. Generella modeller av dessa tillhandahålls av ramverket, EWSim. Ett antal motmedel kan placeras ombord på helikoptern för att skydda den mot missilangreppet. I detta exempel, precis som i resten av rapporten, utkämpas en telekrigsduell mellan en nuterande retikelmålsökare och ett DIRCM-system med pulsad laserstrålning.

Det initiala avståndet mellan missilen och helikoptern är i detta fall 2000 m. Båda objekt ligger nära marken så missilen kommer att färdas längs en horisontell bana. Målsökaren har ett totalt synfält på $3^\circ \times 3^\circ$ och en cirkulär mottagarapertur med 3 cm diameter. Retikeln är av FM-typ och nutationsfrekvensen är 100 Hz. Den infallande strålningen från helikoptern moduleras av retikeln och omvandlas till en elektrisk signal i detektorn. För att utvinna helikopterns läge ur denna signal måste signalen demoduleras. Demodulationen sker i målsökarmodellen m.h.a. ideala bandpassfilter och en likriktare. Modellen innehåller också en AGC (Automatic Gain Control) med en kort tidskonstant för att förstärka svaga målsignaler och reducera höga. Missilen är vid simuleringens start i vila. Den har en maxhastighet på 600 m/s, en maximal acceleration på 40g och styrs av en generell robotdynamikmodell ur ramverket. Målsökaren är gyrostabiliserad och en modell för gyrot [14] styr målsökarens rörelser.

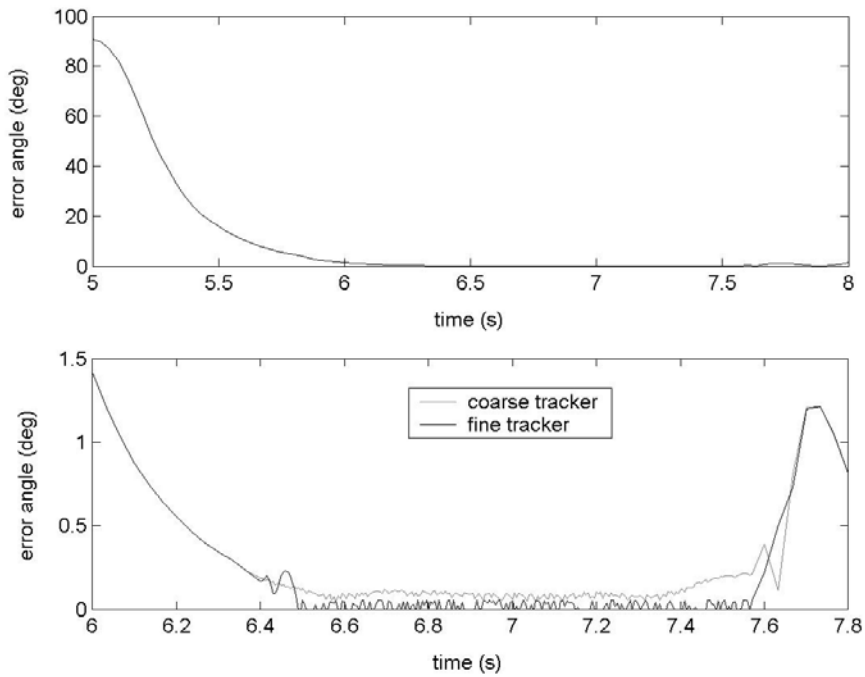
Helikoptern befinner sig i vila under hela förloppet och förlitar sig helt på DIRCM-systemet i skyddssyfte. Laserns effekt är 1 mW och divergensen är cirka 1,4 mrad (eller $0,08^\circ$). Lasern är pulsmodulerad med frekvensen 102 Hz och pulslängden 1 ms (10% duty cycle). Inställningen för robotvarningssystemet försäkrar att missilen upptäcks så snart den fyras av. Därpå följer grov- och finföljning av roboten, vilka båda styrs av det vinkelservo som beskrevs i avsnitt 2.4.4. Grovföljningen har en relativt långsam servomotor och använder en sampelfrekvens så låg som 30 Hz. En högre frekvens ger alltför långa simulationstider. Finföljaren använder retroreflexen i målsökarens optik för att följa missilen. Dess servo är mycket snabbare än grovföljarens, vilket speglar verkliga förhållanden. Sampelfrekvensen här är 200 Hz, vilket dock är lägre än i ett verkligt system. Det är viktigt att ha en hög sampelfrekvens så att missilen inte hinner färdas ut ur laserstrålen mellan två sampel med tappad låsning som följd, se avsnitt 2.4.3. Figur 10 visar en ögonblicksbild från en simulering, där missilen är låst mot helikoptern.



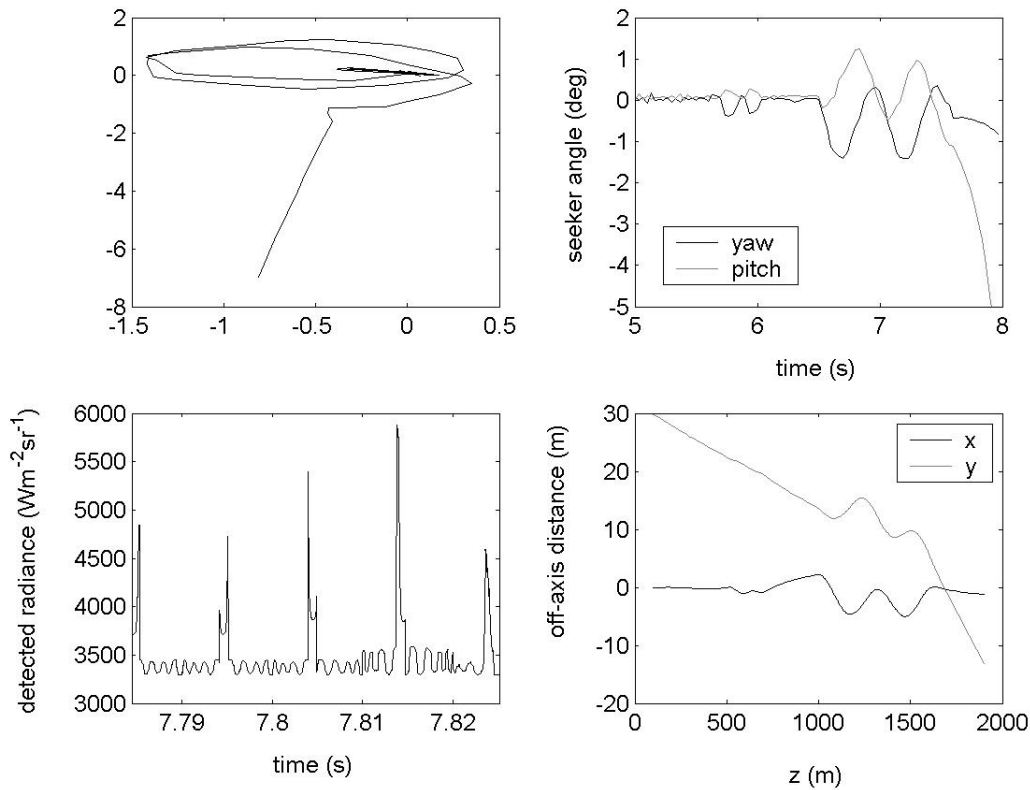
Figur 10: En ögonblicksbild från en simulering där missilen är låst på helikoptern. Den stora bilden visar scenariot sett från missilen i det visuella våglängdsbandet. Den lilla bilden längst upp till vänster visar missilens vy i det infraröda våglängdsbandet. Lasern är klart synlig och notera hur ströljuset tydligt framträder som en utsmetad laserfläck. Det är också tydligt att målsökaren är störd eftersom helikoptern inte är centrerad i synfältet och följepunkten hoppar runt kraftigt. Den undre vyn är från finföljaren och visar hur lasern är riktad. Tittar man noga ser man missilen centrerad mitt i synfältet – DIRCM-systemet följer missilen väl!

Detta var lite allmänt om scenariot och några av de övriga modeller som ligger till grund för simuleringarna. Figuren nedan summerar en simulering som genomfördes under de givna förutsättningarna. Figur 11 visar DIRCM-systemets följeloggrannhet och figur 12 presenterar rörelsen hos målsökaren och missilen. Hela förloppet kan huvudsakligen delas in i tre delar. Den första varar i en dryg sekund, från och med att missilen avfyras (vid 5 s). DIRCM-systemet varnas omedelbart för det annalkande hotet och riktar om grovföljaren mot missilen (eg. den riktning som ges av robotvarnaren). Under tiden är retikelmålsökaren låst mot helikoptern med hög noggrannhet och missilen följer en rak bana genom luften. Slutligen (vid 6,4 s) är grovföljningen av missilen så pass god att finföljaren kan aktiveras.

Finföljaren reducerar snabbt följefelet och centrerar laserstrålen på missilen. Detta påbörjar den andra delen av förloppet, då målsökaren kraftigt störs av den pulsade laserstrålningen. Följefelet för finföljaren ligger mellan 0 och $0,05^\circ$, vilket konstant håller missilen inne i laserstrålen. Grovföljaren är mindre noggrann med ett följefel upp mot $0,1^\circ$. Strålningen från lasern framträder tydligt i målsökarens detektorsignal och får målsökaren att tappa låsningen. Målsökarens siktlinje nuterar kring helikoptern i stora cirklar, där två varv fullbordas per sekund, precis som förväntat (frekvensskillnaden mellan laserns modulation och retikelns nutation är just 2 Hz). Efter 1-2 sekunders störning försvinner helikoptern helt från målsökarens synfält och missilen fortsätter därmed ut i tangentens riktning och missar helikoptern med ett hyggligt avstånd. Under denna tredje fas tappar också finföljaren låsningen i och med att ingen retroreflex kan fås från målsökarens optik.



Figur 11: DIRCM-systemets följefel som funktion av tiden. Den övre plotten visar följefelet hos grovföljaren, d.v.s. vinkeln mellan grovföljarens riktning och den sanna riktningen mot missilen. Den undre visar en förstordad bild av följefelen för både fin- och grovföljaren.



Figur 12: Missilens och målsökarens rörelser. Den övre vänstra figuren visar målsökarens avvikelse från helikoptern (vinklar i azimuth och elevation). Uppe till höger visas samma avvikelse som funktion av tiden. Notera att målsökarens siktlinje nuterar med 2 Hz som väntat. Plotten nere till vänster visar en liten del av detektornsignalen. Figuren nere till höger beskriver missilens bana. Missilen startar i punkten (0,32,0) och helikoptern befinner sig vid (0,0,2000).

De delar som har störst betydelse för utfallet av en simulering, om missilen kommer att träffa helikoptern eller inte, är klart och tydligt DIRCM-systemets målföljning och laserns påverkan på målsökaren. Dessa båda delar är därför viktigast att undersöka närmare.

3.2 Målföljning

Målföljningen, eller DIRCM-systemets förmåga att belysa ett hot med hög noggrannhet, har avgörande betydelse för om hotet kan störas ut eller ej. Är följningen inte bra nog kommer inte tillräckligt hög lasereffekt att träffa hotet under en tillräckligt lång tid för att kunna störa ut det. Det är således viktigt att målföljningen blir realistiskt modellerad och simulerad. Detta avsnitt syftar till att undersöka hur DIRCM-modellen fungerar i detta avseende genom att genomföra en rad simuleringar med olika förutsättningar. Genom att bara titta på simuleringarna kan brister i modellen upptäckas, men för att verkligen verifiera modellen måste simuleringarna jämföras göras med riktiga experiment. Detta underlag saknas tyvärr till stor del i dagens läge. Därför tvingas vi i detta fall förlita oss endast till simuleringarna och det sunda förnuftet för att bedöma deras rimlighet.

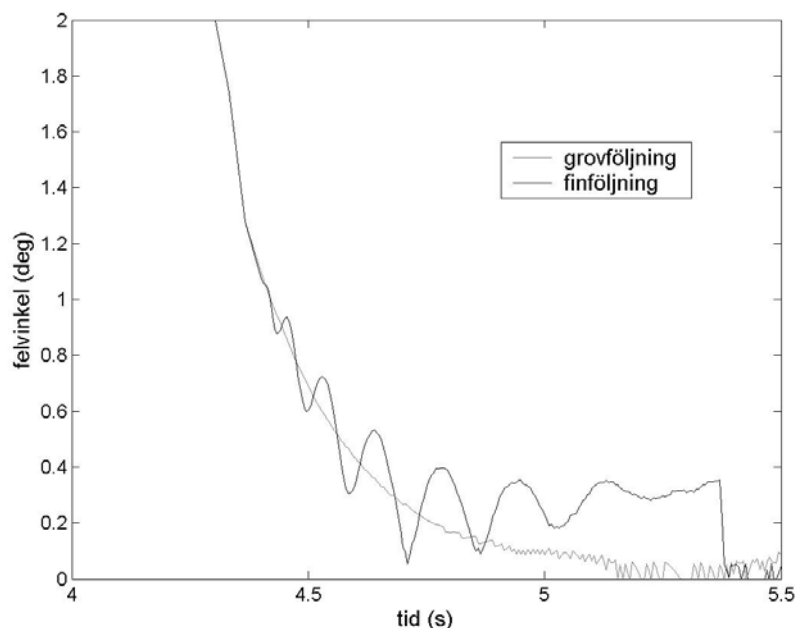
Något som bör nämnas i samband med simuleringar av denna typ, som bygger på en modell som är delvis stokastisk, är statistisk säkerhet. Vad säger att en given simulering representerar ett givet scenario på ett bra sätt? De resultat som presenteras här följer av enstaka simuleringar och att hävda att dessa representerar givna förutsättningar bra är vanligtvis ett långt steg att ta. Simuleringarna verkar dock ha utförts under en tillräckligt lång tid för att den statistiska säkerheten ska vara någorlunda god. Trots allt görs inga försök att dra alltför stora slutsatser med anledning av detta. För att verifiera målföljningen i modellen krävs större ansträngningar i form av fler strukturerade simuleringar som jämförs med experimentella data.

3.2.1 Lokalisering av målet aktivt

Ett viktigt första steg i målföljningen är hotöverlämningen då DIRCM-systemet får reda på målets position genom robotvarningssystemet. Det gäller att snabbt få en god invisning mot målet med grovföljaren för att sedan kunna aktivera finföljaren och etablera aktiv följning på målets retroreflex. Lokaliseringen av målet svarar mot första fasen i förloppet som beskrevs i avsnitt 3.1, där det tog drygt en sekund att få aktiv låsning.

Det finns ett antal parametrar som påverkar möjligheterna att få en snabb låsning. Framför allt visar sig grovföljarens följnoggrannhet vara viktig. Detta visar sig vid simulering av påhakning för ett rörligt förlopp, d.v.s. då hotet är under rörelse, vilket är den allra vanligaste situationen. Det som avgör om lokaliseringen lyckas och hur snabbt förloppet sker är storleken på finföljarens låsningsområde. I exemplet i avsnitt 3.1 var låsningsområdet 0,5°, vilket visade sig lämpligt då aktiv finföljning kunde etableras relativt snabbt.

Om låsningsområdet är för stort i förhållande till laserstrålens bredd visar det sig mest vara en slump om målet kan lokaliseras. Eftersom målet rör sig inom låsningsområdet är det inte ens säkert att det räcker med en noggrann skanning av området med lasern, och målet kan bara lokaliseras snabbt med lite tur. Som exempel visas i figur 13 resultatet av en lokalisering där finföljarens låsningsområde sattes till 3° vilket förstås är orimligt stort.



Figur 13: Låsningförfarande med 3° låsningsområde. Grafen visar felvinklarna för grov- och finföljaren. Finföljaren skannar låsningsområdet i över en sekund (kurvan svänger fram och tillbaka kraftigt) innan målet hittas.

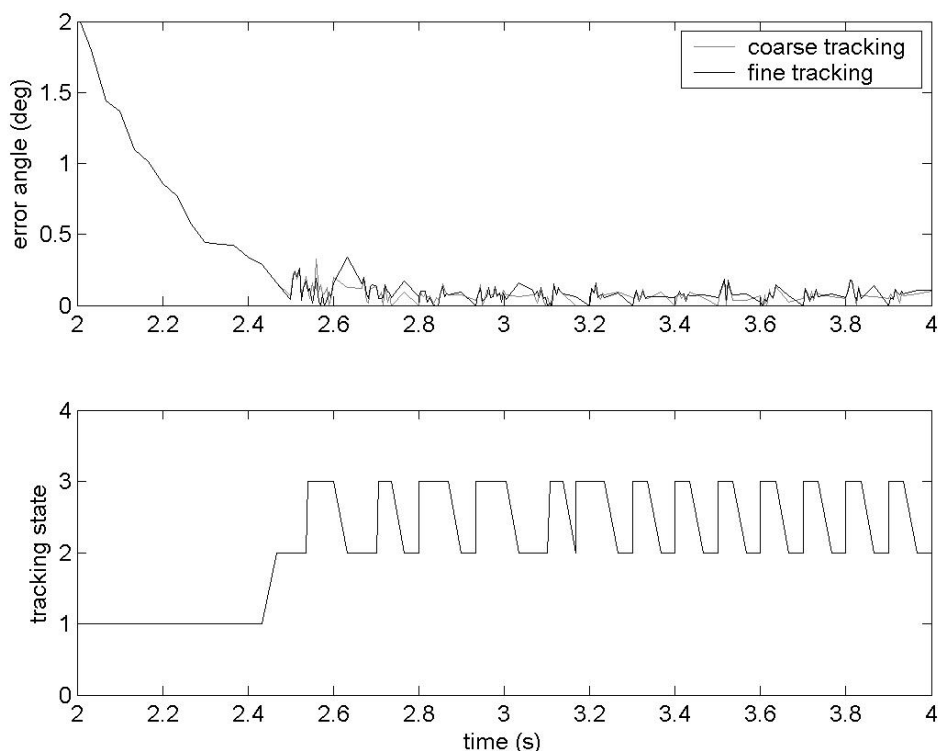
Med detta i åtanke vill man ha ett så litet låsningsområde som möjligt, men det finns också en undre gräns att beakta. Den sätts till stor del av grovföljarens följnoggrannhet, vilket visar sig vid simulering. Låsningområdet måste vara så pass stort att grovföljaren hela tiden förmår hålla målet inom det. Det är heller inte nödvändigt med ett låsningsområde som är mindre än laserns divergens. En bredare laser och ett snabbare servo för grovföljningen skulle således snabba upp lokaliseringen av målet. Exempelvis skulle införandet av ett lag-filter i regleringen av servot kunna minska följefelet mot ett rörligt mål och därmed förbättra möjligheterna till en snabb låsning.

Låsningens storlek bör i slutändan alltså väljas med hänsyn till laserns divergens och grovföljarens följnoggrannhet. Genom simuleringar kan man komma ett steg närmare den optimala storleken, som ger aktiv låsning av målet på kortast tid.

3.2.2 Plattformsvibrationer

Det finns många omständigheter som försvårar målföljningen. En försämrad följnoggrannhet kan leda till att målet hamnar utanför laserstrålen, vilket i sin tur leder till att den aktiva låsningen förloras då retroreflexen faller bort och att hotet kan arbeta mer ostört. En sådan försvårande omständighet är vibrationer från plattformen där lasern är fixerad, vilket leder till att laserstrålen börjar jättra.

Laserns pekfel kommer dock inte bara bero på vibrationernas storlek. Grov- och finföljaren kommer hela tiden arbeta för att minimera pekfelet så vad som slutligen återstår beror också på hur snabb pekodynamiken är. I figur 14 visas data från en simulering där plattformsvibrationerna var i storleksordningen 1 mrad (0,057°). Målets position var i detta fall fixerad för att endast fokusera på felet som uppstår från plattformens vibrationer.



Figur 14: Den övre grafen visar laserns pekfel som uppstår mot ett fixt mål genom att plattformen vibrerar. Pekfelet är i detta fall så stort att låsningen på målets retroreflex bryts. Detta ser man tydligt i den undre figuren som visar hur DIRCM-systemets följetillstånd ändras med tiden. 1 = grovföljning, 2 = skanning av finföljarens lokaliseringsområde, 3 = finföljning (aktiv låsning).

Just nu är modellen utformad så att vibrationerna är oberoende i tiden, d.v.s. det slumpmässiga pekfelet för lasern vid två tidpunkter blir oberoende av varandra. Detta speglar de fall där bandbredden för vibrationerna är mycket större än pekodynamikens sampelfrekvens. Styrservona för grov- och finföljaren hinner därmed inte reducera laserns pekfel, som under simuleringen låg runt $0,1^\circ$ i medel, vilket är i samma storleksordning vibrationerna. Notera att detta även är i samma storleksordning som laserns divergensvinkel vilket medför att DIRCM-systemet ideligen tappar den aktiva följningen av målet.

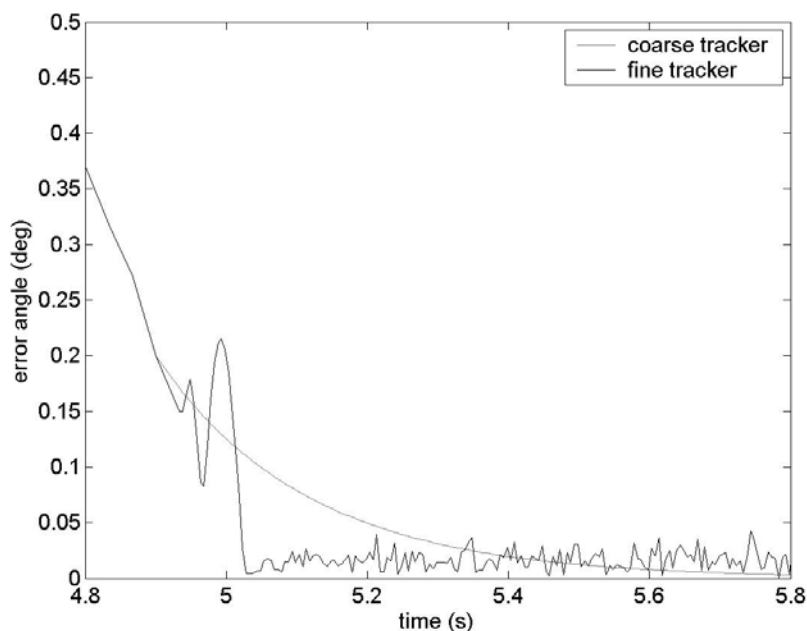
För att kunna simulera högre sampelfrekvenser hos följesystemen på ett realistiskt sätt, eller lägre bandbredd hos plattformens vibrationer, vanligen i storleksordningen 10-100 Hz [15], måste ett tidsberoende för vibrationerna introduceras i modellen, t.ex. genom en stokastisk process med korrelerat brus (liknande den som beskrevs i 2.4.1).

3.2.3 Image dancing

Ett annat fenomen som försvårar målföljningen är image dancing orsakat av turbulensen i atmosfären, se avsnitt 2.5.1. Infallsriktningen för den retroreflekterade vågen kommer att fluktuera och med de korta exponeringstider som gäller för detektorn vid målföljning kommer målriktningen att bli felaktigt registrerad. Därmed blir målföljningen lidande.

Under liknande förutsättningar som i 3.2.2 görs här en simulering för att se hur image dancing påverkar DIRCM-systemets följeförmåga. Återigen är målet fixerat, plattformsvibrationerna

nollställs och turbulensstyrkan sätts genom strukturparametern $C_n^2 = 5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^{-2/3}$ vilket får betecknas som kraftig turbulens. Resultatet visas i figur 15.



Figur 15: Följefelet för grov- och finföljaren mot stillastående mål i kraftig turbulens. För finföljaren ligger felet runt 350 μrad . Grovföljaren påverkas inte av turbulensen då den är ideal.

Pekfelet för finföljaren till följd av turbulensen är runt 350 μrad . Detta värde är intressant att jämföra med fluktuationen i laserstrålens infallsvinkel som ges teoretiskt av (17). Observera att det är fluktuationerna vid dubbelvägspassage som är av intresse här. I modellen används dock samma uttryck för dubbel- som enkelväg i brist på bättre uttryck.

Sätter man in de värden som gällde under simuleringen ($L = 2000 \text{ m}$, $D = 0,1 \text{ m}$) fås $\sigma_\beta = 153 \mu\text{rad}$. Detta är en bra bit lägre än följefelet som visade sig under simulering vilket kan verka aningen förbluffande. Analyserar man mer i detalj är σ_β standardavvikelsen för den skattade målriktningens avvikelse från den sanna och pekdynamiken för följesystemen kommer att avgöra hur stort det slutliga följefelet blir. I detta fall användes en reglering av servomotorn som prioriterar snabbhet, där stabiliteten kommer i andra hand, vilket leder till att felet förstärks. För att kontrollera detta halverades bandbredden på det reglerade servot i ytterligare en simulering. Följefelet blev då 175 μrad , d.v.s. hälften av det tidigare.

Precis som i fallet med plattformsvibrationerna är tidsberoendet försummat i modellen, vilket betyder att strålens vandring i fokalplanet till följd av image dancing slumpas oberoende i två olika tidpunkter. Tidsberoendet är dock inte lika kritiskt här som i fallet med plattformsvibrationer eftersom följefelet troligen endast påverkas marginellt. Det skulle dock inte skada att få detta bekräftat genom att implementera ett tidsberoende i modellen.

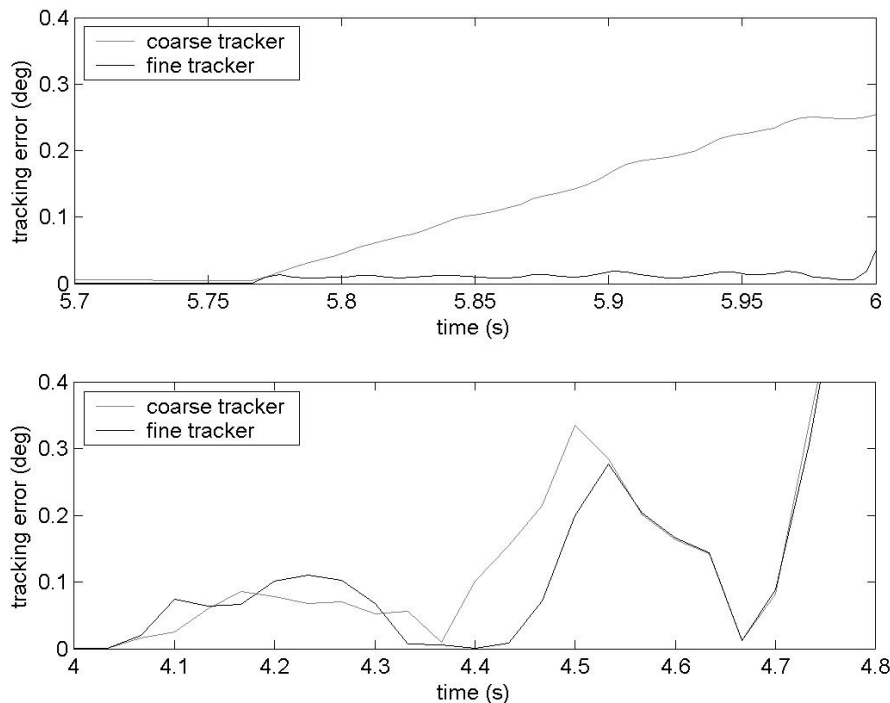
Ytterligare en anmärkning kan göras i anslutning till figur 15 gällande grovföljaren. Följefelet för denna faller exponentiellt av mot noll vilket beror på att den är ideal och känner målets sanna position. Faktum är att även om den styrs av en passiv målsökare med indata från IR-vyn så hade följefelet gått mot ett litet värde. Detta beror på att image dancing endast finns implementerat för lasern och inte för resten av miljön. Även detta kan vara något att överväga att få med i modellen.

3.2.4 Snabba mål

Vid sidan av de omnämnda följe problemen med plattformsvibrationer och image dancing är det viktigt att kunna följa ett mål som rör sig häftigt i sidled. En eventuell sidledsrörelse av hotet relativt den egna plattformen (som skyddas av DIRCM-systemet) kan uppstå vid exempelvis en undanmanöver eller då hotet störs och börjar avvika från sin ursprungliga kurs. Det är i båda dessa fall viktigt att lasern snabbt kan riktas om och följa hotet så att störningen oavbrutet kan fortlöpa.

För att testa DIRCM-modellens prestanda i detta avseende genomfördes en rad simuleringar enligt liknande förutsättningar som i exemplet i 3.1. Lasereffekten sattes ned något för att få mindre störverkan hos missilen men ändå så pass stor att missilen börjar vobbla och röra sig i sidled. Här visar det sig hur viktig följesystemens sampelfrekvens är för målföljningen, ett område som tangerats tidigare i rapporten (se 2.4.3.). En låg sampelfrekvens ger större utrymme för målet att röra sig bort från den senast skattade målriktningen, vilket leder till ett ökat följefel. Vill det sig illa hinner målet röra sig så pass mycket att låsningen av målet bryts. Simuleringsresultaten visas i figur 16.

Målet rörde sig i detta fall med en vinkelhastighet på $5^\circ/s$. Sampelfrekvensen för grovföljaren var 30 Hz i båda försök och 30 resp. 200 Hz för finföljaren. Man kan klart och tydligt utläsa att följningen är bättre med en högre sampelfrekvens. Den aktiva följningen bröts t.o.m. vid ett flertal tillfällen då finföljarens sampelfrekvens var 30 Hz. Hur hög sampelfrekvens som väljs måste också avvägas mot simuleringarnas snabbhet. Målet om realtidssimuleringar sätter en övre gräns på runt 200 Hz för finföljaren och inte mer än 50 Hz för grovföljaren räknat med dagens mjukvara och datorprestanda. Grovföljarens sampelfrekvens måste nog upp en hel del om den ideala följningen ska kunna ersättas av en passiv IR-målsökare.



Figur 16: Följenoggrannheten mot ett rörligt mål för olika sampelfrekvenser. I den övre figuren är finföljarens sampelfrekvens 200 Hz, i den undre 30 Hz. Grovföljaren hade i båda fall en sampelfrekvens på 30 Hz. Följefelet för finföljaren minskar betydligt då sampelfrekvensen ökas.

Andra faktorer som påverkar följenoggrannheten kan nämnas kortfattat. Först och främst underlättas målföljningen av en prediktor som uppskattar målets framtida position enligt vad som skrevs i avsnitt 2.4.3. För det mesta är skattningarna mycket träffsäkra vilket ökar följenoggrannheten, samtidigt som kravet på en hög sampelfrekvens reduceras något, eftersom följeriktningen kan ändras i god tid. Följningen av ett rörligt mål skulle också förbättras genom att införa ytterligare en integration i regleringen av styrservona i form av ett fasretarderande filter (se 2.4.4)

3.3 Bildgenerering – störning av målsökare

Genom realistiska modeller av atmosfären [1] samt målföljningen hos ett DIRCM-system (se 2.4 och 3.2) erhålls en bra uppskattning av den lasereffekt som når aperturen hos ett närmande hot. Minst lika viktigt är att modellerna som beskriver störverkan i en målsökare (se 2.5) speglar verkliga förhållanden. Detta avsnitt av rapporten försöker verifiera dessa bitar m.h.a. experimentella data, där framför allt ströljuset sätts i fokus.

3.3.1 Försöksuppställning

De experimentella resultat som ligger till grund för verifieringen är framtagna vid försök med en nuterande FM-målsökare. Som mål användes en svartkropp med cirkulär form och en diameter på 1 cm. Avståndet mellan svartkroppen och målsökaren var 60 m. På avståndet 120 m från målsökaren ställdes en blysaltlaser inriktad mot målsökaren för att kunna störa den. Data för uppställningen sammanfattas i tabellen nedan.

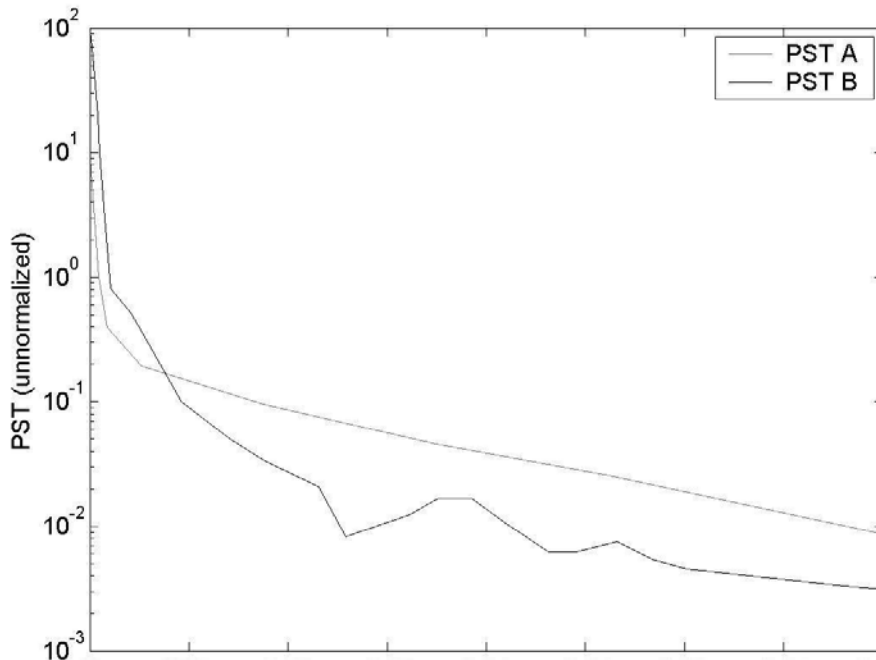
Lasereffekt	P_{laser}	
Laserdivergens (hela vinkeln)	θ_{laser}	0,8 mrad
Laservåglängd	λ_{laser}	3,39 μm
Laserns pulsrepetitionsfrekvens	f_{laser}	101 Hz
Måltemperatur (svartkropp)	T_{bb}	
Målarea (svartkropp)	A_{bb}	$7,85 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$
Avstånd till målet	R	60 m
Avstånd till lasern	$2R$	120 m
Vinkel mellan målet och lasern	θ_{offset}	1°
Aperturarea målsökare	$A_{måls}$	

Under dessa förutsättningar gjordes både riktiga experiment och simuleringar där bl.a. laserns effekt och dess infallsvinkel mot målsökaren varierades. Det huvudsakliga syftet var att jämföra resultaten och därigenom verifiera målsökarmodellen och den del av DIRCM-modellen som handlar om bildgenerering, vilken är vital för att generera störeffekter i målsökaren. Bildgenereringen påverkas både av atmosfärens turbulens (MTF) och ströljus i målsökarens optik. I detta fall är turbulensen försumbar och framför allt ströljusets funktion undersöks.

3.3.2 Mätning av ströljuset

Det är viktigt att ströljuset för målsökareoptiken (PST:n) uppskattas bra för att simuleringarna ska kunna göra sig rättvisa. Mätningen av ströljuset visade sig dock inte vara alldeles enkel. PST:n uppskattades genom att variera laserstrålens infallsvinkel mot målsökaren och notera detektorns respons. Infallsvinkeln varierades från rakt infall till vinklar som låg klart utanför målsökarens synfält. Därmed erhöles en kurva med respons som funktion av infallsvinkel som borde likna optikens PST hyggligt.

Det finns dock en hel del felkällor. Bland annat kunde inte målsökarens siktlinje (LOS) helt fixeras vilket innebar att strålningens infallsvinkel varierade något under försöken. Detta gällde framför allt vid små infallsvinklar så osäkerheten är störst där. Av denna anledning används två olika beskrivningar av ströljuset under simuleringarna, vilka visas i figur 17. Dessutom gjordes simuleringar helt utan ströljus, med endast den minimala atmosfärs-påverkan. I dessa fall koncentreras all laserstrålning till en enda infallsvinkel och lasern avbildas som en punkt på detektorn.



Figur 17: Beskrivning av ströljuset som används under simulering. Två versioner används beroende på osäkerheten för små infallsvinklar.

3.3.3 Simulering

I detta avsnitt presenteras resultatet från ett antal simuleringar, vilka sedan används vid verifieringen med experimentella data. Framför allt undersöks hur målsökaren påverkas av ströljuset. Rimligheten i resultaten kommer att bedömas och i viss mån kontrolleras genom teoretiska överläggningar. Intressanta delar att titta närmare på är detektorsignalen i målsökaren (där man kan utläsa den effekt som når målsökarens apertur från svartkroppen respektive lasern) och de målsökarrörelser som därav följer.

Förutsättningarna som gäller är de i avsnitt 3.3.1. Ett problem som måste redas ut innan scenariot kan simuleras gäller målets (svartkroppens) radians. Svartkroppen strålar som bekant ut sin energi i ett stort våglängdsband medan lasern har all energi koncentrerad vid en våglängd ($3,39 \mu\text{m}$). Problemet uppstår då målsökarsensorns responsivitet ska vägas in, eftersom den är våglängdsberoende och simuleringsmodellen inte kan hantera olika våglängder. Våglängdsberoendet måste därför inräknas i målets och laserns radiansnivåer så att kontrasten mellan dem blir rätt när de betraktas av sensorn. Detta görs genom att normera svartkroppens radians och anta att den strålar ut all energi vid samma våglängd som lasern. Den normerade radiansen, L_{bb} vid våglängden λ_{laser} , bestäms så att sensorns respons blir lika stor som den ursprungligen var för svartkroppen. Mer i detalj:

Svartkroppens totala radians ges av

$$L = \int_0^{\infty} L(\lambda) d\lambda, \quad (20)$$

där radiansens våglängdsberoende ges av

$$L(\lambda) = \frac{2c^2 h}{\lambda^5 \left(\exp\left(\frac{hc}{kT\lambda}\right) - 1 \right)}. \quad (21)$$

Sensors respons beräknas enligt

$$R = \int_0^{\infty} R(\lambda) L(\lambda) d\lambda. \quad (22)$$

Då svartkroppen antas stråla ut energin för en enda våglängd blir responsen i sensorn

$R = L_{bb} \cdot R(\lambda_L)$ och därmed blir

$$L_{bb} = \frac{1}{R(\lambda_L)} \int_0^{\infty} R(\lambda) L(\lambda) d\lambda. \quad (23)$$

Figur 18 visar resultatet från en första simulering. Ströljuset är i detta fall utelämnat för att senare kunna notera hur det påverkar målsökaren. Retikelns nutationsfrekvens är 100 Hz och skillnadsfrekvensen mot laserns prf är därmed 1 Hz. Detta visar sig tydligt i rörelserna för målsökaren, som svänger med just 1 Hz. Den exakta felvinkeln för målsökaren får man inte lägga för mycket vikt vid i detta skede, då den till stor del beror på målsökarens dynamik (den gyromodell som används för att styra siktlinjen, vilken beskrivs i [14]). Här används heller ingen AGC (som i avsnitt 3.1) för att normera detektorsignalen, utan styrsignalen som skickas till gyrot beror till stor del på detektorsignalens amplitud.

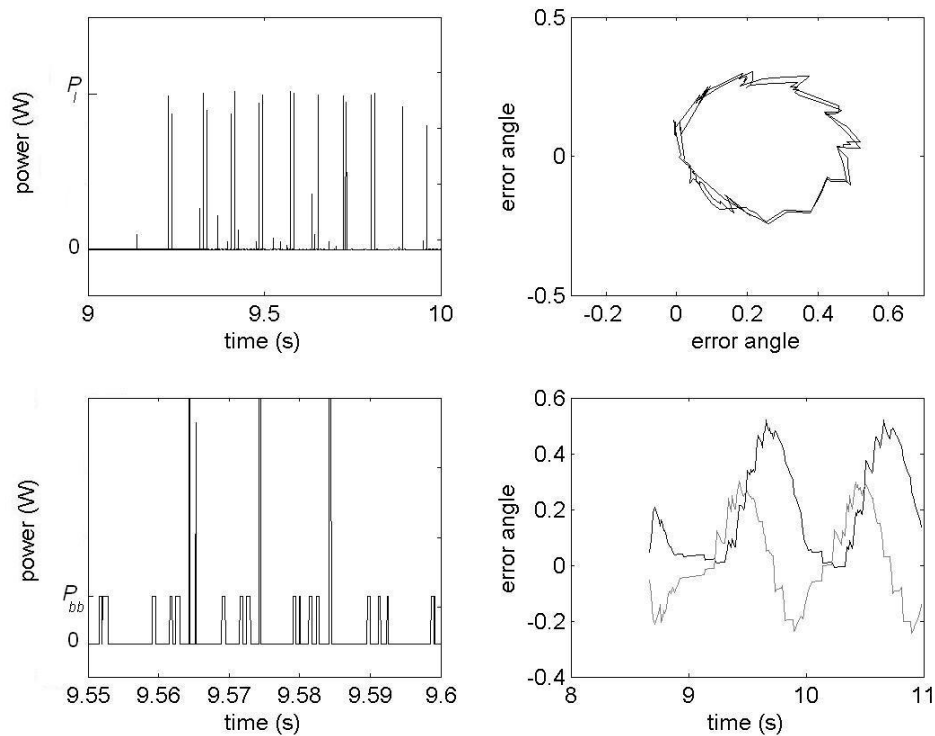
Figur 18 visar också den mottagna effektnivån i målsökaren. Med relativt enkla beräkningar kan man kontrollera att den visar rätt nivåer för svartkroppen och lasern. Svartkroppens radians normerades ovan med hänsyn till sensors våglängdskänslighet och laserns våglängd till L_{bb} . Den effekt som når målsökaren är

$$P_{bb} = \frac{L_{bb} A_{måls} A_{bb}}{R^2}. \quad (24)$$

Effekten från lasern som når målsökaren är (under antagandet av en homogen strålprofil)

$$P_l = P_{laser} \cdot \frac{A_{måls}}{A_{str}} = P_{laser} \cdot \frac{4A_{måls}}{\pi(\theta_{laser} 2R)^2} \quad (25)$$

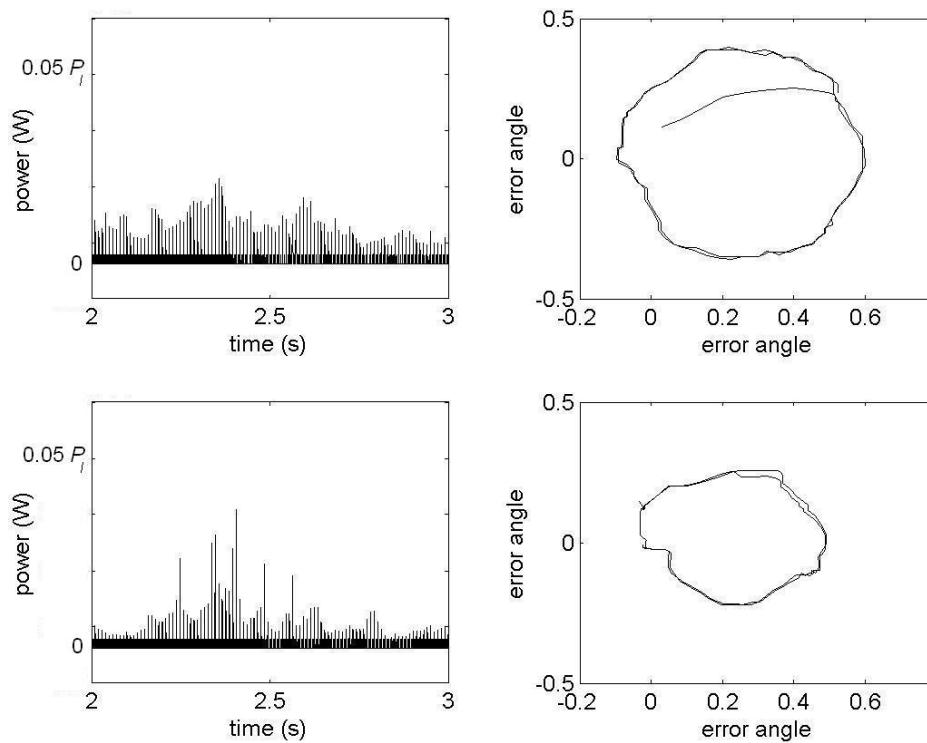
Detta visar sig stämma väl med signalen i figur 18. Störkontrasten (mellan lasern och målet) är ungefär 415 ggr eller 26 dB.



Figur 18: De två vänstra figurerna visar den effekt som målsökaren tar emot. Figureerna till höger visar målsökarens rörelse. Axlarna är graderade i enheter av målsökarens totala synfält (-1 resp. 1 markerar synfältets kant).

Lägger man till effekten av ströljus blir resultatet något annorlunda, se figur 19. Framför allt detektorsignalen påverkas kraftigt av ströljuset. Utan ströljus erhöles mycket högre toppvärden, samtidigt som lasern inte verkade träffa detektorn under varje nutationsvarv (de höga pulserna i detektorsignalen repeteras inte var 1/100 sekund utan faller bort, troligen p.g.a. att lasern hamnar utanför målsökarens momentana synfält). Tack vare ströljuset träffas detektorn av laserns strålning även om laserkällan befinner sig utanför synfältet och laserpulserna återfinns i detektorsignalen med 101 Hz. Notera att ströljuset i modellen endast påverkar laserns strålning och inte målets.

Hur ska man då förklara de åtskilligt lägre toppvärdena som är nästan 100 ggr lägre än utan ströljus? Det finns ett flertal förklaringsgrunder. Den mest uppenbara är att ljuset från lasern sprids och därmed till stor del kommer att absorberas av retikeln eller hamna utanför det momentana synfältet. Det är dock inte speciellt realistiskt att 99% av effekten skulle falla bort p.g.a. ströljuset, så troligen är den verkliga målsökarens PST smalare och sprider inte strålningen så mycket som tidigare uppskattades.



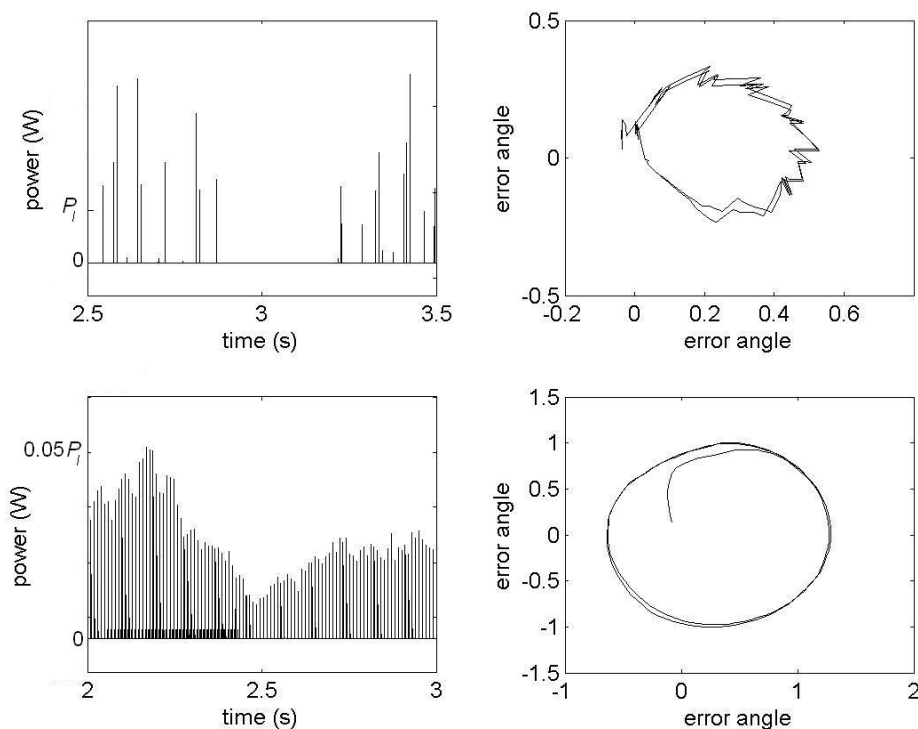
Figur 19: Simulering med ströljus. Till vänster visas detektorsignalerna (den mottagna effekten i målsökaren) och till höger målsökarens rörelser. De översta figurerna gäller för PST B och de undre för PST A (se 3.3.2).

En annan detalj som kan visa sig påverka resultatet en hel del är diskretiseringen av radiansnivåerna i målsökarens vy. Målsökaren betraktar omvärlden genom en gråskalevy, där objektens gråskalenivåer svarar mot olika radianser (sambandet ges av en styckvis linjär funktion med en brytpunkt). Det finns endast 256 olika gråskalenivåer att tillgå vilket medför att den radian som tas emot i målsökaren blir diskretiserad till 256 nivåer. Detta innebär bl.a. att det införs en övre gräns för den mottagna radianen. Oavsett laserns effekt kan inte högre radian tas emot än den som motsvaras av den högsta gråskalenivån. Dessutom blir det svårt att urskilja lasern från bakgrunden då det spridda ljuset är svagt. Framför allt det ljus som ligger nära kanten av laserfläcken i bildplanet riskerar att helt försvinna i bakgrunden (beroende på hur tätt de diskreta radiansnivåerna ligger).

Då laserns effekt ökades nästan en faktor 10 erhöles resultat enligt figur 20 (simuleringar både med och utan ströljus). I simuleringen utan ströljus har laserns effektökning ingen märkbar påverkan på målsökaren. Redan med den lägre lasereffekten var målsökaren så pass störd att lasern stundtals hamnar utanför målsökarens momentana synfält där störningen inte längre kan fortsätta. Målsökaren börjar då centrera målet igen varpå lasern återigen träder in i synfältet och stör målsökaren bort från målet. På detta sätt uppstår en typ av jämviktsläge som inte kan brytas oavsett laserns effekt. Då ströljusmodellen används blir simuleringens resultat helt annorlunda. Lasern kan nu störa målsökaren även då den befinner sig utanför det momentana synfältet. Målsökarens pekfel ökar därmed och blir t.o.m. så stort att målet bitvis lämnar synfältet helt.

Sannolikt hade pekfelet varit ännu större om det inte hade förekommit någon diskretisering av laserns radianer. En enkel uppskattning ger vid handen att ströljuset jämföras med bakgrund när det fallit av till $1/256$ av toppvärdet (om man antar att högsta gråskalenivån svarar mot

radiansen för rakt infall och sedan linjärt faller av mot noll). Detta kan mycket väl begränsa störningen utanför målsökarens synfält vilket i sin tur begränsar målsökarens felvinkel.



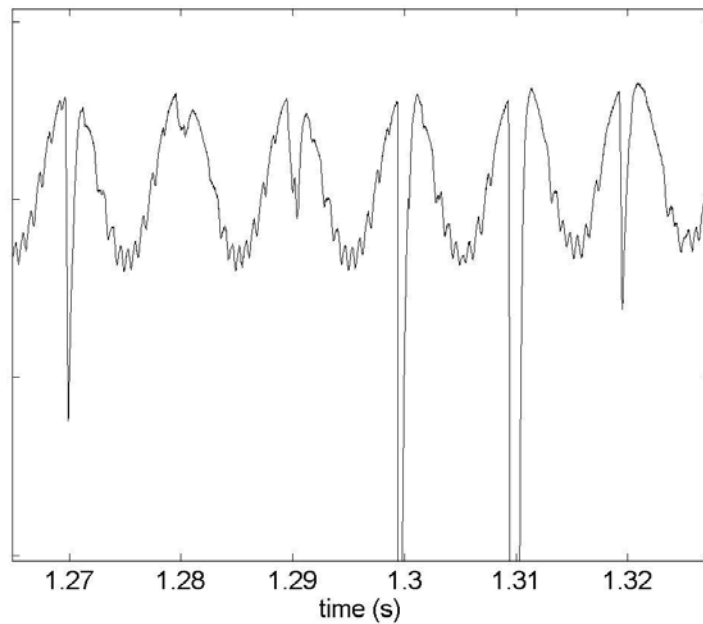
Figur 20: Detektorsignaler och målsökarrörelser då laserns effekt är ökad nästan en faktor 10. Övre figurerna gäller utan ströljus och de undre med ströljus enligt PST B.

3.3.4 Verifiering

I detta avsnitt jämförs slutligen simuleringarna ovan med experimentella resultat. Det första som undersöks är detektorsignalerna och att störkontrasterna är de man förväntar sig. I figur 21 visas detektorsignalen från målsökaren under ett försök, överlagrad en 100 Hz sinusvåg som visar retikelns läge i nutationsvarvet. Målet (svartkroppen) ger små täta pulser kopplat till retikelns modulationsfrekvens medan lasern ger starka pulser med längre mellanrum som hänger samman med laserns pulsfrekvens.

Tabellen nedan visar hur stor respons som erhöles i målsökarens detektor då laserns effekt varierades. Den innehåller även teoretiska värden för hur stor effekt som förväntas nå målsökaraperturen och kvoten mellan responsen och den infallande effekten.

Lasereffekt	Infallande effekt	Detektorrespons	Kvot V/W
Bara svartkroppen	P_{bb}	Y [V]	2060000
X [W]	$21 P_{bb}$	$1,8 Y$ [V]	176000
$6,6 X$ [W]	$137 P_{bb}$	$10 Y$ [V]	149000
$10 X$ [W]	$209 P_{bb}$	$21,4 Y$ [V]	211000
$15 X$ [W]	$321 P_{bb}$	$25 Y$ [V]	160000

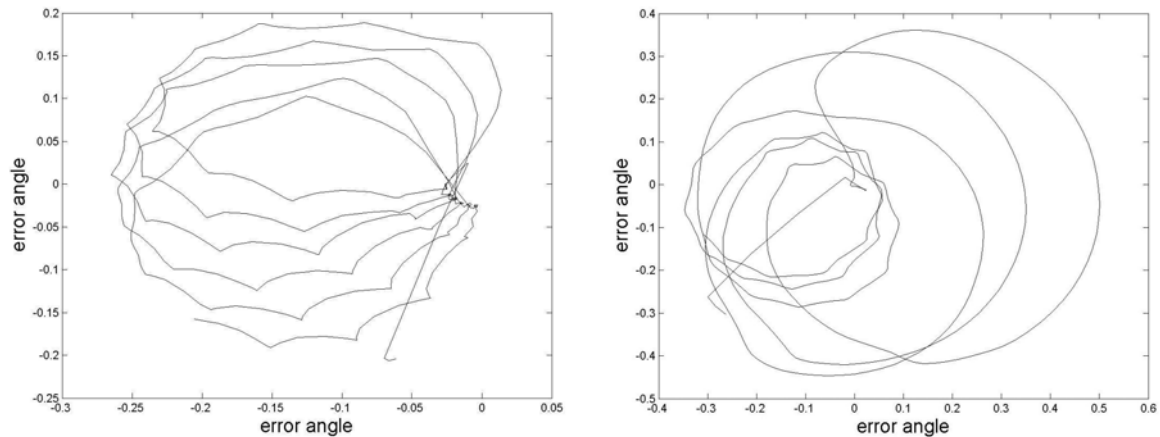


Figur 21: Detektorsignalen då målsökaren är riktad mot svartkroppen och samtidigt är belyst av en pulsad laser.

Som synes varierar responskonstanten kraftigt från fallet då strålningen kommer från svartkroppen till de fall där lasern belyser aperturen. En tänkbar förklaring är att målsökaren har en krets som förstärker små signaler innan detektorsignalen kan mätas. Dessa resultat tyder hur som helst på att störkontrasten inte blir den man teoretiskt förväntar sig och som ges av simuleringarna utan ströljus. I simuleringarna med ströljus blir kontrasten mindre, men detta beror på att ströljuset (felaktigt) endast påverkar lasern i modellen.

Frågan är nu hur man ska ställa sig till detta problem, för att kunna göra vettiga jämförelser med simuleringarna. Lösningen var att sänka laserns effekt under simuleringarna för att erhålla en liknande störkontrast i detektorsignalen. Responskonstanten gavs värdet 2000000 V/W för att den simulerade detektorsignalen skulle ge ett svar som var jämförbart med det under försöken. I det verkliga systemet bottnar detektorsignalen vid en given nivå. Även detta faktum avspeglas i modellen. Därmed borde sensorsignalen bli något snär realistiskt simulerad. Samtidigt får man vara försiktig med att dra alltför långtgående slutsatser om hur målsökaren påverkas vid en given lasereffekt. I fortsättningen undersöks i första hand vad som händer då laserns effekt varierar i försöken jämfört med simuleringarna. Figur 22 visar målsökarens rörelser vid samma effekter som under simuleringarna tidigare (inräknat korrigeringsfaktorn för att erhålla rätt störkontrast). Jämför gärna med figur 18-20.

Här, liksom i simuleringarna, nuterar målsökarens siktlinje runt målet med skillnadsfrekvensen (i detta fall drygt 1 Hz då laserns prf är 101 Hz och retikeln nuterar med knappt 100 Hz). Målsökarens felavvikelse ökar då laserns effekt ökar. Vid den lägre lasereffekten är avvikelserna som störst dryga 70% av målsökarens halva FOV (field of view) och vid den högre effekten var motsvarande siffra 130%, vilket innebär att målet stundtals befinner sig utanför målsökarens synfält. Dessa resultat är inte långt ifrån de som erhöles vid simuleringarna i avsnitt 3.3.3.



Figur 22: Målsökarens rörelser vid störning med en pulsad laser. I den vänstra figuren är laserns effekt knappt en tiondel av lasereffekten i den högra.

Den viktigaste poängen är att ströljuset har en väldigt stor betydelse när lasereffekten blir stor. Detektorsignalen i de omnämnda försöken bottnades vid båda effektnivåer. Sannolikt är det ströljuset som gör hela skillnaden, d.v.s. med en högre effekt har lasern större möjlighet att störa målsökaren även utanför synfältet. Detta visar sig även tydligt vid motsvarande simuleringar.

Man får som sagt dock inte lägga för stor vikt vid den exakta avvikelsen för målsökaren under simuleringarna. Det finns alltför många felkällor som spelar in, inte minst hur stort detektorns svar blir på laserns strålning enligt vad som tidigare nämndes. Målsökarens dynamik bestäms dessutom till stor del av en styrkonstant som sätts av användaren. Vid simuleringarna som presenterades tidigare var denna styrkonstant anpassad i största möjliga mån att efterlikna experimentella data.

Det är inte enkelt att dra några långtgående slutsatser av resultaten ovan. En är att ströljuset är viktigt. För att få trovärdiga simuleringar måste detta mätas upp noggrant. Det är troligt att den enkla uppskattningen av ströljuset som gjordes här inte stämmer perfekt och att man därför tappar lite av värdet i att jämföra simuleringarna med experimenten rakt av. Det är dock tydligt att en effekttökning hos lasern ger mer störverkan i målsökaren p.g.a. ströljuset, vilket syns både i försöken och simuleringarna.

Ett annat faktum som gör det svårt att göra exakta jämförelser är att modellen av målsökaren är väldigt generell och att man därför inte kan vänta sig annat än generella simuleringsresultat. De resultat som presenterades ovan skulle kunna stämma hyfsat med näst intill vilken nuterande retikelmålsökare som helst. För att noggrannare kunna verifiera störverkan av lasern måste man därför ha en mer detaljerad och specifik modell av målsökaren. Det är dock med all tydlighet visat att modellen kan anpassas att efterlikna verkligheten väl i ett specifikt testfall.

4 Slutsatser

Första delen av rapporten handlade om DIRCM-modellens byggstenar. De viktigaste delarna, som ligger till grund för hur en målsökande robot påverkas av lasern, är målföljning och bildgenerering. De avgör om ett hot kan störas ut eller ej. Återstoden av rapporten granskade dessa båda delar mer i detalj genom simuleringar.

Genom att simulera olika scenarier får man en kvalitativ uppfattning hur bra modellen stämmer. Åtskilliga fel har härigenom kunnat åtgärdas och i dagsläget fungerar modellen stabilt. I simuleringsavsnitten visas att målföljningen i modellen fungerar som förväntat, dock med vissa brister. Först och främst skulle ett tidsberoende för plattformsvibrationerna öka realismen. Detta gäller i viss mån även för image dancing. Även simuleringsresultaten som erhöles från störningen av en retikelmålsökare är i stort som förväntade. Målsökaren och roboten börjar vobbla med skillnadsfrekvensen och ströljuset visar sig viktigt för att kunna störa målsökaren utanför dess synfält. Även här upptäcktes vissa brister, där diskretiseringen av radiansnivåerna i målsökarmodellen pekades ut som ett problem.

Enbart simuleringar kan dock aldrig fastslå modellens grad av realism, förutom i enstaka fall genom jämförelser med teoretiska beräkningar. I övrigt duger simuleringarna i första hand till att bedöma modellens rimlighet. Att inga simuleringar kunde bedömas som orimliga är trots allt ett första litet steg mot en verifiering av modellen, men för att tydligt klarlägga modellens realism måste man jämföra med verkligheten.

Den sista biten av rapporten ägnades åt att jämföra simuleringsresultaten med verkliga experiment mot en nuterande retikelmålsökare och därigenom försöka dra slutsatser om hur modellen stämmer med verkligheten. En av de viktigaste egenskaperna för modellen är att generera realistiska felpekningsvinklar för målsökaren.

Karakteristiken för målsökarens rörelser simulerades någorlunda realistiskt, men felvinklarnas storlek kunde p.g.a. vissa osäkerhetsmoment (t.ex. att målsökarmodellen är alltför generell och att ströljuset inte kunde mätas upp exakt) inte verifieras i mer generell betydelse, vilket skulle ha inneburit att man kan förlita sig på modellen även vid andra förhållanden än testfallets. Man kan dock hävda att modellernas parameteruppsättning kunde anpassas att ge hyggligt realistiska resultat. Modellen efterliknar verkligheten väl i det givna testfallet och det är därmed troligt att modellen kan användas och ge goda resultat i fall som efterliknar detta. Exempelvis bör modellen kunna utnyttjas till simuleringar av en störd flygande robot och kommer då troligtvis att ge resultat som stämmer tillräckligt väl med verkligheten för den typ av robot som verifieringen är gjord mot.

Att hävda att samma parameteruppsättning skulle vara allmänt giltig är dock ett långt steg att ta. Man bör således vara försiktig med att förlita sig blint på simuleringsresultat vid andra förutsättningar, tills dess modellen kalibrerats om eller att en mer allmän verifiering kommit till stånd. En sådan verifiering måste inkludera en noggrannare uppmätning av ströljuset för systemen i fråga och fler olika testfall. Att ströljuset är viktigt för att erhålla realistiska simuleringar är otvivelaktigt. Både i simuleringarna och experimenten kunde man notera att en högre lasereffekt ger större felpekningsvinklar för målsökaren p.g.a. ströljuset. Tester måste också göras mot fler typer av målsökare, inte bara retikel, och dessutom måste DIRCM-systemets målföljning verifieras. Detta kan med fördel göras m.h.a. LYSA, som är ett mätsystem för denna typ av tillämpningar [16]. Helst bör även plattformsvibrationer och rörliga mål ingå i mätningarna.

5 Referenser

- [1] C. Wigren, O. Gustafsson. ”Implementering av laserstörmodell”. FOI-rapport, FOI-R--0249--SE, Nov 2001.
- [2] C. Hedberg, L. Tydén, C. Wigren. ”EwSim – Electronic Warfare Real Time Simulation in the Visual and Infrared Wavelength Range”. FOI-rapport, FOI-R--0709--SE, Dec 2000.
- [3] M. Petersson. ”Utveckling av en laserstörmodell (DIRCM)”. FOI-memo nr 03-2709, Dec 2003.
- [4] C. Johansson. ”Slutrapport studien VMS för helikopter (HKP99352SF)”. Hkpflj beteckning 21 120:11680, Rapport nr 2169, Dec 2002.
- [5] F. Gustafsson, L. Ljung, M. Millnert, *Signalbehandling*. Kap. 5.2. Studentlitteratur (2000). ISBN 91-44-01500-3.
- [6] S.K. Singhal. ”Effective remote modeling in large-scale distributed simulation and visualization environments” (sid. 36-48). Stanford University, 1997.
- [7] T. Glad, L. Ljung. *Reglerteknik – Grundläggande teori*. Kap. 5. Studentlitteratur (1989). ISBN 91-44-17892-1.
- [8] L. Andrews, R. Phillips. *Laser Beam Propagation through Random Media*. SPIE Optical Engineering Press (1998).
- [9] C. Wigren. ”IGOSS, Model of Image Generation in Optronic Sensor Systems”. FOA-rapport, FOA-R--97-00582-616--SE (1997).
- [10] S. Söderkvist, L-E. Ahnell. *Tidsdiskreta Signaler & System*. Kap. 5. Tryckeriet hos Erik Larsson AB (1994).
- [11] G.C. Holst, *Electro-Optical Imaging System Performance*. JCD Publishing and SPIE Optical Engineering Press (1995).
- [12] L. Berglund. ”Simulering av laserstörning”. FOA-rapport, CH 30307-8.3, Okt 1992.
- [13] L. Uhlin, B. Ericson. ”Ströljus i optiska system – Karakterisering av känslighet för laserstörning”. FOA-rapport, FOA-R--95-00206-3.1--SE, Jan 1996.
- [14] T. Nordman. ”Modelling of Gyro in an IR Seeker for Real-Time Simulation”. FOI-rapport, FOI-R--1155--SE, Jan 2004.
- [15] L.Sjöqvist, O. Steinvall. ”CEPA8 JP8.11 Laser Beam Steering – System Study”. FOI-rapport, FOI-R--1235--SE, Mar 2004.
- [16] L. Allard, G. Bolander m.fl. ”Mätning med verkanslasersystemet LYSA i marin miljö”. FOI-rapport, FOI-RH--0256--SE, Dec 2003.