

Fredrik Näsström, Rahman Aljasmi, Bengt Boberg, Leif Carlsson, Magnus Gustafsson,
Håkan Larsson, Dietmar Letalick, Andreas Persson, Ove Steinvall,
Ain Sume, Thomas Svensson, Morgan Ulvklo och Åke Wernersson

Intelligenta Verkanssystem, slutrapport av genomförda aktiviteter år 2002.

TOTALFÖRSVARETS FORSKNINGSinSTITUT

Sensorteknik
Box 1165
581 11 Linköping

FOI-R-0746--SE

Februari 2003

ISSN 1650-1942

Teknisk rapport

Fredrik Näsström, Rahman Aljasmi, Bengt Boberg, Leif Carlsson, Magnus Gustafsson,
Håkan Larsson, Dietmar Letalick, Andreas Persson, Ove Steinvall,
Ain Sume, Thomas Svensson, Morgan Ulvklo och Åke Wernersson

Intelligenta Verkanssystem, slutrapport av genomförda aktiviteter år 2002.

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Sensorteknik Box 1165 581 11 Linköping	Rapportnummer, ISRN FOI-R--0746--SE	Klassificering Teknisk rapport
	Forskningsområde 5. Bekämpning	
	Månad, år Februari 2003	Projektnummer E2025
	Verksamhetsgren 5. Uppdragsfinansierad verksamhet	
	Delområde 51 VVS med styrda vapen	
Författare/redaktör Fredrik Näsström Andreas Persson Rahman Aljasmi Ove Steinvall Bengt Boberg Ain Sume Leif Carlsson Thomas Svensson Magnus Gustafsson Morgan Ulvklo Håkan Larsson Åke Wernersson Dietmar Letalick	Projekttledare Svante Karlsson	
	Godkänd av	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning FM	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig	
	Rapportens titel Intelligentta Verkanssystem, slutrapport av genomförda aktiviteter år 2002.	
Sammanfattning (högst 200 ord) I projektet Intelligentta verkanssystem studeras ett verkanssystem där zonnörs- och målsökarsensorer (laser, IR, radar etc.) integreras till ett enda fungerande system. Arbetet har under år 2002 bedrivits inom flera olika områden såsom: signalbehandling, precisionsstyrning, generering av målsignaturbibliotek och sensorinventering. Denna rapport beskriver en del av detta arbete. Verksamheten har i år lagt en grund för fortsatt signalbehandlingsarbete med fokus på måligenkänning. En simuleringsmiljö för IR- och laserradarsensorer har därför byggts upp, i samverkan med andra projekt på FOI. Vidare har arbete bedrivits för att generera geometriska modeller av tidigare uppmätta stridsfordon, beräkning av radarsignaturer från CAD-modeller av stridsfordon samt beräkning av polarimetriska särdrag från dessa radarsignaturer. Dessa särdrag kommer att användas för målklassificering. Inom precisionsstyrning har arbete bedrivits för att undersöka hur noggrant position, riktning/orientering och hastighet kan skattas hos ett markmål. Ett målsignaturbibliotek är under uppbyggnad. Biblioteket kommer att innehålla data från flera olika sensorer såsom laser, IR och radar, och på sikt är det tänkt att målbiblioteket ska innehålla signaturer med våglängder från UV t.o.m. mikrovågor (radar). Det beskrivna arbetet som utförts inom sensorinventeringen är en kort genomgång av några våglängdsband och några sensortyper, med fokusering på deras lämplighet för en målsökare i slutfasen.		
Nyckelord Målsignaturbibliotek, måligenkänning, klassificering, identifiering, IR, laser, radar, sensordatafusion, bomavstånd, brisadpunkt, kriteriefunktion, verkansdel		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 96 s.	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Sensor Technology P.O. Box 1165 SE-581 11 Linköping	Report number, ISRN FOI-R--0746--SE	Report type Technical report
	Research area code 5. Combat	
	Month year February 2003	Project no. E2025
	Customers code 5. Commissioned Research	
	Sub area code 51 Weapons and Protection	
Author/s (editor/s) Fredrik Näsström Andreas Persson Rahman Aljasmi Ove Steinvall Bengt Boberg Ain Sume Leif Carlsson Thomas Svensson Magnus Gustafsson Morgan Ulvklo Håkan Larsson Åke Wernersson Dietmar Letalick	Project manager Svante Karlsson	
	Approved by	
	Sponsoring agency	
	Scientifically and technically responsible	
Report title (In translation) Intelligent Munition, final report of carried out activities in 2002.		
Abstract (not more than 200 words) Within the project "Intelligent Munition" a system is studied where fuzing- and seeker sensors (laser, IR, radar,...) are integrated into one operational system. During fy 2002 the work has been carried out within several different areas like signal processing and precision guidance, and also consisted of initialising the build-up of a target signature library and making a sensor inventory. This report describes part of this work. During this year we have made the preparations for the forthcoming work on signal processing with focus on target recognition. A simulation environment for IR- and laser-radar has been created in cooperation with other projects at the FOI. We have also made geometric models of some armoured targets, calculated radar signatures from corresponding CAD-models and also calculated polarimetric characteristics from these radar signatures. These characteristics will be used for target classification. Within precision guidance we have investigated how accurately position/heading/orientation and speed can be estimated for a ground target. A target signature library is under construction. The library will contain data from different sensors like: laser, IR and radar, and will in the future contain the whole waveband from UV to microwaves (radar). The work on the sensor inventory is a short review of some wavebands and sensors, with focus on their application for final guidance.		
Keywords Target library, target recognition, classification, identification, IR, laser, radar, sensordata fusion, miss distance, warhead		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 96 p.	
Price acc. to pricelist		

Innehåll

1 Inledning	7
2 Signalbehandling.....	8
2.1 Simulering av annalkandeförlopp	8
2.2 Signalbehandling: IR	12
2.2.1 Objektigenkänning i IR-sekvenser	13
2.2.2 Annalkandeförlopp	14
2.2.3 Representationsform av utbredda mål via gaborprober.....	14
2.2.4 Partitionering av parameterrummet.....	15
2.2.5 Iterativt ramverk för skattning av träffpunkt.....	15
2.3 Laser.....	17
2.3.1 3-D-laserradar.....	17
2.3.2 Generering av geometriska modeller.....	17
2.3.3 Generering av intensitetsbilder och polärdiagram.....	21
2.4 Radar	25
2.4.1 Simuleringar	26
2.4.2 Genereringen av radardata.....	27
2.4.3 Polarimetriska särdrag för måligenkänning.....	32
2.4.4 Karakteristiska polarisationer och deras parameterisering	35
2.4.5 MATLAB-program för beräkning av särdragsparametrarna.....	39
3 Precisionsstyrning: Detektion, rörelseestimering och styrning.....	45
3.1 Problemställningar och begränsningar, en introduktion	45
3.2 Förenklade modeller för detektion och estimering	46
3.3 Träffpunkt och måltoleranser.....	47
3.3.1 Verkanssystemet.....	47
3.3.2 Ytans påverkan på problemet	48
3.4 Modellering och simulering.....	50
3.4.1 Segmentering.....	50
3.4.2 Sensordata och observationer	50
3.4.3 Parametrar för sensor och mål.....	50
3.4.4 Felkällor	51
3.4.5 Ytgenerering.....	52
3.4.6 Ytsampling	53

3.4.7 Målets interaktion med ytan	53
3.5 Växelverkan mellan målet och terrängen	56
3.5.1 Problemet	57
3.5.2 Sensorplattformens tillståndsvariabler	57
3.5.3 Målets tillståndsvariabler	57
3.5.4 Ytans och målets tillståndsvariabler	58
4 Mål/signaturbibliotek.....	60
4.1 Målbibliotek.....	60
4.1.1 IR-gren	61
4.1.2 Laser-gren	62
4.1.3 Radar-gren	62
5 Sensorinventering	63
5.1 IR-sensorer.....	63
5.1.1 Okyllda IR-detektorer	63
5.1.2 Kyllda IR-detektorer	63
5.1.3 Val av systemparametrar.....	64
5.1.4 Multispektral teknik	69
5.1.5 Framtida teknikanvändning år 2020	72
5.2 Laser	74
5.2.1 Laserskanner Optech ILRIS-3D	74
5.2.2 Mätförfarande och databehandling	75
5.2.3 Felanalys vid mätning med Optech ILRIS-3D	75
5.2.4 Framtida avståndsavkännande arraydetektorer	76
5.3 Radar	77
5.3.1 Närfält/fjärrfält.....	77
5.3.2 Målmodellering för närfälts/fjärrfältsstudium	78
5.3.3 Olika fjärrfältsavstånd i modelleringen	80
5.3.4 Spridningsmatrisen och dess vektorisering.....	81
5.3.5 Resultat: variation hos aperturfält, likhetsparameter och målarea från fjärr- till närfält.....	85
5.3.6 Slutsatser av när/fjärrfältsstudien.....	91
6 Sammanfattning och slutsatser	93
7 Fortsatt arbete	94
8 Referenser.....	95

1 Inledning

Arbetet som bedrivs i projektet ”Intelligenta verkanssystem” syftar till att undersöka vilken precision ett ”intelligent verkanssystem” kan få då man integrerar zonrörs- och målsökarsensorer såsom radar, IR, laserradar etc. till ett enda fungerande system, för att verka mot markfordon och helikoptrar. Dessa fordon har gemensamt att de opererar i en miljö där de är svåra att upptäcka och deras hastighet är relativt låg (< 300 km/h).

Verkanssystemet kan t.ex. sitta på en målsökarstyrd robot, UCAV(Unmanned Combat Air Vehicle) eller på en enklare robot som inviseras av en UAV (Unmanned Aerial Vehicle). För att fokusera arbetet analyseras endast verkanssystemet från det att ett enskilt mål har valts fram till träff. En stor del av arbetet består då av att klassificera och om möjligt identifiera objektet, samt bestämma målets orientering för att kunna lokalisera och peka ut en lämplig träffpunkt på målet. Tillsammans med avancerad robotstyrning skall sedan optimal anflygning/inriktning väljas mot den valda träffpunkten. Därefter ges information till verkansdelen så att verkan blir optimal.

Denna rapport kommer att beskriva arbetet som har utförts inom projektet under år 2002.

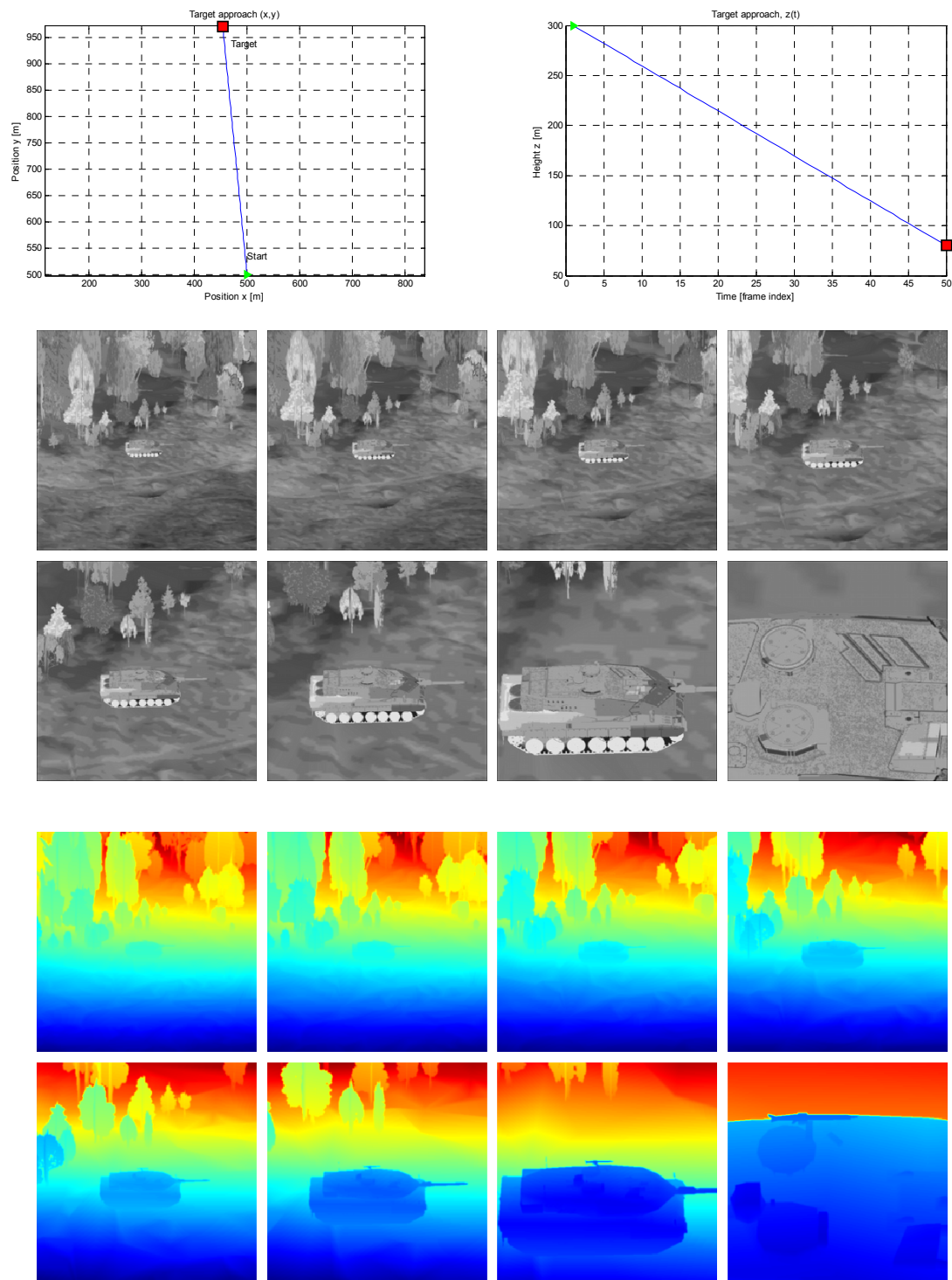
2 Signalbehandling

Detta avsnitt beskriver signalbehandlingsarbetet som utförts för respektive sensor: IR, laser och radar. Kapitlet inleds med ett avsnitt som beskriver tre olika alternativa annalkandeförlopp.

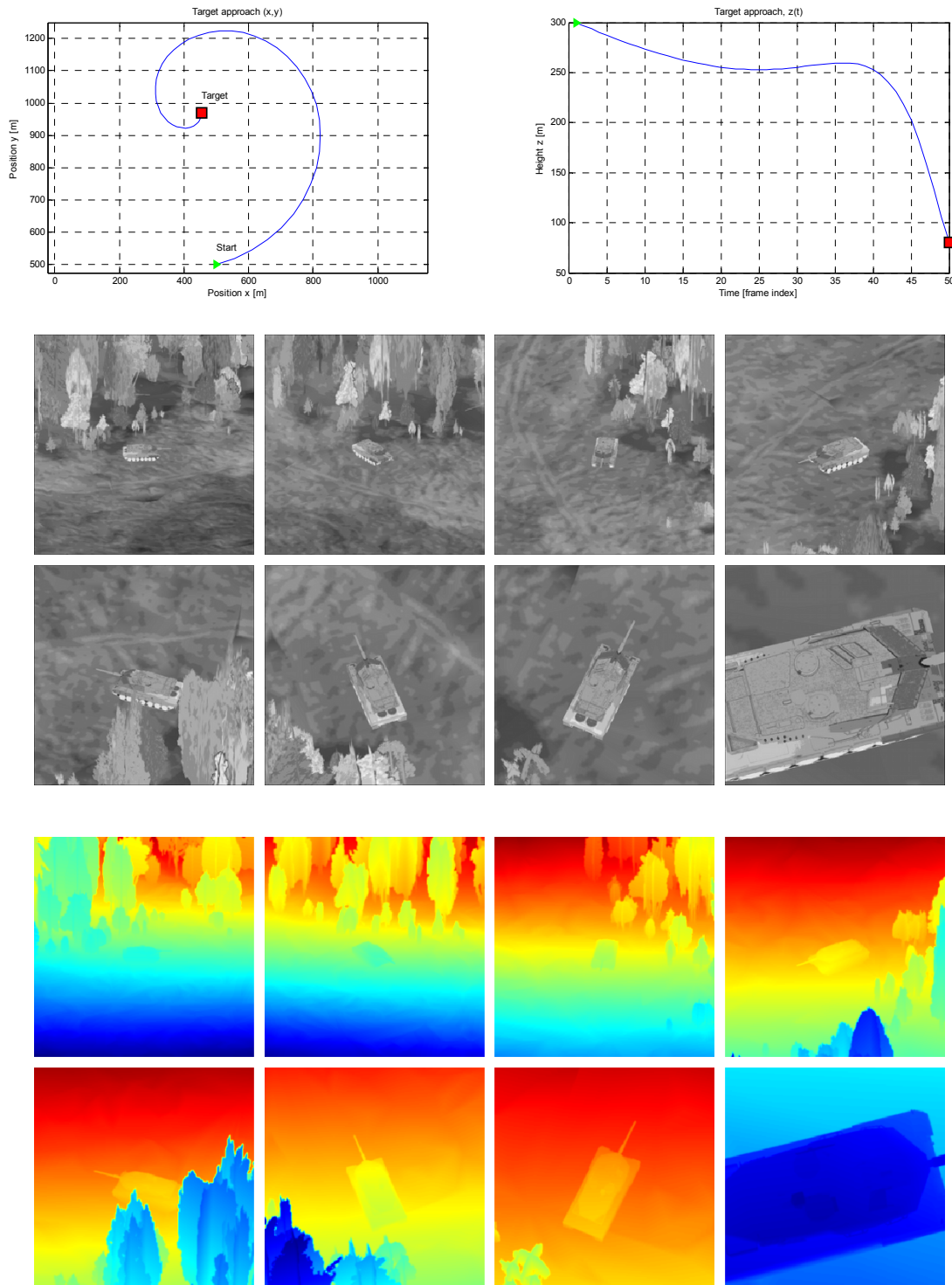
2.1 Simulering av annalkandeförlopp

För att kunna utvärdera hur måligenkänningsförmågan påverkas av anflygningen har en simuleringsmiljö utvecklats som medger enkel utprovning av alternativa annalkandeförlopp. Några förlopp illustreras i figur 1, 2 och 3. Överst i respektive bild visas sensorernas anflygning i xy-planet samt höjdprofilen (z-led). I mitten visas 8 simulerade IR-bilder från början till slutet av anflygningen. IR-sensorn motsvarar en långvågig IR-sensor med en 256x256 pixlar stor fokalplansarray med 5° öppningsvinkel. I de nedre 8 bilderna visas motsvarande simulering av ett framtida laserradarsystem med 256x256 pixlar stor direkt 3D-avbildande fokalplansarray med 5° öppningsvinkel. Färginformationen motsvarar relativt avstånd inom respektive bild.

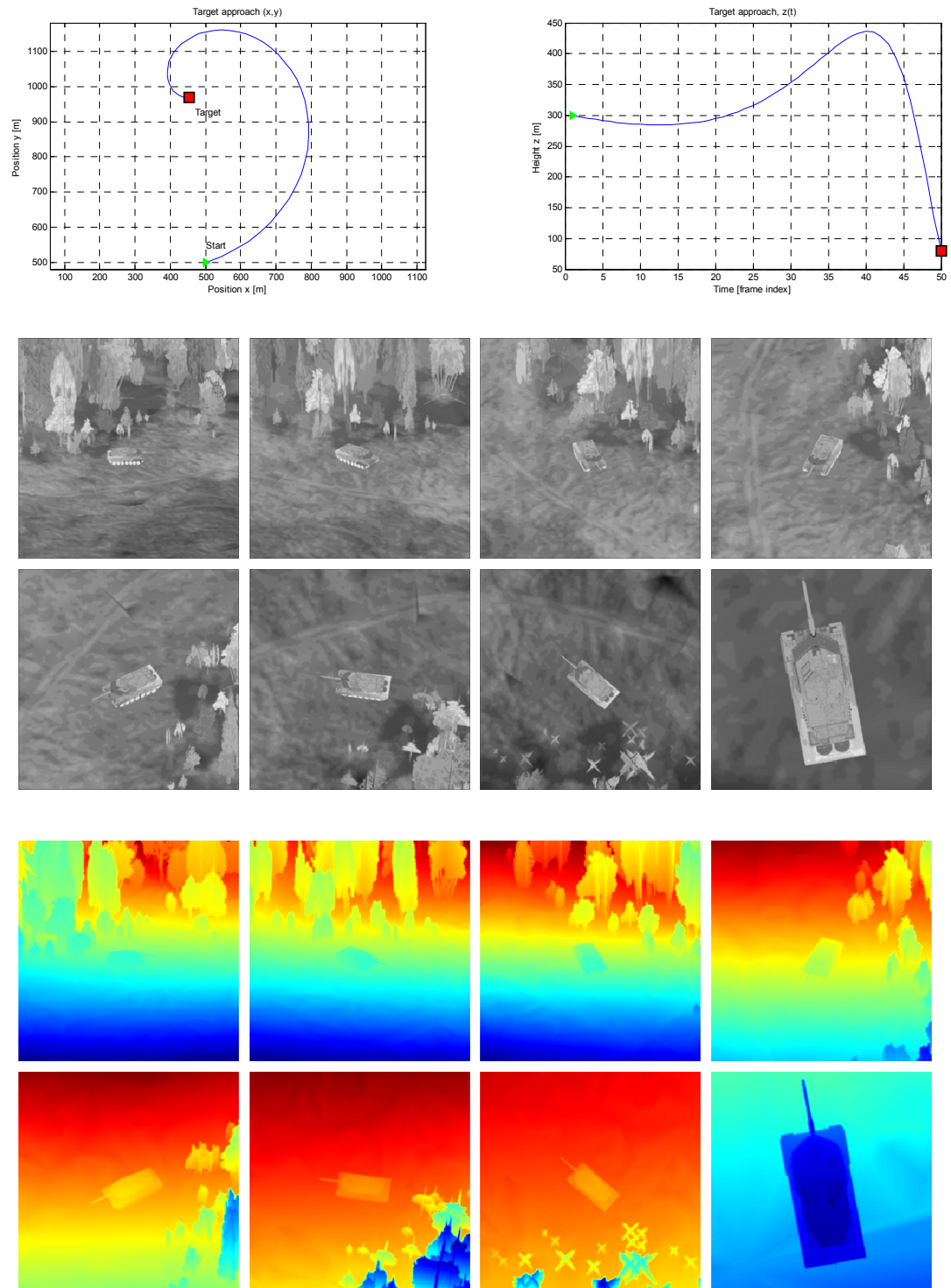
Scenario A i figur 1 beskriver en rak anflygning mot målet med linjärt minskande flyghöjd. Scenario B i figur 2 visar en krökt anflygning med 360° variation med viss ökad flyghöjd under slutfasen. Scenario C i figur 3 visar en krökt anflygning på 270° med markant ökad flyghöjd under slutfasen. Framtida insatser inom måligenkänning får bedöma om säkrare klassificering kan erhållas om alternativa vyer används som i scenario B och C kontra en direkt anflygning motsvarande scenario A.



Figur 1. Scenario A. Överst: Direkt anflygning mot mål med linjärt avtagande höjd. Mitten: Simulerade IR-bilder under anflygningsförloppet. Nederst: Simulerad laserradar med avståndsdata vid motsvarande positioner.



Figur 2. Scenario B. Överst : Cirkulär anflygning mot mål med alternativ höjdprofil.
 Mitten: Simulerade IR-bilder under anflygningsförloppet. Nederst: Simulerad laserradar
 med avståndsdata vid motsvarande positioner.

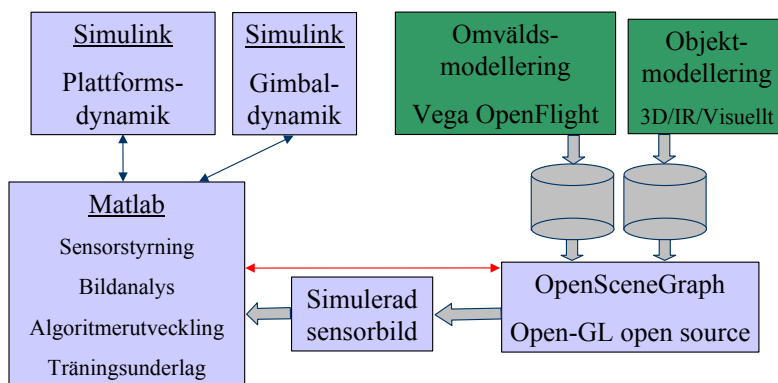


Figur 3. Scenario C. Överst : Cirkulär anflygning mot mål med stegrad höjdprofil under slutfasen. Mitten: Simulerade IR-bilder under anflygningsförloppet. Nederst: Simulerad laserradar med avståndsdata vid motsvarande positioner.

2.2 Signalbehandling: IR

För att medge utvecklingen av objektigenkänningsalgoritmer för att kunna känna igen markfordon från skilda orienteringar mot varierande bakgrunder under ett annalkandeförlopp, har en simuleringsmiljö för IR- och laserradarsensorer byggts upp. Simuleringsmiljön som har utvecklats sammankopplar sensorsimulering och Matlab enligt figur 4.

En plattformsoberoende lösning har tagits fram som skall fungera på PC under operativsystemen Windows 2000, XP samt Linux. Detta arbete har skett i samverkan med FM-projekten SIREOS, Optroniska sensorsystem (OSS), Informationssystem för måligenkänning (ISM) och Optisk Informationsbehandling (OSP). Ett relativt omfattande arbete under året har bestått i att ta fram en dygnsnormaliserad ortorektifierad IR-mosaik från över 5000 fristående IR-bilder över ett försöksområde vid Stridsskolan i Kvarn. Bilderna kommer från en LWIR QWIP-sensor (FLIR-system ThermoCAM SC-3000). Modellen täcker i dagsläget $1.5 \times 1.5 \text{ km}^2$ men dataunderlag finns insamlat för den tredubbla storleken. I figur 5 visas mosaiken och i figur 6 visas inzoomade detaljer. Den tredimensionella topografin har beräknats utgående från data från ett flygburet laserradarsystem (TopEye). I denna modellvärld kan 3D-modeller med IR-texturer placeras och olika annalkandeförlopp utvärderas, vilket visades i figur 1-3. Dessutom används miljön för att ta fram statistiskt underlag för träning av igenkänningsalgoritmer. Miljön medger även enkel simulering av laserradar. Målmodeller med inre frihetsgrader, som rörliga kanontorn, robotramper etc., kan artikuleras i simuleringen. Modellernas IR-textur kan dynamiskt styras under simuleringen för att exempelvis simulera ett uppvärmningsförlopp.



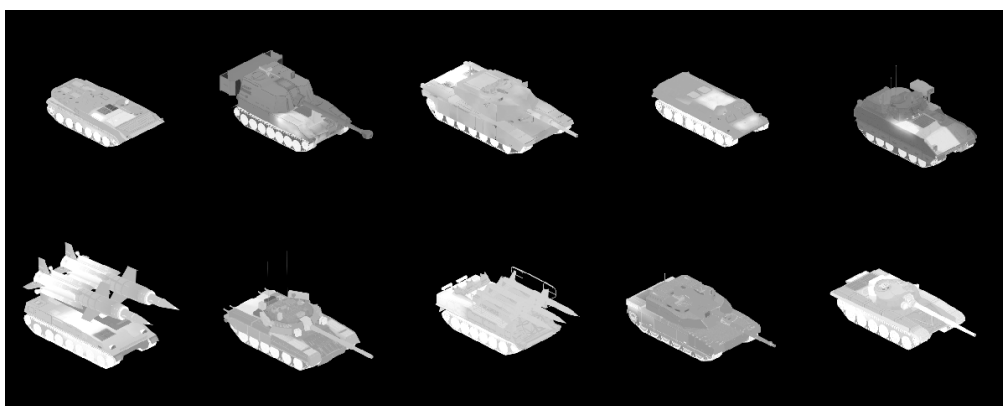
Figur 4. Programvaror som integrerats för sensorsimulering som möjliggör algoritmutveckling för måligenkänning och utprovning av alternativa annalkandeförlopp.



Figur 5. Översikt över den ortorektifierade IR-mosaiken över Kvarn. Kompletterande IR-data har senare fyllt i de inre hålen i mosaiken.



Figur 6. Varierande grad av inzoomning för att visa detaljrikedomen i modellen.



Figur 7. Objektbiblioteket av fordon består av ett antal 3D-modeller med IR-textur.

2.2.1 Objektigenkänning i IR-sekvenser

För att kunna känna igen markfordon från skilda orienteringar mot varierande bakgrunder under ett annalkandeförlopp krävs ett avancerat ramverk av signalbehandling. Den här beskrivna metoden för igenkänning av utbredda markmål i bildsekvenser är huvudsakligen

utformad för analys av högupplösta bilder där detektion och initial klassificering redan utförts av tidigare beräkningssteg. Metoden baseras på skilda arbeten inom bildanalys, t ex från områden som estimering av tredimensionell struktur via rörlig optisk sensor, rörelsekompensering (plane/parallax uppdelning av rörelsefält) samt objektigenkänning via glesa gridrepresentationer. Arbetet är i ett inledningsskede och inga uttömmande prestandatester på metoden har ännu gjorts.

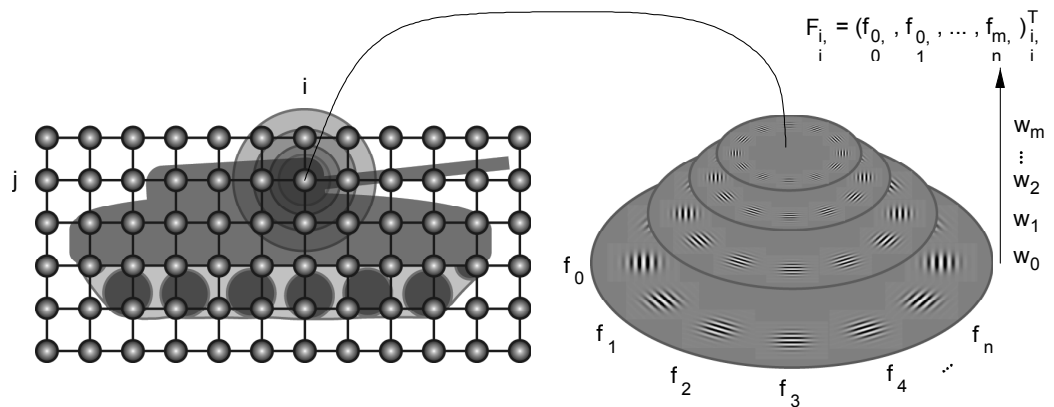
I all igenkänning är hanteringen av invarianser av största vikt. Man vill känna igen objekt oberoende av deras orientering, storlek, position och lokala bakgrund. Dessutom är det väsentligt att metoden även kan hantera smärre avvikelser mellan objektmodellernas ideala utseende och de fysiskt realiserade bilderna, t ex vad gäller belysningsvariation och termiskt tillstånd hos fordon.

2.2.2 Annalkandeförlopp

För att i kommande arbeten sammanväga information under annalkandeförloppet bör den här beskrivna metoden kompletteras med en sekventiell hantering av hypoteser, exempelvis via så kallade dolda markovprocesser (Hidden Markov Models). En sådan klassificeringsstruktur kan medge att på längre avstånd, då bildmaterialet bara tillåter klassificering av fordonsslag, sovrar klassificeraren mellan fordonsklasser som t.ex. stridsvagnar och trupptransportvagnar. På närmare håll, då bildmaterialet har högre upplösning, kan en förfinad analys av möjliga hypoteser ske via den här beskrivna metoden. Den innefattar en skattning av målets orientering och egenrörelse samt en prediktion av utseendet i kommande bilder i sekvensen. På ett sådant sätt kan information från multipla vyer utnyttjas på ett effektivt sätt. Om målet är i rörelse kan detta utnyttjas för säkrare segmentering mellan mål och lokal bakgrund. Då målet istället är stillastående inkluderas denna segmentering i själva igenkänningsmetoden.

2.2.3 Representationsform av utbredda mål via gaborprober

Den lägsta representationsformen i den här presenterade metoden är lokala omgivningar i bilden som representeras via en uppsättning filtersvar. En sådan representation är kapabel att hantera en begränsad variation i målets orientering, position och skala. Dessa filtersvar beskriver kanter och linjer i olika orienteringar och storlek (spatiell frekvens). Vissa delar av objekt har större anhopningar av sådana filtersvar, t.ex. längs objektets kanter och vid inre strukturer. I sådana anhopningar med mycket lokal energi placeras en gaborprob som innehåller filtersvar som representerar objektets lokala struktur. Sammanställt utgör dessa noder en gles topologisk representation som beskriver lokala kanter och linjers relation till varandra över objektet. En fördel med denna representationsform är att gaborfiltren utsaga är oberoende av globala intensitetsförändringar av bilden, t.ex. en global termisk ökning. Dessutom medger filterbasen en möjlighet till lokal justering mellan objekthypotesernas position och den faktiska bilden via ett iterativt ramverk. I figur 8 illustreras konceptet.



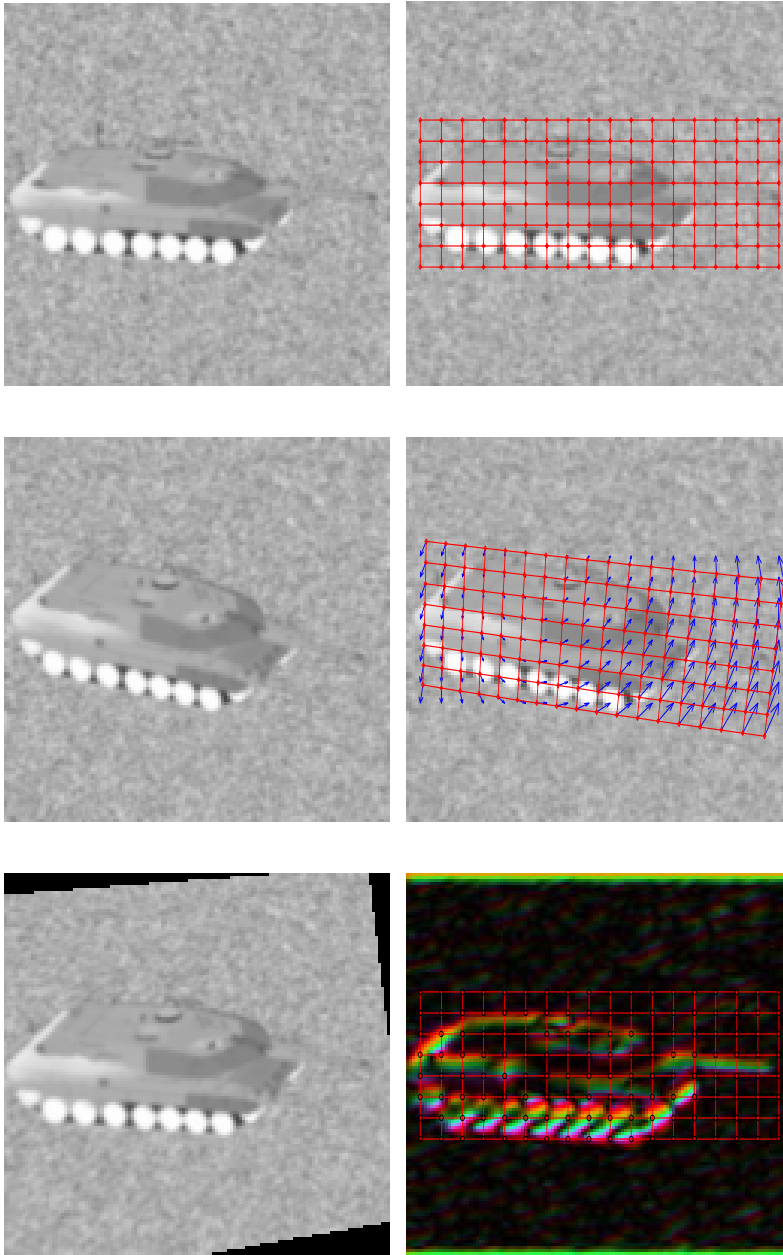
Figur 8. Representationsform av ett utbrett objekt i form av en gles topologisk graf med lokala filtersvar i noderna (Gaborprober).

2.2.4 Partitionering av parameterrummet

Varje objekt i ett objektbibliotek överförs till ett antal fristående representationer i form av glesa gaborprober som enbart är kapabla att känna igen objektet från ett begränsat intervall vad gäller de fria parametrarna för skalning, rotation och translation. Objekt med enkel geometri behöver färre representationer. I dagsläget är denna partitionering samma för alla ingående objekt. Om ingen kompletterande information finns om avstånd och rimliga vinklar måste ett objekts samtliga hypoteser utprovas. I arbetets förlängning kan detta komma att ske i ett hierarkiskt ramverk. Under ett annalkandeförlopp kan stöd från tidigare hypoteser med störst stöd beskriva vilka nya vyer som är mest relevanta att prioritera i matchningsprocessen för nästa bild i sekvensen. Lämpliga alternativa scenarioberoende träffpunkter finns som en kompletterande information till varje fristående representation.

2.2.5 Iterativt ramverk för skattning av träffpunkt

Den avbildande funktionen från den tredimensionella världen till bildplanet är en olinjär avbildning som medför att direkta metoder sällan kan användas. I den här presenterade metoden utnyttjas ett IEKF-filter (Iterated Extended Kalman Filter) för estimering av parametrar (skalning, rotation och translation samt målets eventuella egenrörelse) som behövs för att jämföra en objekthypotes till aktuell bild. I denna justering utnyttjas de lokala gaborfiltrens utsagor som "likhetsmått" och dessa ger möjlighet att attrahera varandra med dragkrafter i form av lokala förflyttningsvektorer. IEKF-filtrets funktion är att översätta dessa lokala dragningskrafter till globala förändringar i parameterrummet. Metoden kan via den iterativa justeringsprocessen göras tolerant mot partiell ocklusion och smärre modellavvikelse. I figur 9 visas en matchningsprocess som bygger på en initial affin parametrisk justering som för inbilden mot objektmodellens gaborprobsrepresentation.



Figur 9. Topologisk matchning mellan bilddata och referensdatabasen. **Överst vänster:** Referensbild I_r från objekt databasen. **Överst höger:** Referensbild med överlagrade nodpositioner för gaborproberna. **Mitten vänster:** Aktuell bild I_a som skall granskas. **Mitten höger:** Aktuell bild I_a med överlagrad affin transformation som minimerar globala translationer, rotationer och skjuvningar mellan I_a och I_r . **Botten vänster:** Aktuell bild efter justering via den affina transformationen. **Botten höger:** Färgkodad komponent av gaborproben, d.v.s. ett gaborfiltersvar. Intensiteten beskriver lokal tendens till kant/linje i filtrets huvudorientering (-45°) och färgen visar det lokala fasförhållandet mellan kant och linje. Den glesa representationen medför att endast gaborprobens värde i noderna används i beräkningen av transformationen ovan.

Förbehandling och initiering

Bildsekvensen som skall analyseras filtreras med en samma uppsättning gaborfilter som utnyttjats i objektrepresentationernas topologiska gaborprober. Utpekning av intressanta regioner som skall granskas av måligenkänningsmetoden förväntas ske med någon lämplig detektionsmetod.

Säkerhet i målval

Ett antal alternativa avståndsmått har utprovats. Såväl spatiell närhet, d.v.s. låg summa av dragningskrafter, som likhet i filtersvar är av stor vikt.

Objektmodeller

I arbetet utnyttjas just nu enbart CAD-modeller med IR-textur som objektdata. Avsikten är att under kommande arbete komplettera med uppmätta texturer från varierande drifttillstånd hos målen.

2.3 Laser

Arbetet har inom detta område inriktats mot att samla in data för att ge underlag till ett målbibliotek som kommer att användas vid utveckling av algoritmer för måligenkänning. Från inskannade data kan man sedan beräkna den totala lasermålarean, medelreflektans, tvärsnittsarea m.m., vilket sedan kan presenteras i polärplottar.

Mycket arbete har även utförts för att generera geometriska modeller av de uppmätta stridsfordonen. De geometriska modellerna byggs upp i flera olika steg med olika programmoduler. De geometriska modellerna kommer sedan att ligga till grund för kommande måligenkänningsarbete.

2.3.1 3-D-laserradar

Med ett avbildande laserradarsystem kan x-, y-, och z-koordinater (3-D) samt intensitet registreras i varje mätpunktpunkt. Eftersom ett intensitetsvärde samlas in i varje punkt går det också att beräkna ett objekts lasermålarean utifrån inskannade data. Laserskannern som använts i detta projekt, Optech ILRIS-3D (se kapitel 5.2.1), är förhållandevis långsam och lämpar sig inte för taktisk användning. Detektorn i framtidens laserradarsystem kommer dock att bestå av en fokalplanearray (matrisdetektor) som kan generera 3-D- och intensitetsdata i videotakt (25 bilder/s) [1].

2.3.2 Generering av geometriska modeller

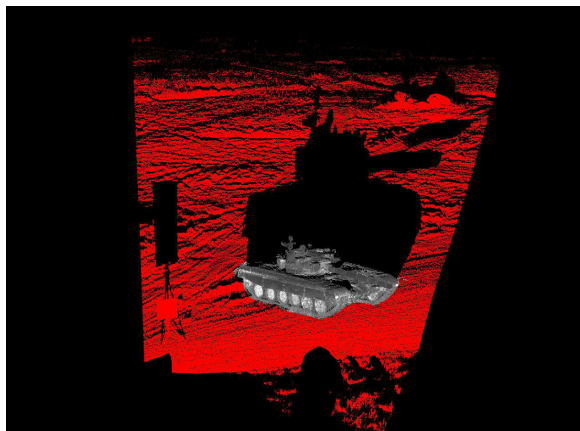
För att bygga upp en geometrisk modell av ett fordon skannas objektet från olika håll; antingen roteras objektet eller också måste skannern förflyttas runt objektet. Ett exempel på en skannad vy visas i figur 10. För att kunna bygga upp en bra geometrisk modell bör objektet skannas i intervall om cirka 30° för ett helt horisontellt varv samt även i olika elevationsvinklar. I fält är det dock oftast svårt att komma upp på höjd över objektet. Tätheten på laserpunkterna (x och y) bör läggas på cirka 1 cm, vilket är noggrannheten vid avståndsmätningen. Innehåller objektet svårare geometriska former, till exempel larvfötter, bör dessa om möjligt skannas lite tätare.



Figur 10. Ett exempel på en skannad 3-D-vy.

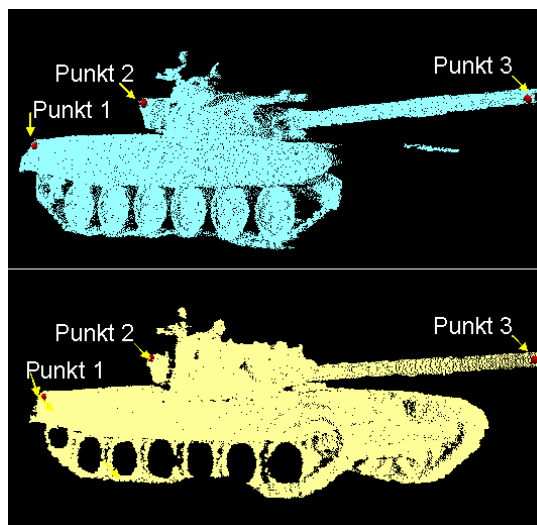
Rådata från laserskannern med binärfilen I3D innehållande (x-, y-, z-koordinat samt intensitet) omvandlas till ett filformat kallat PIF. Detta format är läsbart av programvaran Polyworks, vilket är ett programpaket från kanadensiska Innovmetric som används för att generera geometriska modeller. Sådana modeller kan vara militära objekt eller modeller av olika scenarier. Polyworks består av ett antal programmoduler. I det följande beskrivs uppbyggnaden av ett objekt genom de olika programmodulerna.

PIFedit - I detta program utförs en grov redigering av objektet som ska byggas upp. All omgivning tas bort, se Figur 11.



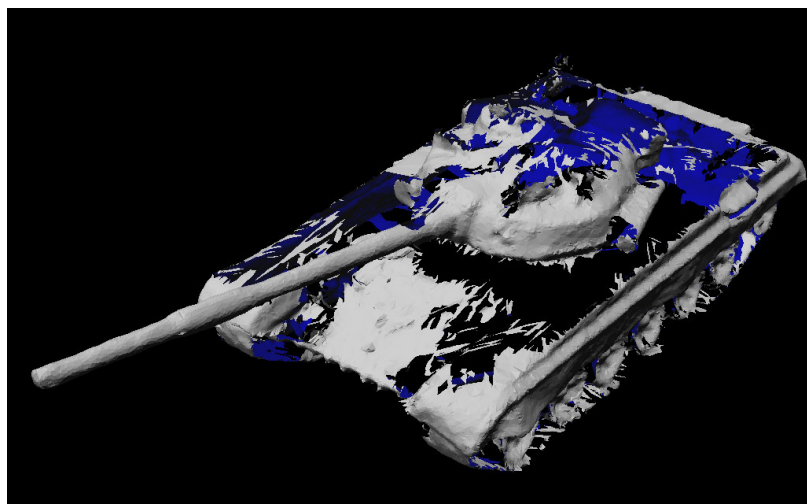
Figur 11. I programmet PIFedit maskas omgivningen bort, rödmarkerat i bilden.

IMAlign - Här görs en inriktning av grovredigerade vyer. Vyerna låses till varandra genom att för två vyer definiera minst tre gemensamma punkter, inom givna toleranser, se figur 12. Dessa två vyer låses till varandra och en tredje riktas in med avseende på de låsta. Denna procedur upprepas till dess att alla vyer har ensats.



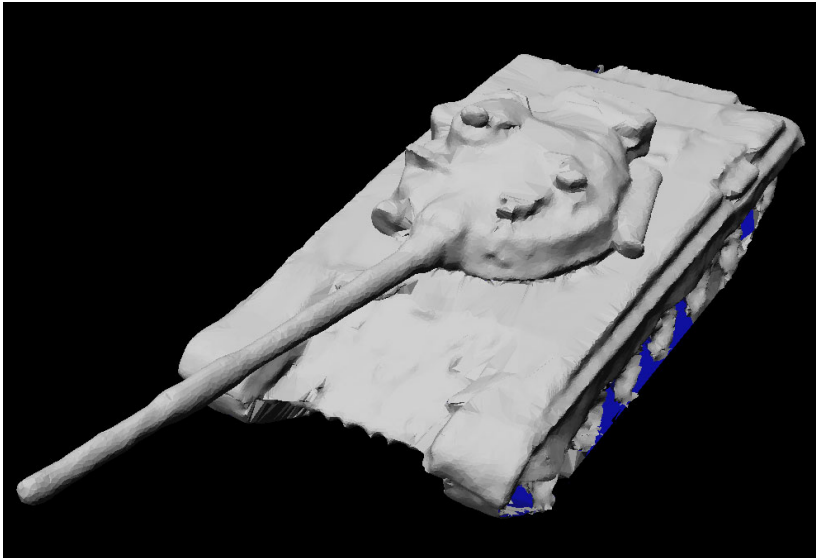
Figur 12. Inriktning av vyer görs genom att definiera minst tre gemensamma punkter inom givna toleranser.

IMMerge - Denna programmodul beräknar en modell som kan byggas upp som en polygonmodell, men det går också bra att generera punktmoln såväl binärt som på ASCII-format. figur 13 visar en T72:a skannad med enbart 8 vyer horisontellt, vilket gör att det är mycket glest med punkter på ovensidan.



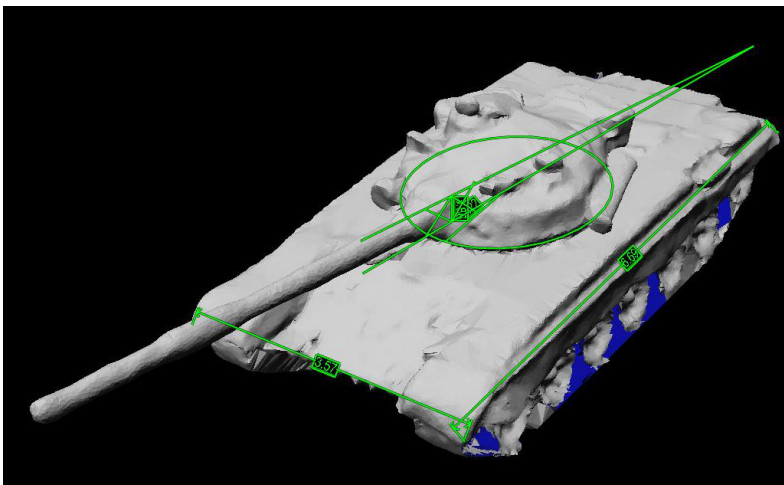
Figur 13. Polygonmodell av en T72:a (resultat från IMMerge).

IMEdit - Modellen som skapas av IMMerge kan här redigeras. Hål kan fyllas igen och trianguleras upp, se figur 14. Ytor kan byggas upp av såväl plana, sfäriska som cylindriska ytelement.



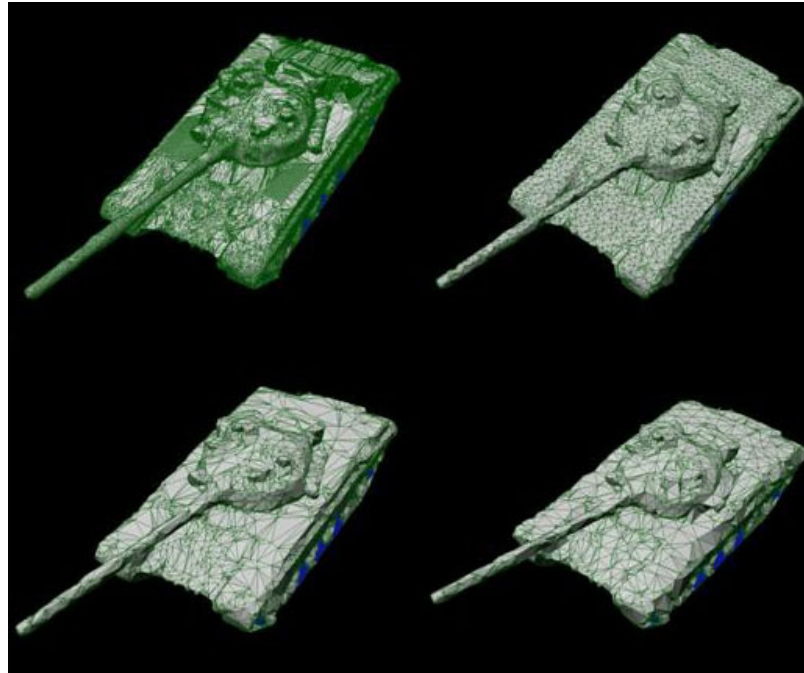
Figur 14. En redigerad modell av en T72:a. (För att kunna bygga upp en bra modell av banden hade tätare mätpunkter och flera vyer krävts).

IMInspect - Denna programmodul kan mäta modellen i olika avseenden, till exempel avstånd mellan punkter, radier och vinklar. Direkta jämförelser mellan en CAD-modell och uppmätt modell kan också göras. figur 15 visar en måttsatt modell av T72.



Figur 15. Måttsatt modell av T72. (Uppmätt längd*bredd är 6,69*3,57 m, kanontornets radie är 1,22 m, samt kanonens elevationsvinkel är 3,68° i detta specifika fall).

IMcompress – Här kan modellen komprimeras med avseende på antalet ytor eller i procent av ursprungsmodellen. I figur 16 visas modellen av T72 okomprimerad med cirka 140 000 ytor, komprimerad till cirka 14000, 10000 respektive 8400 ytor.



Figur 16. Bilden visar olika komprimeringsgrader av T72. Längst upp till vänster är modellen okomprimerad och består av ca 140 000 triangelytor, längst upp till höger ca 14000 ytor och en maxsida på 0,2 m för varje triangel, längst ner till vänster ca 10000 ytor utan storleksbegränsning samt längst ner till höger 8400 ytor med en sida på max 0,5 m.

Modell i DXF-format kan sedan köras i ett program kallat dxf2patches, utvecklat vid FOI lasersystem, vilket omvandlar CAD-formatet DXF till av MatLab läsbara patches. Den geometriska modellen är sedan klar att utnyttjas i MatLab eller andra program som kan läsa DXF eller patches. En komprimering till ca 14000 ytor är optimal att använda i Matlab. Fler ytor än så gör det beräkningsmässigt tungt att köra och färre ytor gör modellen för grov.

2.3.3 Generering av intensitetsbilder och polärdiagram

Textfilen (RAW) innehållande x-, y-, z-koordinat samt intensitet läses tillsammans med loggfilen in i LabVIEW-programmet ScanView, vilket är utvecklat vid FOI Lasersystem. Programmet utvärderar mätningar från ILRIS 3-D och genererar intensitetsbilder från RAW-filerna skalade med ekvivalent reflektionskoefficient. I bilderna görs val av område för mätning. Beräkningar (t.ex. reflektion, lasermålarea) utförs dock direkt i RAW-filen med genererade bitmap-bilder som gränssnitt.

Det råder inte ett linjärt förhållande mellan den intensitet som presenteras i RAW-filen från ILRIS 3-D och målytans faktiska reflektionskoefficient. Genom att registrera en referenstavla med fyra kända reflektanser i samma bild som mätobjektet, se figur 17, kan varje bild kalibreras. Detta beskrivs i texten nedan.



Figur 17. Kalibreringstavla med fyra kända reflektanser samt bandvagn som objekt (från Ålvdalen oktober 2002).

Ett förhållande mellan intensiteten S och dess reflektans ρ har definierats för respektive referensyta enligt:

$S_{ref_0} / \rho_{ref_0}(\text{referensplatta}_0)$	99 % reflektans
$S_{ref_1} / \rho_{ref_1}(\text{referensplatta}_1)$	60 % reflektans
$S_{ref_2} / \rho_{ref_2}(\text{referensplatta}_2)$	30 % reflektans
$S_{ref_3} / \rho_{ref_3}(\text{referensplatta}_3)$	2 % reflektans

Tre nivåer för intensiteten räknas fram vid kalibreringen av bilden, kallade LimHi (Nivå Hög), LimMi (Nivå mellan) samt LimLo (Nivå låg) enligt Ekv. 2-1, 2-2 och 2-3 nedan. Dessa nivåer är en gräns i intensitetsvärde för var de olika reflektansvärdena ska börja gälla.

$$LimHi = S_{ref_0} - \frac{S_{ref_0} - S_{ref_1}}{2} \quad \text{Ekv. 2-1}$$

$$LimMi = S_{ref_1} - \frac{S_{ref_1} - S_{ref_2}}{2} \quad \text{Ekv. 2-2}$$

$$LimLo = S_{ref_2} - \frac{S_{ref_2} - S_{ref_3}}{2} \quad \text{Ekv. 2-3}$$

Fysikaliskt gäller att energin hos en foton avtar med avståndet R som $1/R^2$. För att kunna mäta över ett längre avstånd och vinna dynamik på intensitetsvärdet har Optech valt att presentera en skalad intensitet S enligt

$$S \sim \frac{\rho}{R^{upph[x]}} \quad \text{Ekv. 2-4}$$

där $upph[x]$ är respektive materials exponent. Detta gäller givetvis både målet (tar) och referensen (ref). Respektive materials exponent skiljer sig på olika avstånd. Exponenten är kurvans lutning mellan ett avstånd från referenstavlans till det laserstrålen träffar. Exponenten beräknas därför i exempelvis Excel för att sedan lyftas in i ScanView som fyra

variabler. Genom att sätta ihop proportionalitetsuttrycket (4) för både referens och mål erhålls:

$$\rho_{tar} = \rho_{ref[x]} \cdot \frac{R_{tar}^{upph[x]}}{R_{ref}^{upph[x]}} \cdot \frac{S_{tar}}{S_{ref[x]}} \quad \text{Ekv. 2-5}$$

där x beskriver de tidigare nämnda intensitetsområdena för LimHi (1), LimMi(2) och LimLo (3). Intensitetsområdet större än LimHi, refererar till index 0 (99%), värden mellan LimHi och LimMi refererar till index 1 (60%), värden mellan LimMi och LimLo refererar till index 2 (30%) samt värden under LimLo refererar till index 3 (2%).

Beroende på önskad vinkelupplösning kan vinkelförflyttningen $\alpha_{spot\ space}$ mellan varje mätpunkt (strålfläcksavståndet; "spot space") väljas i 10 steg, se tabell 1.

Tabell 1. Vinkelförflyttning för olika strålfläcksavstånd

Spot space	Förflyttning [rad]
	$A_{spot\ space}$
1	0,00017
2	0,00034
3	0,00051
4	0,00068
5	0,00085
6	0,00102
7	0,00119
8	0,00136
9	0,00153
10	0,00170

Varje laserpuls motsvarar en yta på mätobjektet, $A_{spot\ space}$, enligt

$$A_{spot\ space} = (\tan \alpha_{spot\ space} R)^2 \text{ [m}^2\text{]} \quad \text{Ekv. 2-6}$$

Den totala lasermålarean A_{Δ} beräknas sedan med formeln

$$A_{\Delta} = \frac{\rho_m \cdot \sum A_{spot\ space}}{\pi} \text{ [m}^2\text{/sr]} \quad \text{Ekv. 2-7}$$

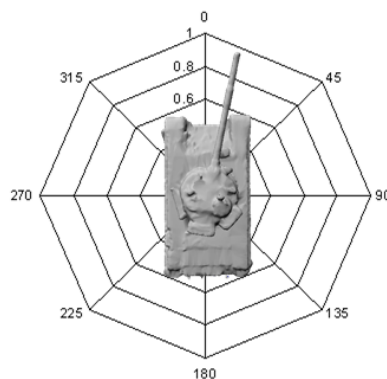
där ρ_m är medelvärdet av alla punkters reflektansvärden beräknade enligt Ekv. 2-5 och $\sum A_{spot\ space}$ summan av alla areor beräknade enligt Ekv. 2-6.

Programmet ScanView ger som utdata skalade intensitetsbilder i ekvivalent reflektationskoefficient. Ett exempel på en intensitetsbild genererad av ScanView visas i figur 18.



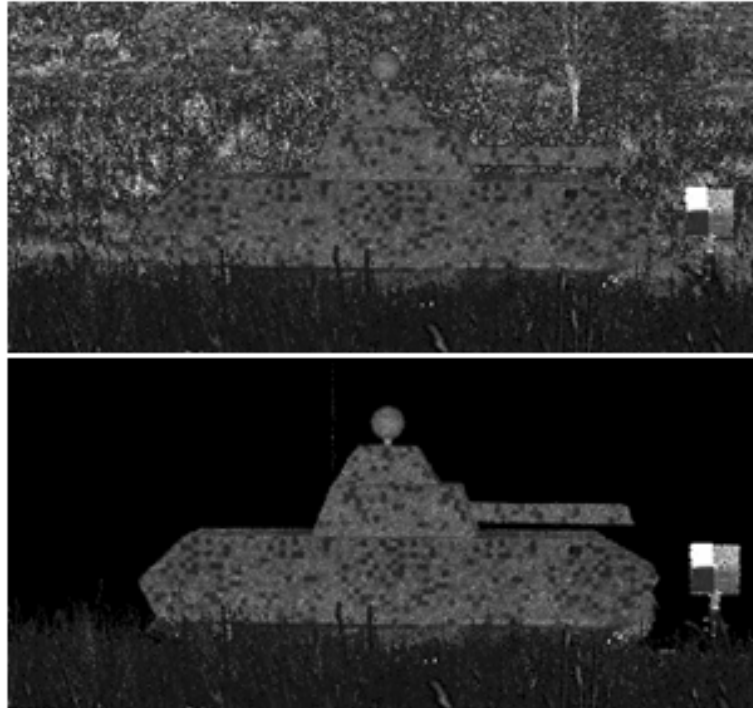
Figur 18. Intensitetsbild på T72 skalad med ekvivalent reflektionskoefficient.

För att enbart få med det intressanta vid beräkningen av total lasermålarea, det vill säga objektet, maskas bilden först i ett fotoredigeringsprogram exempelvis Photoshop. Masken talar om vilka punkter som ska tas med från RAW-filen (de riktiga mätpunkterna); övriga punkter tas bort i den fortsatta behandlingen. Vid sammanslagningen av intensitetsbild och mask beräknas total lasermålarea, medelreflektans, tvärsnittsarea m.m. Dessa uppgifter sparas i en loggfil vars uppgifter sedan kan lyftas in i Excel eller Matlab för att exempelvis presenteras i en polärplott. Värdena för total lasermålarea redovisas i enheten m^2/sr . Objektets orientering vid utvärdering av data brukar läggas så att objektets front står i läge 0° , se figur 19.



Figur 19. Objektets orientering vid utvärdering av uppmätta data.

Ibland kan det vara svårt att urskilja ett objekt i en bild. Möjligheten finns då att göra en avståndsdiskriminering, d.v.s. skala bort mätpunkter som ligger framför och bakom mätobjektet, se figur 20.



Figur 20. Avståndsdiskriminerad bild av TD2.

2.4 Radar

Arbetet har inom detta område inriktats mot att implementera en algoritm som beräknar olika särdragsparametrar. För att kunna identifiera och klassificera olika stridsfordon krävs information om fordonens karaktäristiska radarsignaturer från vilka olika särdrag kan beräknas. För att få radardata att utvärdera algoritmen på har beräkningar gjorts med datorprogrammet FOPOL på sex stycken högupplösta CAD-modeller av olika stridsfordon. Data är simulerat för en målsökare på 94 GHz som flyger mot målet på 300 meters höjd och data är insamlat på 17 olika avstånd till målet, från 8 km till 500 meter, där målet är observerat i alla aspektvinklar i steg om 5° hela varvet runt.

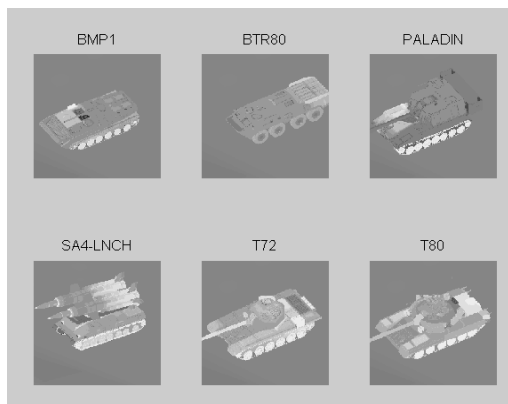
FOPOL bygger på fysikalisk optik som är en approximativ metod för att beräkna det spridda fältet, och därmed radarmålytan, vid spridning av en högfrekvent planvåg. Algoritmen som har implementerats i MATLAB beräknar några polarimetriska särdragsparametrar från det fältdata som beräknats med FOPOL. Dessa särdrag ska ligga till grund för klassificeringen.

Målmodeller

Modeller av 6 olika markmål har använts för datagenereringen. Modellerna utgörs av pansarskyttefordon, robotbärare och stridsvagnar i standardläge (kroppen i horisontalläge, kanonen rakt fram, etc.), se Tabell 1. Målen är kommersiellt inköpta CAD-modeller med mycket fin upplösning. Motsvarande objekt finns även tillgängliga med IR-textur för IR-simuleringar, se Figur 21.

Objekt	Beskrivning
bmp1-apc	Pansarskyttefordon
btr80-apc	Pansarskyttefordon
M109a6-paladin	Kanonvagn
Sa4-linch	Robotutskjutningsvagn
T72-tank	Stridsvagn
T80uk-tank	Stridsvagn

Tabell 2. Målmodeller



Figur 21. IR-modeller av de högupplösta målmodellerna.

2.4.1 Simuleringar

För att kunna känna igen markmål krävs information om fordonens karaktäristiska signaturer. Data har därför beräknats för att simulera en multisensormålsökare som flyger på 300 m höjd mot de 6 olika stridsfordonen. Radarsignaturer har samlats in på 17 olika avstånd fram till målet, från 8 km till 500 m, där målet är observerat i alla aspektvinklar i steg om 5° hela varvet runt, enligt Tabell 3.

Detta har utförts genom att beräkna radarsignaturer från alla 6 objekt med programmet FOPOL. Sedan kan avståndsprofilerna beräknas vilka får en upplösning av 1 dm i 4 polarisationer. Resultaten sparas sedan i en databas bestående av träningsdata samt ett antal testdata.

Radarsignaturer har beräknats för frekvenserna 94 GHz (mm-vågsbandet) och på 16 GHz (Ku-bandet) i samarbete med Multisensormålsökardemonstrationsprojektet, som även beräknat IR-signaturer (8-9 µm) med SensorVision.

Tabell 3. Parametervärden för simulerade anflygningar mot målet.

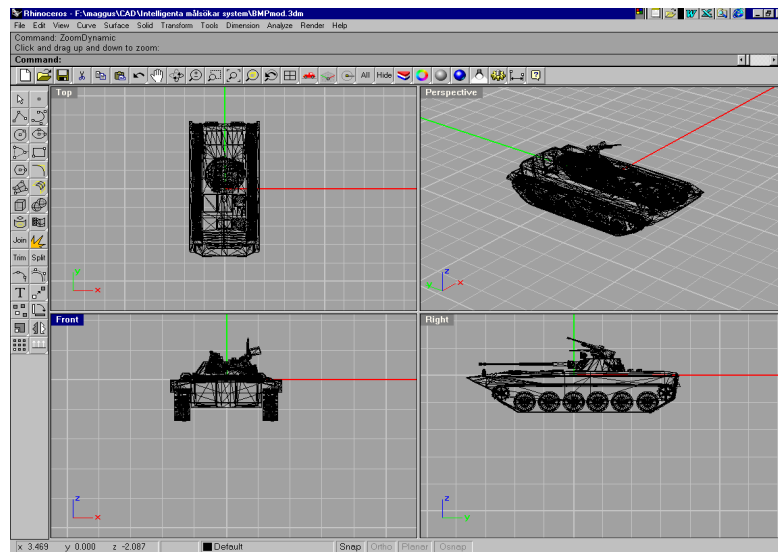
Parameter	Biblioteksdata	Testdata
Antal målmodeller	6	6
Flyghöjd över mark (m)	300	300
Avstånd sensor – mål	8000, 6700, 5700, 4800, 4000, 3400, 2800, 2400, 2000, 1700, 1400, 1200, 1000, 800, 700, 600, 500	7350, 6200, 5250, 4400, 3700, 3100, 2600, 2200, 1850, 1550, 1300, 1100, 900, 750, 650, 550, 450
Aspektvinklar (°)	0–355° i 72 steg om 5°	2–332° i 12 steg om 30°

2.4.2 Genereringen av radardata

Här följer en beskrivning av hur radarberäkningarna utförts på modellerna, vilka beräkningsprogram som har använts, en kort beskrivning av dessa och vilka brister de har. Avsnittet kommer också att innehålla ett kort stycke om den elektromagnetiska spridningsteori som ligger till grund för beräkningarna. En robusthetsstudie för att fastställa vissa beräkningsparametrar har också gjorts.

Rhinoceros CAD-program

För att visualisera, modellera och anpassa CAD-modellerna som är utgångspunkten för beräkningarna har CAD-programmet Rhinoceros använts. En skärmdump av användargränssnittet i Rhinoceros illustreras i figur 22.



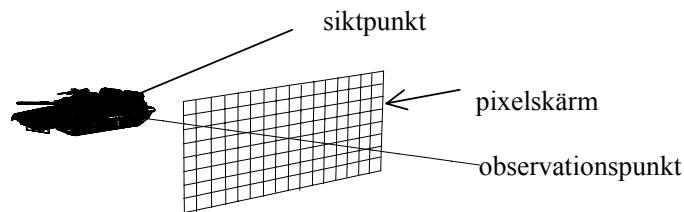
Figur 22. Visar användargränssnittet för CAD-programmet Rhinoceros. CAD-modellen som syns i de fyra vyerna är en BMP-1.

FOPOL

Beräkningarna av de spridda fälten från fordonen görs med hjälp av FOPOL, en vidarutveckling som gjorts på FOI av det danska programmet POLEX som är ett RCS-beräkningsprogram med fasettbaserad fysikalisk optik. Med fasettbaserad fysikalisk optik menas att CAD-modellen måste approximeras med ett antal facetter (meshar) för vilka radarmålarean sedan beräknas.

Beräkningsgången i FOPOL beskrivs knapphändigt i litteraturen, dock framgår från referenserna [2] och [3] att FOPOL:s beräkningsalgoritm kan delas in i 5 steg.

I första steget delas fasetterna i CAD-modellen upp i mindre trianglar. En projektorram som är vinkelrät mot en linje mellan en i objektet definierad siktpunkt och en observationspunkt (d.v.s. i vilken vinkel radarmålarean skall beräknas) definieras. Projektorramen delas sedan upp i ett antal rektanglar, s.k. pixlar, vilket illustreras i Figur 23.



Figur 23. Illustration av den s.k. pixelskärmen. Pixelskärmens läge bestäms vid en monostatisk beräkning av riktningen mellan sikt- och observationspunkt.

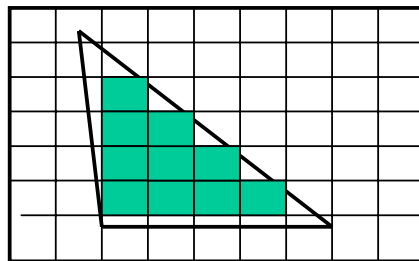
I steg två planprojiceras objektet ner på pixelskärmen. I steg tre bestäms vilken pixel som tillhör vilken fasett. Detta görs genom att testmönster på pixeln projiceras på fasetten, om 50 % av punkterna projiceras på fasetten tilldelas pixeln fasettens egenskaper, normalriktning och läge [3]. I steg fyra beräknas bidraget från vare pixel med fysikalisk optik och summeras koherent, vilket ger direktbidraget av radarmålarean. I steg fem beräknas multipelbidraget. Detta görs genom att programmet först geometriskt bestämmer vilka pixlar som kan interagera med vilka pixlar genom att beräkna skillnaden mellan pixlarnas normalriktningar. Det totala bidraget från andra pixlar bestäms sedan för varje pixel.

Denna procedur upprepas sedan fyra gånger och summeras slutligen till en multipelbidragsterm. Genom en summation av direkt- och multipelbidrag erhålls sedan det totala spridda fältet som returneras till användaren i två st ascii-filer. Eventuell illustrering av målarean tillhandahålls inte i FOPOL utan görs lämpligen i t.ex. MATLAB.

Begränsningar FOPOL

FOPOL:s algoritim för beräkning av radarmålarean med hjälp av en pixelskärm och hantering av multipelbidrag är ett enkelt sätt att lösa problemet med skuggning samtidigt som det är mycket effektivt ur beräkningssynpunkt. Algoritmen lämnar dock vissa begränsningar vilket man som användare bör känna till.

Att projicera objekt på en pixelskärm kräver ganska stort antal pixlar för att lösa upp objektet.



Figur 24. Illustration av en alltför dåligt upplöst triangel. De gröna rutorna utgör de pixlar som har 50 % eller mer av sin yta på fasetten.

Figur 24 visar ett alltför dåligt upplöst objekt. Fasettens projicerade utseende motsvarar inte alls dess verkliga utseende. Således kommer inte heller beräkningsresultatet överensstämja med vad vi skulle fått om en tillräckligt fin upplösning använts. Denna effekt avhjälps genom att antalet pixlar ökas. För att bestämma antalet pixlar som krävs för en beräkning bör således någon form av konvergensstudie göras för att se att beräkningsresultatet inte ändras då antalet pixlar ökas.

Sättet att med hjälp av ett punktmönster bestämma om en pixel tillhör en viss fasett medför också att fasetter med en allt för liten projektion på pixelskärmen riskerar att inte beaktas vid beräkning. Resultatet blir att fasetten inte kommer att tillhöra någon pixel. I direktbidraget torde detta inte spela någon större roll då målarean för en plan polygon är tämligen liten för vinklar långt från normalriktning. Detta gäller dock inte för multipelbidrag då betydande fel kan erhållas, om den första fasetten inte projiceras. Den kommer då aldrig att registreras i pixelskärmen och därvid sker således inte någon multipelspridning som kanske kunde ge ett betydande bidrag till radarmålarean.

Sättet att behandla multipelreflektion genom att jämföra normalriktningar mellan pixlar, för att på så sätt se vilka som belyser vilka, medför att komplicerade objekt där internskuggning sker inte beräknas på rätt sätt eftersom något i objektet kan blockera multipelstrålningen.

Det bör också nämnas att en bugg finns i FOPOL [4] som uppkommer då radarmålarean beräknas för en 80 graders hörnreflektor. Eventuellt kan tänkas att denna kan uppkomma för fler typer av radarmålareaberäkningar men troligen blir felet litet för objekt med ett stort antal små fasetter.

Fysikalisk optik

För att kunna göra beräkningar på elektromagnetiska spridningsproblem krävs, med några få undantag, att förenklingar av beräkningsproblemet görs. I denna rapport kommer en approximation som kallas fysikalisk optik kortfattat att presenteras. För en mer detaljerad beskrivning hänvisas den intresserade till exempelvis [13]. Fysikalisk optik-approximationen bygger på att ytströmmen $\bar{J}_s$ som generas på objektet då det belyses av en

elektromagnetisk våg kan skrivas i termer av det infallande H-fältet. $\bar{J}_s = 2\hat{n} \times \bar{H}_{in}$. Det

spridda fjärrfältet i $\hat{r}$ riktning fås av: $\bar{H}(\hat{r})_{ut} = -i \frac{k}{2\pi} \hat{r} \times \iint_{sbelyst} \hat{n}(r') \times \bar{H}_{in} e^{ik\hat{r} \cdot r'} ds'$ där

sbelyst utgör skugggränsen för den belysta delen av objektet. Skugggränsen beräknas med hjälp av strålgångsoptik. Vektorn $\hat{n}(r')$ är objektets ytnormal och k det infallande fältets vågtal.

Svagheter i fysikalisk optik

Sättet att skriva ytströmmen, $\bar{J}_s = 2\hat{n} \times \bar{H}_{in}$ förutsätter att objektets yta lokalt kan approximeras med ett oändligt tangentplan. Fysikalisk optik behandlar inte diffraktionsfenomen på rätt sätt vilket medför att fälten vid skugggränser, gränser mellan ytdiskontinuitet (exempelvis mellan olika fasetter) och fenomen som krypvågor inte beräknas på rätt sätt. I ett objekt med en noggrann fasettering där vinkelskillnaden mellan närliggande fasetter är liten torde felet bli av en relativt marginell betydelse då diffraktionskoefficienterna är små för trubbiga kanter.

Fysikalisk optik är inte heller reciprokt i bistatiska vinklar vilket medför att polarisationerna VH och HV inte är lika. Man måste givetvis vara medveten om dessa

begränsningar när man använder fysikalisk optik för att beräkna radarmålarean. Något enkelt sätt att uppskatta felet finns inte utan en felanalys krävs för varje enskilt beräkningsobjekt. Fysikalisk optik ger dock oftast bra resultat för direktbidrag hos radarmålarean.

Utfört arbete

Beräkningar av målets RCS har gjorts vid azimutvinklarna 0-355 grader i steg om 5 grader, d.v.s. 72 st (tabell 3). Vidare krävs det två separata beräkningar, en för varje polarisation, för att erhålla alla element i spridningsmatrisen.

Den totala beräkningsmängden blir därför $6 \text{ (antalet fordon)} \times 19 \text{ (antalet elevationsvinklar)} \times 2 \text{ (antalet polarisationer)} = 228$ beräkningar.

Radarfrekvensen 94 GHz och den specificerade avståndsupplösningen 1 dm ger bandbredden 1,5 GHz. Fordonens största dimensioner är längd 10,4 m (M 109), bredd 4 m (T80) och höjd 4 m (M 109). En upplösning på 1 dm och ett entydighetsavstånd i

avståndsprofilberäkningen på $\sqrt{10.4^2 + 4^2 + 4^2} < 12 \text{ m}$ kräver $\frac{12}{0.1} = 120$ frekvenser.

Bestämning av pixelskärmens storlek och antalet pixlar

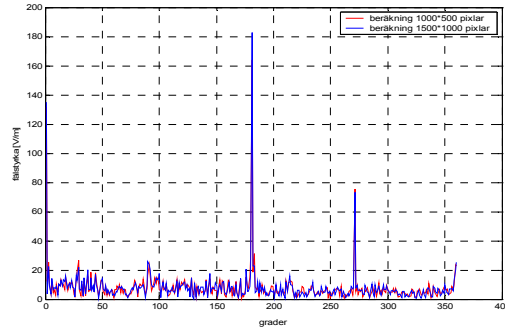
Med objekt och siktpunkt centrerade i origo krävs en bredd för pixelskärmen på minst

$\sqrt{10.4^2 + 16} \approx 11.2 \text{ m}$. För att ha betydande marginaler så väljs pixelskärmens bredd till 14 m vilket gott och väl täcker in alla beräkningsobjekt. Höjden på pixelskärmen ges av

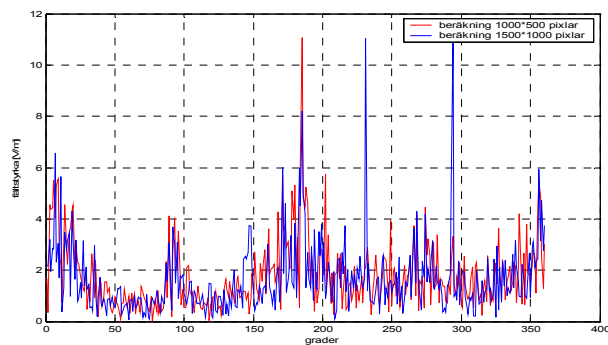
$\sqrt{10.4^2 + 32} \cdot \sin(41.41 + \arctan(4/11.2)) \approx 10.4 \text{ m}$. För att ha lite marginaler väljs höjden till 12 m.

Antalet pixlar i pixelskärmen måste bestämmas, vilket medför att en konvergenstudie behöver göras för objekten. Eftersom T-80 stridsvagnen innehåller flest antal små fasetter medför detta att det krävs flest antal pixlar av alla CAD-modeller för att lösa upp objektet. Det är därför troligt att om man får konvergens för T-80 så konvergerar data även för de andra objekten. För att spara beräkningstid har därför konvergensberäkningen bara gjorts för T-80 stridsvagnen. Det totala antalet fasetter för T-80 efter reducering av CAD-modellen är 18600 st.

För att studera hur många pixlar som behövs görs två beräkningar med vertikalpolarisation för T-80. Genom att studera den lägsta elevationsvinkeln där de belysta banden innehåller de flesta små fasetterna, behandlas troligtvis det svåraste fallet. Får man konvergens för den här elevationsvinkeln är sannolikheten stor att beräkningarna även konvergerar för högre vinklar. Givetvis borde en konvergensstudie genomföras för alla objekt och alla vinklar, vilket kräver en betydande ökning av arbetsbördan. Därför görs endast 1 konvergensberäkning.



Figur 25. Illustration av fältstyrkan som funktion av azimuthvinkel då vertikal-polarisation sänds och vertikal- polarisation tas emot. Frekvensen är 15,25 GHz. Beräkningen är gjord med 1000*500 respektive 1500*1000 pixlar. Pixelskärmstorleken är 14*12 m.



Figur 26. Illustration av fältstyrkan som funktion av azimuthvinkel då vertikal-polarisation sänds och H- polarisation tas emot. Frekvensen är 15,25 GHz. Beräkningen är gjord med 1000*500 respektive 1500*1000 pixlar. Pixelskärmstorleken är 14*12 m.

Skillnaden mellan kurvorna i Figur 25 är liten. Det maximala värdet av fältstyrkan fås då stridsvagnen belyses från 0 och 180 grader, då hela breddsidan belyses av den infallande vågen. Den maximala avvikelsen sker vid azimuthvinkeln $\approx 270^\circ$ och är 10 V/m. För korspolarisationen i Figur 26 är skillnaderna relativt större. Detta beror på att fältstyrkans nivåer är betydligt lägre, varvid varje enskild fasett får en större betydelse, vilket medför att det blir svårare att få konvergens. Den maximala avvikelsen är även här ca 10 V/m och uppkommer vid azimuthvinkeln $\approx 290^\circ$. Någon uppenbar förklaring till detta kan inte ges utan kräver en noggrannare studie. Kurvornas typiska utseende stämmer dock bra överens och nivåerna är små jämfört med VV-polarisationen. Vi får på så sätt vara nöjda och anse att vi har konvergens för kurvorna i de bägge figurerna. För framtagning av avståndsprofiler spelar inte nivåskillnaden för en viss vinkel någon större roll utan vikten fästs vid det totala utseendet av kurvorna. Vidare sparas en faktor fyra i beräkningstid mellan de båda fallen. Antalet pixlar i pixelskärmen bestäms därför till 1000*500 st som ger en pixelstorlek på 1,4 respektive 2,8 cm. Som vi har sett i konvergensstudien är detta tillräckligt för att lösa upp våra beräkningsobjekt.

Beräkningar

Beräkningar har utförts på varje objekt av spridningsmatrisen. För att få ett så effektivt beräkningsförfarande som möjligt har ett batch-script skrivits i UNIX. För utvärdering av måligenkänningsalgoritmerna har även testdata beräknats. Det är viktigt att testfallen inte

sammanfaller med träningsdata eftersom klassificeringsalgoritmerna bygger på träningsdata. Testdata har beräknats för 17 elevationsvinklar listade i tabell 3. För varje elevationsvinkel beräknas azimutvinklarna i 30 graders steg från 2 till 332 grader. Övriga parametrar är desamma som för träningsdata.

2.4.3 Polarimetriska särdrag för måligenkänning

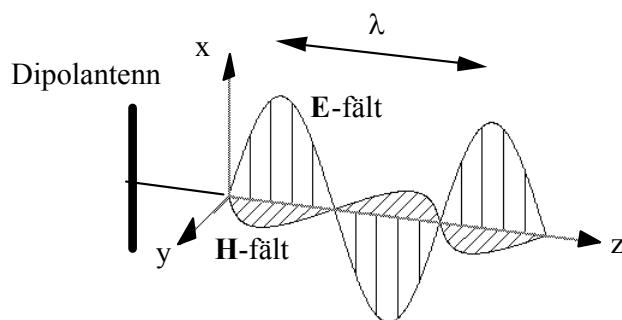
För att få en bra måligenkänning behövs väl valda radarsärdrag från målen som ska identifieras. En MATLAB algoritim har implementerats vilken beräknar några polarimetriska särdragsparametrar från fältdata som beräknats med FOPOL. MATLAB-programmet är i princip en översättning av ett PASCAL-program, som tidigare tagits fram i andra projekt [14].

För att få bästa resultat bör fältberäkningarna och måligenkänningsalgoritmerna baseras på fullständig vektoriell behandling av det elektromagnetiska fältet för att få med polarisationsegenskaper.

I detta avsnitt ges en översikt av polarisationsbegreppet, och av hur man beskriver ett målobjekts vektoriella (polarimetriska) spridning av en radarvåg, med hjälp av ett fåtal målkaraktäriserande parametrar. Arbetet utnyttjar tidigare publicerat material av [14],[22] och[23].

Polarisation¹

I ett isotropt och förlustfritt medium är en radarvåg transversell, med de elektriska (**E**) och magnetiska (**H**) fältstyrkorna vinkelräta mot varandra och mot utbredningsriktningen (figur 27). De båda fältstyrkorna är kopplade till varandra enligt Maxwells ekvationer. Begreppet polarisation brukar definitionsmässigt förknippas med **E**-fältet; vi bortser från **H**-fältet i den fortsatta behandlingen.



Figur 27. Ögonblicksbild av en sinusformad elektromagnetisk våg i vakuum, med de mot varandra vinkelräta elektriska (**E**) och magnetiska (**H**) fälten, som också är vinkelräta mot utbredningsriktningen (z-riktningen).

Fältstyrkevektorn i en fix punkt i rummet ligger i ett plan vinkelrätt mot utbredningsriktningen och en matematisk beskrivning kan lämpligen göras i ett ortogonalt $\hat{x}, \hat{y}$ -system, med riktningar enligt figur 27. Ett allmänt fälttillstånd representeras av två oberoende transversella fält, riktade längs $\hat{x}$ resp. $\hat{y}$. En specifik relation mellan amplituderna och faserna hos de två oberoende transversella fälten kallas ett polarisationstillstånd. Figur 27 visar det enklaste fallet, linjär polarisation, där fältstyrkans

¹ En utmärkt, allmän referens som beskriver vågpolarisation är [13].

spets som funktion av tiden om den observeras i en fix punkt i rummet rör sig längs en (vertikal) linje; den kan vara alstrad av en linjär antenn (dipol).

Polarisationsellipsen

För att behandla ett allmänt polarisationstillstånd utgår vi från två plana, monokromatiska vågor som utbreder sig längs z-axeln. De antas

linjärpolariserade i x- resp. y-riktningen. Den resulterande fältstyrkan $\mathbf{E} = E_x \hat{x} + E_y \hat{y}$, där

$$E_x(z, t) = a_x \cos(\omega t - kz + \alpha_x) \quad \text{Ekv. 2-8}$$

$$E_y(z, t) = a_y \cos(\omega t - kz + \alpha_y) \quad \text{Ekv. 2-9}$$

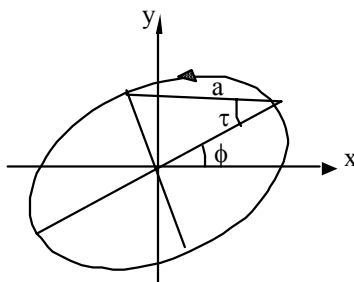
där vågtalet $k = 2\pi/\lambda$. Vektorn $\mathbf{E}$ beskriver vågens polarisation, och även en antennis polarisation (= polarisationen hos utsänd våg). För ett visst z kan man entydigt beskriva polarisationen med den (i tiden konstanta) komplexa vektorn (Jones' vektor)

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_x e^{i\alpha_x} \\ a_y e^{i\alpha_y} \end{pmatrix} \quad \text{Ekv. 2-10}$$

Om man eliminerar tiden i (2-8) och (2-9) fås för $z=0$

$$\frac{E_x^2}{a_x^2} + \frac{E_y^2}{a_y^2} - \frac{2E_x E_y}{a_x a_y} \cos(\alpha) = \sin^2(\alpha) \quad \text{Ekv. 2-11}$$

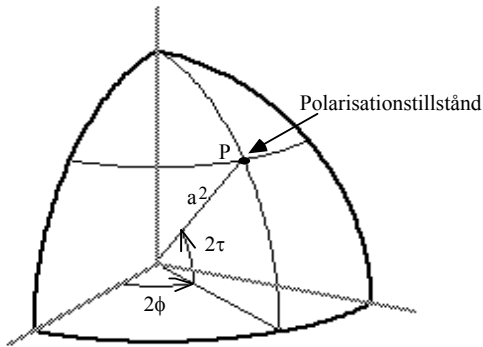
där $\alpha = \alpha_x - \alpha_y$. Ekv. (2-11) är ekvationen för en ellips, polarisationsellipsen. Den kan beskrivas parametriskt med tre parametrar som utgör mått på ellipsens storlek, lutning och excentricitet. Vågen sägs vara elliptiskt polariserad. Linjära och cirkulära polarisation utgör speciellfall av elliptisk polarisation.



Figur 28. Storheterna ϕ, τ, a kan användas för att beskriva ellipsens orientering, form och storlek. Linjär polarisation: $\tau = 0^\circ$. Cirkulär polarisation: $|\tau| = 45^\circ$. (Genom att ge τ ett tecken kan man skilja mellan höger cirk.: $\tau = -45^\circ$, och vänster cirk.: $\tau = +45^\circ$. Rotationsriktningar hos fältstyrkans spets i högerfallet är som man drar åt en högergängad skruv sett i utbredningsriktningen, samt tvärtom för vänsterfallet, enligt IEEE:s definition).

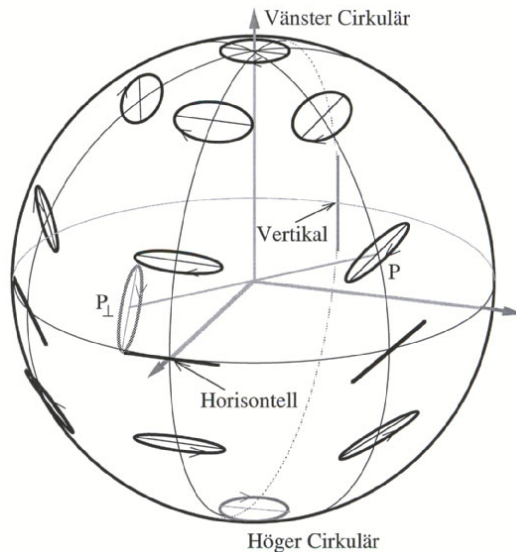
Poincarés sfär

Polarisationstillståndet hos en elliptiskt polariserad våg kan alternativt representeras genom att man avsätter vinklarna 2ϕ och 2τ som longitud resp. latitud på en sfär (Poincarés sfär). Radien väljs lika med a^2 .



Figur 29. Poincaré-sfär, varav en oktant är utritad. För en elliptisk polariserad våg med parametrarna a , ϕ , τ avsätter man vinklarna 2ϕ och 2τ som longitud resp. latitud på en sfär med radien a^2 och låter punkten P på sfären representera vågens polarisationstillstånd.

I figur 30 är polarisationsellipserna utritade för ett antal polarisationstillstånd på Poincaré-sfären. Två tillstånd som ligger diametralt motsatta är ortogonala, vilket innebär att motsvarande polarisationsellipser har samma form, men ortogonala huvudaxlar och motsatta rotationsriktningar. En antenn som ger en viss polarisation ut vid sändning är ”blind” för den ortogonala polarisationen vid mottagning.



Figur 30. Polarisationsellipserna för ett antal polarisationstillstånd på Poincaré-sfären.

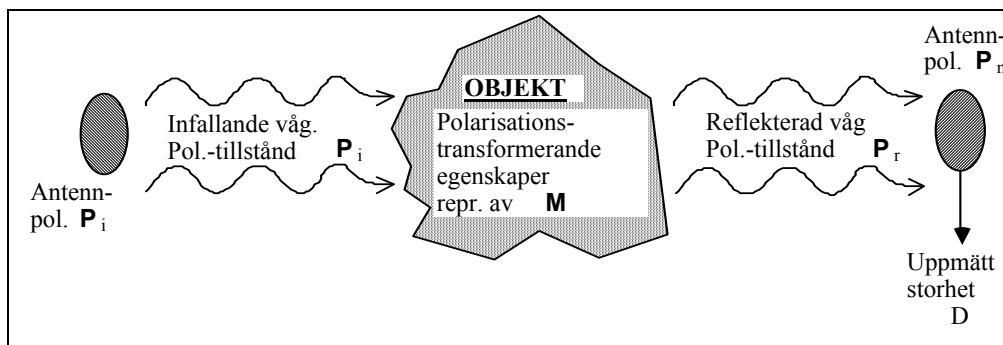
Polarisationstransformation

Om en radarvåg träffar ett objekt, sprids den, varvid den spridda vågens polarisation i allmänhet skiljer sig från den infallande. Vi kommer hela tiden att anta att geometrin mellan radar och mål inte ändras, alltså ett statiskt scenario.

För en översiktlig matematisk beskrivning inför vi beteckningar enligt figur 31.

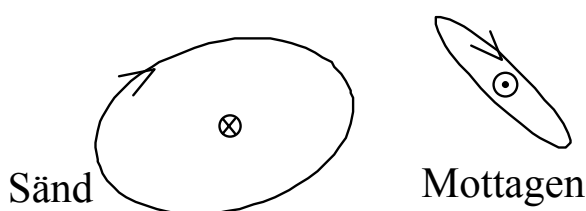
En plan våg med vinkelfrekvens ω faller in mot ett objekt. Vågen har i det allmänna fallet ett elliptiskt polarisationstillstånd som kan representeras av $\mathbf{P}_i$. Målobjektets transformation kan skrivas som $\mathbf{MP}_i$ d.v.s operatören $\mathbf{M}$ opererar på $\mathbf{P}_i$. Den reflekterade vågens polarisationstillstånd ges alltså av operatorekvationen

$$\mathbf{P}_r = \mathbf{MP}_i \quad \text{Ekv. 2-12}$$



Figur 31. Schematiskt spridningsförlopp, då ett radarmål träffas av en infallande våg

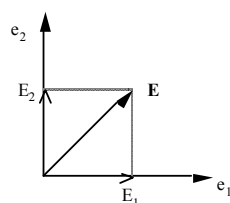
Transformationen uttryckt med polarisationsellipsen visas i figur 32. Polarisationsellipsen i ett generellt, monostatiskt spridningsfall kan transformeras till form, storlek, orientering och rotationsriktning.



Figur 32. Polarisationsellipsens form, orientering, storlek och rotationsriktning transformeras i ett allmänt monostatiskt spridningsfall (utbredningsriktningen är vinkelrät mot papperet).

2.4.4 Karakteristiska polarisationer och deras parameterisering

Allmän teori



Figur 33. En komplex polarisationsvektor $\mathbf{E}$ i ett polarisationsbassystem med komplexa basvektorer $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2$.

Sambandet mellan reflekterade och infallande fältstyrkans komponenter är

$$\begin{aligned} E_1^r &= S_{11}E_1^i + S_{12}E_2^i, \\ E_2^r &= S_{21}E_1^i + S_{22}E_2^i, \end{aligned} \quad \text{Ekv. 2-13}$$

eller $\mathbf{E}^r = \mathbf{S}\mathbf{E}^i$. Fasrelationer beskrivs med komplexa komponenter hos matriser och vektorer. Matrisen

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \quad \text{Ekv. 2-14}$$

kallas objektets **polarisationsmatris**. De fyra komplexa talen $S_{11}, S_{12}, S_{21}, S_{22}$ beskriver spridningen. Ofta används ett horisontal/vertikal-system, med reella polarisationsbasvektorer e_H, e_V . Matriselementen betecknas då $S_{HH}, S_{HV}, S_{VH}, S_{VV}$. Spridningsmatriselementen skulle kunna användas som särdrag vid måligenkänning, men det finns lämpligare val enligt följande.

Frågeställning rörande polarisationsmatrisen S

S beror på valet av koordinatsystemet, som beskrivs av basvektorerna e_1, e_2 . Känner man S för ett val av basvektorer e_1, e_2 kan man beräkna S' i ett godtyckligt annat koordinatsystem e_1', e_2' , utgående från relationen mellan basvektorerna,

$$\begin{pmatrix} e_1' \\ e_2' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{11} & U_{12} \\ U_{21} & U_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \end{pmatrix} = \mathbf{U} \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \end{pmatrix} \quad \text{Ekv. 2-15}$$

där matrisen $\mathbf{U}$ kan vara komplex, vilket ger komplexa e_1', e_2' (elliptisk polarisation). Man får

$$\mathbf{S} = \mathbf{U} \tilde{\mathbf{S}} \quad \text{Ekv. 2-16}$$

Finns det något basvektorsystem e_1, e_2 där S har en speciellt enkel form, t.ex. diagonalform, d.v.s. $S_{12} = S_{21} = 0$?

Frågeställning rörande sändpolarisationen

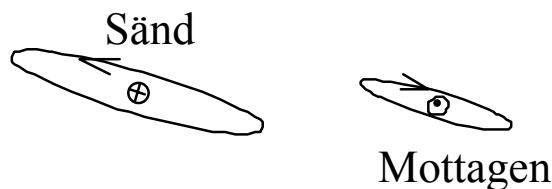
Finns det någon sändpolarisation $\mathbf{E}^i$ som mer naturligt ansluter sig till målets interna egenskaper, t.ex. dess symmetrier, än horisontell, vertikal, höger eller vänster cirkulär polarisation?

Frågeställningarna I och II hänger ihop, och har ett gemensamt svar:

Det finns två polarisationsvektorer, som diagonaliserar S . De är lösningar till "pseudo"-egenvärdesproblemet (eller con-egenvärdesproblemet)

$$\mathbf{S} \mathbf{E}^i = \lambda \mathbf{E}^{i*} \quad \text{Ekv. 2-17}$$

där λ är ett (komplext) egenvärde. Den ena egenvektorn $\mathbf{m}$ är den maximala polarisationen. Om en antenn sänder ut denna, ger radarreturen från målet maximal mottagen spänning i det monostatiska fallet, där samma antenn används för mottagning. Polarisationen ansluter sig optimalt till målets radaregenskaper. Den andra egenvektorn $\mathbf{m}_\perp$ är ortogonal mot $\mathbf{m}$ och ger ett extremvärde hos mottagen spänning.



Figur 34. Varje radarmål har en maximal polarisation: om en radar belyser målet med denna, sker ingen transformation av polarisationsellipsens form, orientering eller rotationsriktning vid spridningen i målet. I ett monostatiskt fall fås maximal signal i mottagaren (polarisationsanpassning).

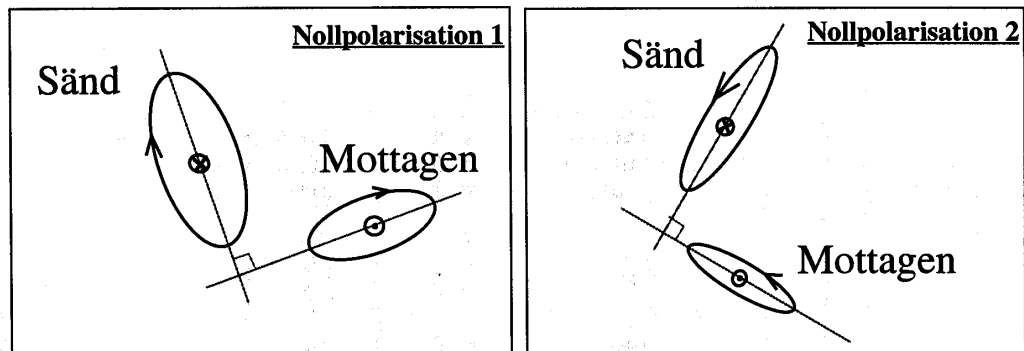
Egenvektorerne $\mathbf{m}$ och $\mathbf{m}_\perp$ ger den transformation $\mathbf{U}=(\mathbf{m}, \mathbf{m}_\perp)$ som diagonaliserar spridningsmatrisen $\mathbf{S}$ enligt (2-16). Eigenvärdena λ_1, λ_2 erhålles som diagonalelementen i den diagonaliserade matrisen $\mathbf{S}_d$:

$$\mathbf{S}_d = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{pmatrix} \quad \text{Ekv. 2-18}$$

Frågeställning rörande sändpolarisationen.

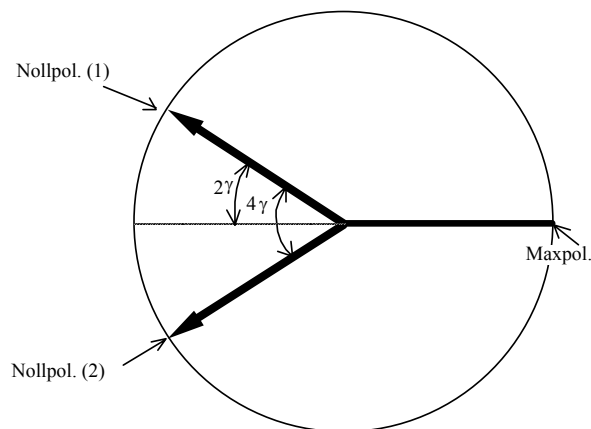
Finns det någon sändpolarisation $\mathbf{E}^i$ som ger nollspänning vid mottagning (med lika sänd- och mottagarpolarisation hos radarn)?

Svar: Det finns allmänt två sådana nollpolarisationer, $\mathbf{n}^+$ och $\mathbf{n}^-$.



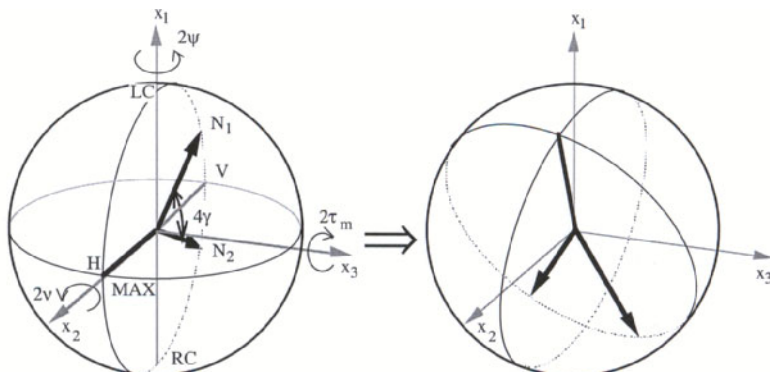
Ekv. 2-19. Varje radarmål har två nollpolarisationer, som transformeras till resp. ortogonala tillstånd av spridningen i målet, och därmed ger noll mottagarsignal i en monostatisk radar.

Man kan visa att polarisationstillstånden $p(\mathbf{m})$, $p(\mathbf{m}_\perp)$, $p(\mathbf{n}^+)$ och $p(\mathbf{n}^-)$, svarande mot sändpolarisationerna $\mathbf{m}$, $\mathbf{m}_\perp$, $\mathbf{n}^+$ och $\mathbf{n}^-$ ligger längs en och samma storcirkel på Poincarésfären. $p(\mathbf{m})$ och $p(\mathbf{m}_\perp)$ ligger diametralt, $p(\mathbf{n}^+)$ och $p(\mathbf{n}^-)$ symmetriskt kring diametern mellan $p(\mathbf{m})$ och $p(\mathbf{m}_\perp)$. Polarisationstillstånden $p(\mathbf{m})$, $p(\mathbf{n}^+)$ och $p(\mathbf{n}^-)$ bildar en polarisationsgaffel i Poincarésfären med maximala polarisationen som "handtag" och de båda nollpolarisationerna som "uddar".



Figur 35. Polarisationsgaffeln i Poincarésfären. De tre vektorerna ligger i samma plan.

Ett sammansatt måls polarisationsgaffel i Poincarésfären (högra figuren nedan) erhålles från ett utgångsläge (vänstra figuren) genom rotation av gaffeln med vinklarna 2ψ , $2\tau_m$ och 2ψ kring x_2 , x_3 resp. x_1 -axlarna i markerade riktningar.



Figur 36. Ett godtyckligt radarmåls polarisationsgaffel i Poincarésfären (högra figurdelen) erhålles från ett utgångsläge (vänstra figurdelen) genom rotation av gaffeln med vinklarna 2ψ , $2\tau_m$ och 2ψ kring x_2 , x_3 resp. x_1 -axlarna i markerade riktningar. Förkortningarna RC och LC står för "Right Circular" resp. "Left Circular", H och V för Horizontal resp. Vertical. Punkterna N_1 resp. N_2 svarar mot spetsarna hos de båda nollpolarisationsvektorer i figur 35.

Det finns ett samband mellan egenvärdena till (2-17) och vinklarna γ , ψ . Antag att vi numrerar egenvärdena så att $|\lambda_2| \leq |\lambda_1| \equiv m$. De två komplexa egenvärdena kan allmänt beskrivas med hjälp av fyra reella parametrar. Om beskrivningen väljs på följande sätt

$$\lambda_1 = m \cdot e^{i2(\psi + \xi)} \quad \text{Ekv. 2-20}$$

$$\lambda_2 = m \cdot \tan^2(\gamma) \cdot e^{-i2(\psi - \xi)} \quad \text{Ekv. 2-21}$$

kan man visa att storheterna γ , ψ är vinklarna med samma beteckningar i figur 36. Storheten ξ är en absolut fas, som i de flesta fall inte är av direkt intresse. Även vinklarna ψ och τ_m i figuren kan kopplas till lösningen av egenvärdesproblemet (2.5): De är lutningsvinkeln ϕ resp. ellipticitetsvinkeln τ för den maximala polarisationen $\mathbf{m}$. Man kan visa att

$$\mathbf{m} = \begin{pmatrix} \cos \psi & -\sin \psi \\ \sin \psi & \cos \psi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \tau_m \\ i \sin \tau_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \psi \cos \tau_m - i \sin \psi \sin \tau_m \\ \sin \psi \cos \tau_m + i \cos \psi \sin \tau_m \end{pmatrix} \quad \text{Ekv. 2-22}$$

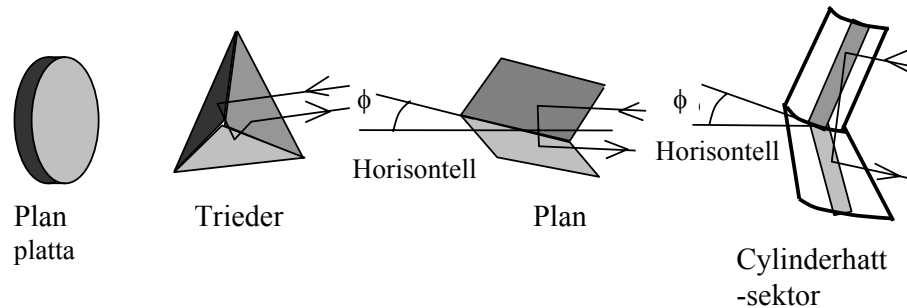
Man noterar att parametern m liksom spridningsmatrisen är given i fältstyrkemått.

Kvadraten på denna storhet, m^2 , är objektets maximala radarmålarea, då polarisationen är optimalt anpassad till objektet.

Enkla reflektorexempel

Vi skall tillämpa den allmänna teorin på några enkla reflektorer, som kan användas för kalibrering av en polarimetrisk radar (se t.ex. [24]). Figur 37 visar de fyra utvalda typerna: en plan platta, en hörnreflektor av triedertyp, en plan dieder, och en diederliknande reflektor som kan ses som utskuren från mantelytan hos en cylinderhatt, där den ena reflekterande ytan inte är plan utan utgör en del av en cylindrisk yta. Delstrukturer med dessa former är vanligt förekommande i aktuella målobjekt. Reflektorerna i figuren kan delas in i två klasser, "udda" resp. "jämn", beroende på sina polarimetriska egenskaper

(spridningsmatriser) vid korta våglängder. Termerna anspelar på antalet reflektioner som en infallande stråle genomgår i reflektorn vid sin avlänkning tillbaka mot radarn. Den plana plattan och triedern är av udda typ med en resp. tre reflektioner, medan diedern och hattsektorn är av jämn typ, med två reflektioner.



Figur 37. Fyra enkla reflektortyper. Vid korta våglängder har de två vänstra reflektorerna approximativt samma polarisationsegenskaper (samma spridningsmatris). De är av s.k. "udda" typ, d.v.s. den monostatiska radarreturen erhålles efter ett udda antal reflektioner (en resp. tre) av en infallande stråle. De två högra reflektorerna är av "jämn" typ, där den infallande strålen reflekteras två gånger i reflektorns deltytor. Hos cylinderhattsektorn är endast ett smalt band (skuggat) aktivt vid alstringen av den monostatiska radarreturen för en fix infallsvinkel hos infallande våg. Detta band bildar approximativt en dieder. Vinkeln ϕ är dieder-"sömmens" lutning mot horisontalriktningen.

Gaffelparametrarna $m, \gamma, \psi, \tau_m, v$ för reflektorerna framgår av tabell 4 (se t.ex. [22]). Den absoluta fasen ξ har inte medtagits eftersom den i stort sett är ett mått på avståndet till målet och ändras med detta.

Tabell 4. Polarisationsparametrar för de enkla reflektortyperna i figur 37.

Reflektor	m	γ	ψ	τ_m	v
Plan platta, trieder	$\sqrt{\sigma}^a$	45°	Godt.	0	0
Plan dieder, cylinderhatt-sektor	$\sqrt{\sigma}^a$	45°	$\phi + n 90^\circ$	Godt.	$\pm 45^\circ$

^a σ = radarmålarea

2.4.5 MATLAB-program för beräkning av särdragsparametrarna

Särdragsval

Som polarimetriska särdragsparametrar väljs de sex storheterna $m, \gamma, \psi, \tau_m, v, \xi$ ("gaffelparametrarna"). De innehåller samma information om spridningen

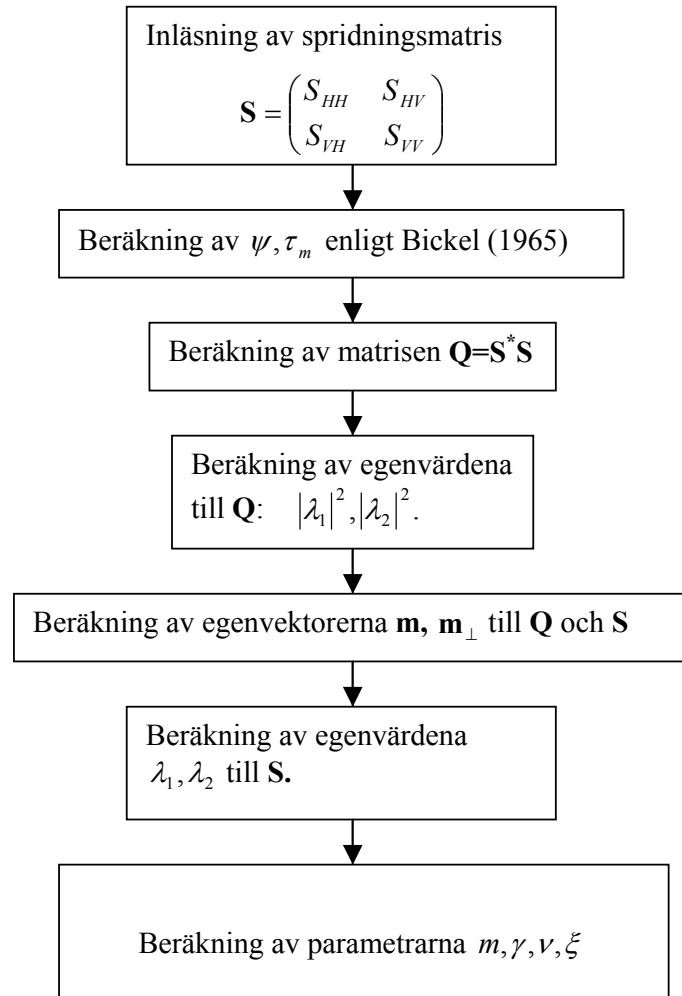
som de komplexa matriselementen $S_{11}, S_{12}, S_{21}, S_{22}$ men har en målrelaterad tolkning, som framgått av tidigare avsnitt. Särdragsvalet är inte det enda möjliga. Parametrarna har sin främsta användning vid icke-tidsvariabla mål med stor målarea ([25]). Vid fluktuerande målareor, speciellt då fluktuationerna har en stokastisk karaktär, är det lämpligare att använda effektbaserade i stället för fältstyrkebaserade parametrar, eftersom de förra är mer lämpade för t.ex. medelvärdesbildning. Att ändå gaffelparametrarna valts i detta arbete beror bl.a. på att de är besvärligast att beräkna; När man väl har bestämt dem, kan man ur dem relativt enkelt beräkna förekommande effektbaserade parametrar.

Beräkningsgång

För att kort sammanfatta beräkningsproblemet som beskrevs i avsnitt 2.4.5, består det av att ur en given spridningsmatris (2-14), som i vårt fall erhålles från programmet FOPOL, beräkna särdragsparametrarna genom att lösa con-egenvärdesproblemet (2-17) som ger egenvektorer och egenvärden. En metod att lösa con-egenvärdesproblemet är att gå via effektspridningsmatrisen $\mathbf{Q} \equiv \mathbf{S}^* \mathbf{S}$, och lösa det "normala" egenvärdesproblemet för denna matris. Man kan visa att $\mathbf{Q}$ har samma egenvektorer som $\mathbf{S}$, och dess egenvärden är reella och lika med kvadraten på beloppet av egenvärdena för $\mathbf{S}$, d.v.s. $|\lambda_1|^2, |\lambda_2|^2$.

Egenvektorererna $\mathbf{m}$ och $\mathbf{m}_\perp$ ger den transformation $\mathbf{U} = (\mathbf{m}, \mathbf{m}_\perp)$ som diagonaliserar spridningsmatrisen $\mathbf{S}$. Egenvärdena erhålles som diagonalelementen i den diagonaliserade matrisen, vilket ger storheterna m, γ, ν, ξ . Egenvektorererna ger de resterande två, ψ, τ_m . I programmet utnyttjas en beräkningsgång, som föreslogs i [26], och som finns beskriven i [14].

Utdata från den framtagna MATLAB-rutinen är de sex parametrarna $m, \psi, \tau_m, \gamma, \nu, \xi$. För en generell spridningsmatris sker beräkningarna utan svårighet; det som kan orsaka numeriska anomalier (division med noll etc.) är spridare av enkelt slag, som i figur 37, vilka kräver speciell uppmärksamhet (se [14]). Ett övergripande flödesschema för MATLAB-programmet visas i figur 38, där detaljer rörande hantering av numeriska anomalier inte finns medtaget.



Figur 38. Översiktligt flödesschema över MATLAB-program för beräkning av särdragsparametrarna.

Tillämpning på reflektormätdata

Det kan vara illustrativt att beräkna särdragsparametrarna med MATLAB-programmet från verkliga mätdata för enkla reflektorer. Vi tar därför som indata spridningsmatrisvärden enligt tabell 5 för fyra olika reflektorer från ett experiment med en FOI-radar vid 94 GHz ([24]). Data är kalibrerade och korrigerade för polarisationsdistorsion i systemets sändar- och mottagardelar.

Tabell 5. Uppmätta, kalibrerade spridningsmatriser för fyra reflektorer.

Reflektor	Nominell målära [m ²]	S_{HH}	S_{HV}	S_{VH}	S_{VV}
Plan platta	10	3,085+i1.261	-0,076-i0.026	0,400-i0.117	2,745-i1.122
Trieder	100	8,967-i0.071	-0,281-i0.148	-0,448-i0.237	8,834+i0.070
Plan dieder (lutn. 22,5°)	50	4,786-i0.746	4,597+i0.470	4,770-i0.381	-4,557-i0.710
Hatt (lutn. 45°)	50	-0,408+i0.029	7,439+i0.269	7,255-i0.263	0,099+i0.277

Resultatet av beräkningen framgår av tabell 6.

Tabell 6. Polarisationsparametrar för de uppmätta reflektorerna i tabell 5.

Reflektor	$m \times m$ [m ²]	γ [°]	ψ [°]	τ_m [°]	v [°]
Plan platta	11,5	42,8	19,5	7,7	8,1
Trieder	86,0	43,8	-39,8	0,3	0,6
Plan dieder ($\phi=22.5^\circ$)	45,9	44,4	$21,3+n \times 90^\circ$	-10,7	41,6
Cylinderhatt- sektor ($\phi=45^\circ$)	58,3	43,9	$44,7+n \times 90^\circ$	-13,0	-44,3

Som nämndes i avsnitt 2.4.6 kan reflektorerna indelas i två klasser, ”udda” och ”jämn”. Fysiskt olika reflektorer inom samma klass (t.ex. plan platta resp. trieder) har samma spridningsmatris, om man bortser från en skalningsfaktor som beror på reflektorns storlek (målära), och de kan inte särskiljas med avseende på polarimetriska egenskaper. Enbart de två klasserna kan särskiljas. Om vi bortser från diskriminering baserad på målära, ser vi av tabell 6 att parametrarna ψ resp. τ_m antar godtyckliga värden för den udda resp. jämna klassen och är inte användbara för deterministisk diskriminering; enbart parametern v är konsekvent särskiljande. Detta bekräftas av tabell 4: parametervärdena ligger vid 0° och vid $\pm 45^\circ$ för den udda resp. jämna klassen, och ger därmed en klar diskriminering mellan dem. För den jämna klassen noterar man, att när väl klassningen har gjorts, ger de beräknade ψ -värdena geometrisk information som kan vara betydelsefull, nämligen reflektorernas orientering (vinkeln ϕ i figur 37). Noggrannheten hos denna bestämning är hög (om man bortser från mångtydigheten på 90°); den är jämförbar med den man får vid uppmätning med ett vattenpass.

En jämförelse med de teoretiska värdena i tabell 4 ger en fingervisning om noggrannheten hos bestämningar för verkliga data av de olika parametrarna. Avvikelserna från de teoretiska värdena beror bl.a. på icke-ideala reflektorer (speciellt vinklar mellan delytorna), brusfluktuationer och andra mätosäkerheter, se [24].

Något om måligenkänningsfilosofin

Slutsatsen av föregående avsnitt är att enkla reflektorer kan klassificeras med hjälp av sina polarimetriska spridningsegenskaper. En radar med en fix polarisation kan inte göra den visade klassningen. Att ha demonstrerat denna möjlighet med verkliga data har en vidare vikt för igenkänning av mer komplexa objekt. Denna är tänkt att ske genom att man bildar en helhetsbild av målet genom sammansättning av ett antal igenkänningar av reflektorprimitiver av ovan demonstrerat slag. Om den grundläggande igenkänningen av de enskilda reflektorerna vore ogenomförbar i praktiken, skulle man knappast kunna hoppas på att lyckas med den överordnade uppgiften att känna igen hela målet (se också [14]).

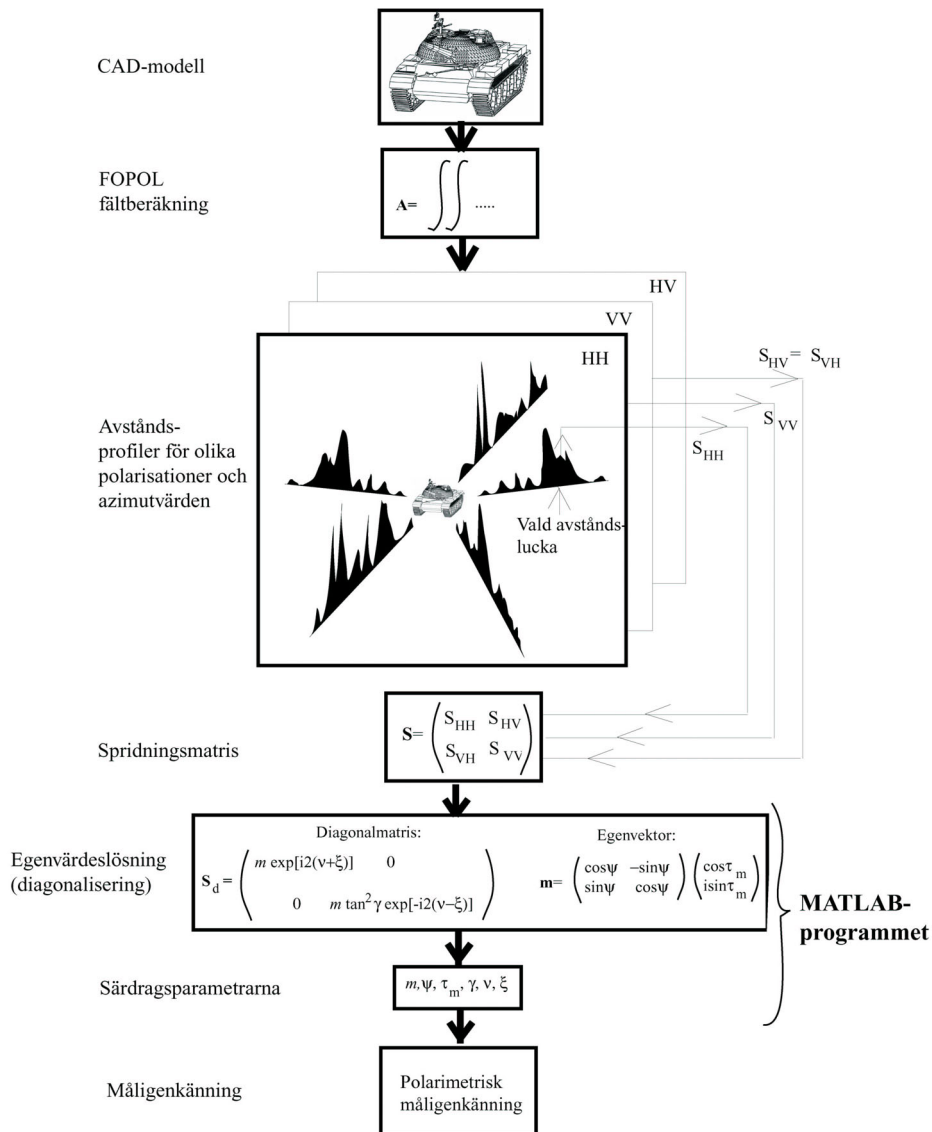
Det bör här också betonas att polarimetrisk måligenkänning inte är en fristående teknik, som ensamt löser identifieringsproblemet allmänt. Den måste kombineras med andra tekniker, t.ex. hög avståndsupplösning, där andra särdrag utnyttjas. Men man kan knappast avstå från att använda polarisationsinformationen; att känna igen ett mål är ett så komplext problem, speciellt i markmålsfallet, att man inte kan hoppas på att lyckas, om man avstår från att använda polarisationsinformationen, som har sin ursprung i en grundläggande fysikalisk egenskap hos radarvågor, nämligen vektorkaraktären.

Sammanfattande översikt: från CAD-modell till särdrag

Figur 39 ger ett schema över den totala beräkningskedjan för måligenkänningen, utgående från CAD-modellen för ett mål, via FOPOL-beräkningen av spridningsmatrisen (=fältstyrkan hos den mottagna radarreturen i olika polarisationskombinationer av sänd/mottagning), till bestämningen av särdragsparametrarna.

Figur 39. (nästa sida) Beräkningskedja för polarimetrisk måligenkänning. Från en CAD-modell av ett mål beräknas fältstyrkan hos den monostatiska radarreturen för de fyra olika kombinationerna sänd/mottagen polarisation med programmet FOPOL, som förutsätter att radarn befinner sig i objektets fjärrfält. Beräkningen görs för ett antal frekvenser över en total bandbredd B . Man erhåller ett frekvensspektrum, vars inversa fouriertransform ger radarreturen (fältet) som funktion av tiden, eller ekvivalent, som funktion av avståndet, en s.k. avståndsprofil av målet i den valda aspekten. Avståndsupplösningen i profilen är $c/(2B)$, vilket är djupet hos en s.k. avståndslucka. Beräkningen görs för ett antal azimuth-värden varvet runt, med konstant elevation hos radarn relativt målet.

Det utvecklade MATLAB-programmets del i kedjan finns markerad. Programmet tar för varje azimuth den framräknade avståndsprofilen, d.v.s. spridningsmatrisen i varje avståndslucka över målets utsträckning. För varje lucka diagonaliserar programmet spridningsmatrisen enligt beskrivningen i avsnitt 5. Egenvärdena och egenvektorerna som räknas fram, uttrycks i termer av sex parametrar, en amplitud (m) och sex vinklar ($\psi, \tau_m, \gamma, \nu, \xi$), vilka kan ges fysikaliska tolkningar enligt avsnitt 5. De sex parametrarna utgör utdata från programmet och kan användas, ev. i vidare förädlad form, som särdrag i efterföljande algoritmer för själva måligenkänningen.



3 Precisionsstyrning: Detektion, rörelseestimering och styrning

Verkanssystemet kravsätter sensorsystem och styrsystem i form av toleranser på verkansplattformens sluttillstånd i brisadpunkten. Som ett exempel i studien har valts motorluckan på ett bepansrat markfordon, detta för att erhålla graderad verkan. I ansatsen går vi baklänges från brisadpunkten mot krav på sensorernas målinmätning.

I den påbörjade analysen betraktas inmätningsfarkost och verkansdel som två separata styrbara enheter. Detta ger större flexibilitet inför framtiden. Markmålet antas här vara i rörelse. Detta underlättar detektion samt ger information om markmålet riktning.

I detta kapitel ges preliminära resultat enligt:

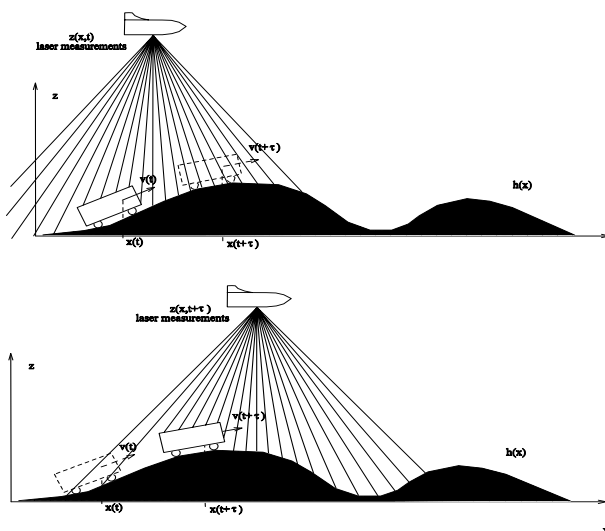
- Geometrin för verkansdelens krav på estimeringsfelet före instyrning.
- Förenklad version av multisensormodell för avstånds och bildsensor.
- Simulering av mätningar och rörelser längs utmed höjdprofil.

Ett viktigt mål för ansatsen är att senare kunna beskriva hur bomavståndet påverkas av systemparametrar. Genomgående har modeller och ansatser förenklats för detta syfte.

3.1 Problemställningar och begränsningar, en introduktion

Den grundläggande problemställningen är hur noggrant vi kan skatta position riktning/orientering och hastighet hos ett markmål. Skattningen skall vara i ett sensorfast koordinatsystem. Utgående från felet i denna skattning skall bomavståndet uppskattas.

Inmätningsfarkost och verkansdel betraktas som två separata styrbara enheter. I problemet har markmålet valts till ett bepansrat markfordon där motorn, som är av strategiskt intresse att träffa, sitter i främre delen av fordonet. Fallet illustreras i figur 40 där vi har en rörelse längs utmed en höjdprofil.



Figur 40. Två avståndsscan vid tidpunkten t_1 och t_2 för fallet med ett rörligt markmål på en höjdprofil och en sensorplattform på rakbana.

Träffpunkt:

Verkansdelen skall träffa kritisk och strategisk del på fordonet t.ex. motorluckan. Det kan antingen ske genom att verkansdelen riktas in mot en punkt som sensorerna pekar ut (ev. relativt några referenspunkter som kan observeras), eller att verkansdelen riktas in mot en punkt som bestäms av skattad position och riktning/orientering hos fordonet t.ex. 2 meter framför mittpunkten. Detta förutsätter dock att systemet gjort en korrekt identifiering av markfordonet.

Målets position, riktning/orientering och hastighet

Grundproblemet är att skatta fordonets position och riktning. Dock, hela kedjan med sensorinmätning, signalbehandling, inriktning, skott samt projektilens flygtid tar en viss tid. Fordonets position och riktning behöver predikteras för nödvändig framförhållning. Alltså måste även markmålets hastigheten skattas från sensormätningarna.

Målinmätningen kan kort beskrivas med tre faser:

1. Sökning- och detektionsfas.
 - a Absolutdetektion
 - b Detektion av förändring, change detection.
 - c Detektion av pågående rörelse
2. Följe- (tracking) fas där systemet inte får slarva bort ett upptäckt mål.
3. Hastighetsinmätning och prediktion

Står målet stilla försvinner fas 2 och 3.

3.2 Förenklade modeller för detektion och estimering

Vi skall estimera markfordonets position, riktning/orientering θ och hastighet. I detta avsnitt betraktar vi endast ett tvärsnitt som innehåller markfordonets trajektoria. Med en avståndsmätande sensor som mäter/scannar tvärsnittets höjdprofil erhålles följande approximativa observationsekvation

$$h(x, t) = h_o(x) + h_f(x - vt) \quad \text{Ekv. 3-1}$$

där $h_o(x)$ är markprofilen och $h_f(x - vt)$ fordonets höjdpuckel som åker fram på ytan.

Markfordonets form beskrivs med $h_f(x)$. Utanför fordonet är $h_f(x) = 0$ d.v.s. då $|x| > L/2$. Om fordonet är i brant backe blir fordonspuckeln modifierad. Utvidgas ekv. 1 till hela ytplanet kommer fordonsdelen av $h(x, y, t)$ att innehålla trigonometriska termer i funktionens argument. Denna modifiering kommer att studeras senare.

Motsvarande enkla ekvation för intensiteten i en bildsensor är

$$i(x, t) = \alpha i_o(x) + [1 - \alpha] i_f(x - vt) + \text{skuggtermer} \quad \text{Ekv. 3-2}$$

där α är en binär variabel som beskriver huruvida vi observerar marken eller fordonet. Argumentet i α är av samma typ som i ekvationen ovan.

Nedan räknar vi upp fyra fall med olika förenklade ansatser för olika målförflyttningar.

Fall 1. Stor förflyttning mellan två scan

Vi betraktar fallet att förflyttningen av målet längs ytan mellan två scan är större än fordonets längd L , d.v.s.

$$v_T T > L \quad \text{Ekv. 3-3}$$

Direkt subtraktion av två scan ger två förskjutna separerade pucklar. Illustration finns i avsnitt 3.4. Detta är "prototypfallet" där sensorn mäter in marken innan fordonet hunnit fram.

Fall 2. Liten förflyttning mellan två scan

När fordonets förflyttning är liten relativt fordonslängden L

$$v_T T \ll L \quad \text{Ekv. 3-4}$$

ger en subtraktion mellan två scan två dubbelspikar. Separation mellan spikarna är en fordonslängd plus förflyttningen d.v.s. $L + v_T T$. Spikarna hamnar där $h_f(x)$ har stor derivata.

Fall 3. Markprofilen kan subtraheras

Vi antar att systemet har tidigare mätt markprofil $h_0(x, y)$ som alltså kan subtraheras.

Estimat $\hat{x}(t)$ av fordonets position kan fås med matchat filter. Tekniken med matchat filter används för att detektera och skatta mål med radar, [6].

$$\hat{v}_T(t_2) = \frac{\hat{x}(t_2) - \hat{x}(t_1)}{t_2 - t_1} \quad \text{Ekv. 3-5}$$

I kommande arbete ges ett uttryck för skattningens varians. Har man en hel sekvens av detektion användes givetvis ett Kalmanfilter.

Fall 4. Mätning utan a priori information

Vet systemet inget om markens egenskaper kan man inte göra subtraktioner av ovanstående typ. Dock, är målet t.ex. på en väg bör extraktionen kunna bli bra ändå. I det fortsatta arbetet bör ovanstående fall jämföras för olika typer av terräng.

3.3 Träffpunkt och måltoleranser

Inledningsvis utreds kopplingen mellan måltyp och verkanssystem. En träffpunkt definieras på målet och därefter bestäms toleranser för briseringspunkten som är sluttillstånd för styrproblemet. I nästa kapitel introduceras begreppet brisadintervall. Därefter studeras hur målets rörelse på konkav respektive konvex yta påverkar denna storhet.

3.3.1 Verkanssystemet

Verkanssystemet kravsätter sensorsystem och styrsystem i form av toleranser på sensorplattformens sluttillstånd i brisadpunkten $X(t_{\text{brisad}})$.

Ett exempel på ett mål skulle kunna vara ett bepansrat markfordon som stridsfordon 90. För att åstadkomma en graderad verkan är det lämpligt att välja dess motorlucka som sitter i framkant som träffpunkt. Toleranserna för träffytan, $\varepsilon_x = \varepsilon_y = 0.5$ m, har valts något mindre än motorluckans verkliga fysiska mått, för att på så sätt säkerställa en motorutslagning. Träffytan ligger i ett kroppsfast koordinatsystem (x-y plan) enligt figur 40. Den maximala vinkeln till en ytnormal till träffytan bör ej överstiga $\varepsilon_\alpha = \pm 20^\circ$ för att garantera genomträngning av pansar. Likaså finns en maximal höjd $\varepsilon_h = 100$ m för brisadpunkt som också är kopplad till verkansdelen som i princip inte kan styras efter brisad.

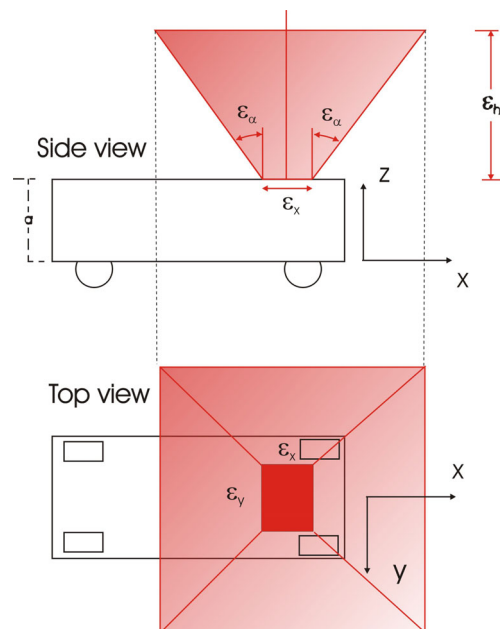
Dessa krav på vapenbärarens sluttillstånd, vilket är ekvivalent med tidpunkten för brisad av verkanssystemet, har samlats i en toleransvektor

$$\varepsilon = [\varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_\alpha \quad \varepsilon_h]^T$$

och i det plana fallet erhålles

$$\varepsilon = [\varepsilon_x \quad \varepsilon_\alpha \quad \varepsilon_h]^T$$

som illustreras i figur 41.

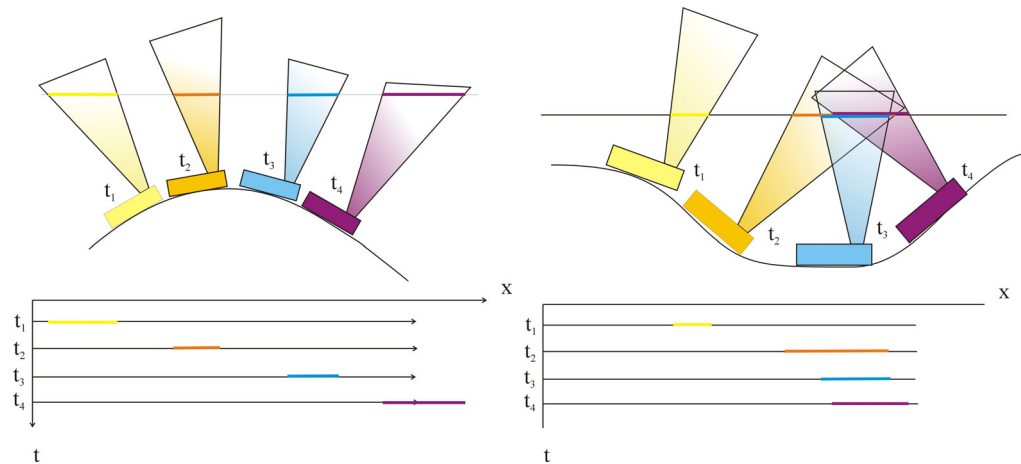


Figur 41. Sido- respektive topp-vy av målets träffpunktstoleranser (träffyta). Toleranserna uttrycks lämpligen i ett farkostfast koordinatsystem enligt figuren. Målets mått är $a*b*L$ ($h*b*l$).

3.3.2 Ytans påverkan på problemet

Här ges exempel på vikten av att känna ytan ett stycke framför målet. Den huvudsakliga orsaken till detta är tidsfördröjningen från att verkanssystemet briserat till den verkliga träffen. Under denna tid hinner målets toleransvolym som är fast kopplad till målets kropp att hinna translatera och rotera till en ny position på ytan.

I figur 42 nedan illustreras, för fyra tidpunkter (t_1, t_2, t_3, t_4), hur brisadintervallet rör sig för en vapenplattform, som åker på rakkana med konstant hastighet när målet translaterar på först en konvex yta (kullen t.v.) och sedan för en konkav yta (gropen t.h.).

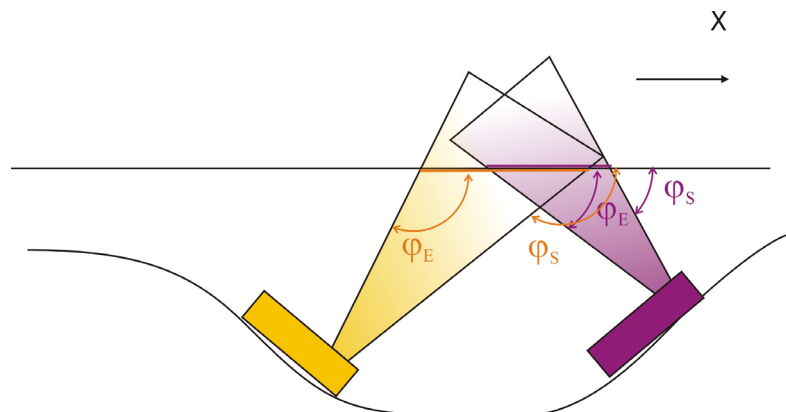


Figur 42. Brisadintervallets rörelse illustrerad för en konvex och en konkav yta

Brisadintervallet definieras som den sträcka längs vapenplattformens trajektoria, i detta fall en rakkana, som skär toleransvolymen. Inom detta intervall bör brisad ske med god marginal.

Brisadintervallet rör sig ”långsamt” och ”jämnt” på den konvexa ytan. Intervallets bredd är som minst på ytprofilens högsta punkt. I fallet för den konkava ytan sker en inbromsning av brisadintervallet som i högsta grad försvårar problemet med att (1) att rikta in verkansdelen mot träffpunkten (2) att positionera en plattform inom brisadintervallet.

Ur dessa två exempel i figur 42 inses att målets rörelse som är kopplad till ytan kommer att ställa krav på verkanssystemet i form av en minimal (S, start) och maximal (E, end) utskjutningsvinkel, φ_S respektive φ_E , se figur 43. Utskjutningsvinkeln definieras som vinkeln mellan verkansdelens utskjutningsriktning och sensorplattformens symmetriaxel med vinkeln noll i dess hastighetsriktning.



Figur 43. Definition av brisadintervall samt maximal respektive minimal utskjutningsvinkel, φ_S (Start) respektive φ_E (End).

3.4 Modellering och simulering

I detta kapitel utreds analyserbara modeller av sensorer och fordon på en höjdprofil samt för problemet relevanta parametrar. Laser/Radar skall skanna i markmålets färdriktning.

3.4.1 Segmentering

Segmenteringen av mål och yta är en viktig del för att kunna lösa estimeringen och styrproblemet. Initialt antas ideal segmentering. Men genom att komplettera sensorsystemet och fusionera data från en bildalstrande intensitetsmätande sensor underlättas problemet med segmentering. Den sensor som i första hand studeras i denna problemställning är en avståndsmätande sensor som mäter upp avstånd i vinkelintervallet $\pm \rho$ med ett konstant vinkelinkrement $\delta\rho$.

3.4.2 Sensordata och observationer

Det finns en valmöjlighet i hur sensors observation kan modelleras:

- Sensornära observation: Rådata direkt med N avståndsmätningar med ett konstant vinkelinkrement.
- Extraherade features. I detta fall är det målets position och orientering (eng. posture) $[x_T \ y_T \ \theta_T]^T$ som extraheras ur sensordata och kallas för observation. Målets hastighet kommer också att behöva skattas ur mätningar.

3.4.3 Parametrar för sensor och mål

Det är av stor vikt att undersöka problemets olika parametrar som är kopplade till att segmentera ut objektet från bakgrunden, som i detta fall utgörs av ytprofilen. Det är också viktigt att undersöka hur väl man kan estimerar målets position och orientering, $[x_T \ y_T \ \theta_T]^T$. De parametrar som är intressanta att analysera för estimeringsproblemet är i första hand:

Avståndsmätande sensor:

Vinkelinkrement, inkrement i globalt x	$\delta\rho, \delta x$
scanninghastighet, tid för ett scan	v_{SCAN}, T_{SCAN}
scanningvinkel	$\pm \rho$
antal avståndsmätningar på mål	N_{TARGET}
antal avståndsmätningar på yta	$N_{SURFACE}$

Sensorplattformen:

sensorplattformens höjd över yta/mål	$y_S(x_T) - y_T(x_T)$
avstånd till målet (vid stora aspektvinklar)	R_ρ

speed sensor platform	v_s
<u>Goal</u>	
target size	a, b, L
speed target	v_T
<u>Ytan:</u>	
height profile	$h(x)$
height	$h(x, y)$

3.4.4 Felkällor

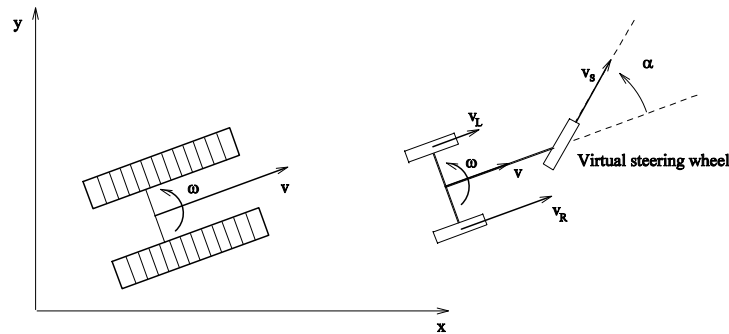
For the problem of controlling in towards a mobile "tolerance box" it is of great importance to predict the surface in advance for the goal. This has been shown for two ideal examples without error, a concave and a convex surface profile, see section 3.3. The problem is essentially caused by error sources as for example :

Sensor platform error:	w_{x_s}, w_{y_s} eller w_{θ_s}, w_{v_s}
Distance error in sensor	v_R
Angle error in sensor	w_ρ
Goal error	w_{x_T}, w_{y_T} eller w_{θ_T}, w_{v_T}

The goal error is naturally split up into two parts which affect w_{θ_T}, w_{v_T}

Ytberoende:
 roll in the surface
 surface properties (roughness, unevenness, softness)

Målberoende:
 driver's gas pedal
 driver's maneuver
 vehicle properties (grip, air pressure, spring)
 limited engine power



Figur 44. Möjliga kinematiska rörelsemodeller för markmålet. T.h. En differentiellt styrd respektive ett framhjulsdrivet styrhjulsfordon illustrerat tillsammans. T.v. Ett banddrivet fordon likaså med differentiell styrning men med en stor osäkerhet i kontaktpunkt.

Problemet att skatta objektets orientering underlättas av det faktum att man får mätningar på den omgivande ytan. Speciellt kan nämnas att antagandet om att ytans lutning är ungefär lika med målets orientering/lutning $\gamma(x_T) = \theta(x_T)$ görs senare i analysen hur målets

tillstånd $[x_T \ y_T \ \theta_T]^T$ är kopplade till ytans parametrering. I denna studie parametreras ytan med hjälp och ytprofilen och högre ordningens derivator,

$\left[h(x_T) \ \frac{\partial h(x_T)}{\partial x_T} \ \frac{\partial^2 h(x_T)}{\partial x_T^2} \right]^T$. En annan naturlig parametrering kan vara att använda

sig av båglängd längs ytan. Ytans krökning definieras då som

$$\kappa = \frac{1}{\rho_R} = \frac{d\gamma}{ds}$$

där ytan kan beskrivas enligt

$$dy = ds \sin \gamma$$

$$dx = ds \cos \gamma$$

varefter y_s och x_s erhålles efter integrering.

I kommande arbete ska ett utförligare uttryck ges för ovanstående storheter när man angriper det fulla problemet, $h(x, y)$.

Matlab

En förenklad avståndsmätande sensor har implementerats i matlab. I figur 45 visas mål och sensor för två tidpunkter. Den avståndsmätande sensorn är först placerad i $x = 35$, $y = 30$ med dess huvudmättriiktning i $\rho = -(\pi/2)$. I nästa tidpunkt har den förflyttats till $x = 65$, $y = 30$ med samma mättriiktning. Avståndsmätningarna sker i detta exempel i vinkelinkrement om $\delta\rho = 1^\circ$ från -70° relativt en lodrät symmetrilinje till $+70^\circ$.

3.4.5 Ytgenerering

I matlabsimuleringarna nedan har en yta genererats genom val av godtyckligt antal punkter som specificeras med musklickningar. Dessa punkter (X,Y) har sedan använts i matlabkommandot `YI=INTERP1(X,Y,XI,'cubic')` som genomför en kubisk interpolation

genom dessa punkter. YI samplas sedan enligt vektorn XI. Troligtvis kommer senare även sinusformade ytprofiler att undersökas.

3.4.6 Ytsampling

En förenkling har gjorts i dessa simuleringar. De avståndsmätningar som görs på målet sker med ett kontinuerligt vinkelinkrement, $\delta\rho$. Däremot sker avsamplingen av ytan med ett kontinuerligt inkrement i x, δx .

3.4.7 Målets interaktion med ytan

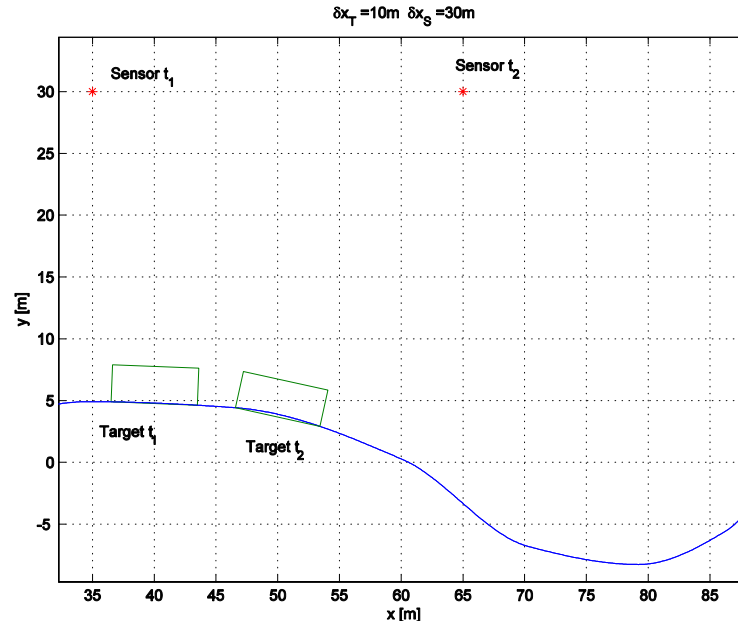
För att i dessa simuleringar garantera ett maximalt antal avståndsmätningar på målet och framförallt dess sidor, väljs målets hörnpunkter som "kontaktpunkter" med ytan.

I denna första analys har målets hjulradier satts till noll, vilket betyder "infinitest små hjul".

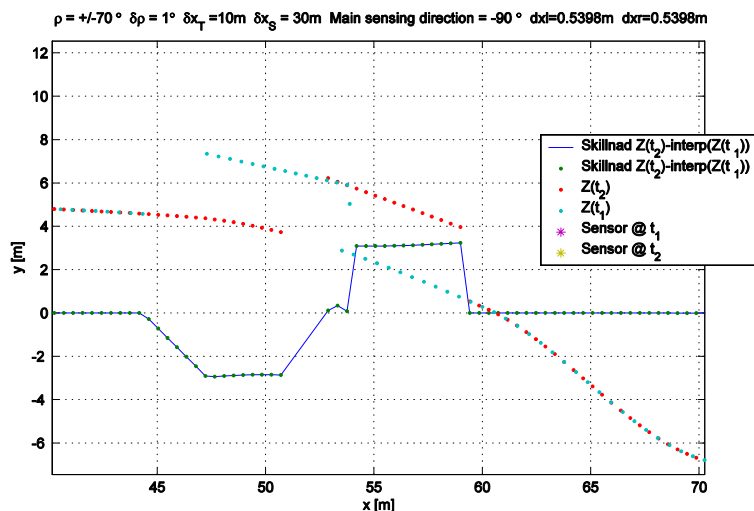
Målets läge bestäms numeriskt i ett iterativt förfarande genom att det vrids och translateras i y-led tills dess båda hörn ligger på kurvan. Målets mittpunkts ursprungliga läge i x-led innan det iterativa förfarandet är $x=15$ vilket bibehålls efter iterationerna.

Exempel 1, kort sensorförflyttning:

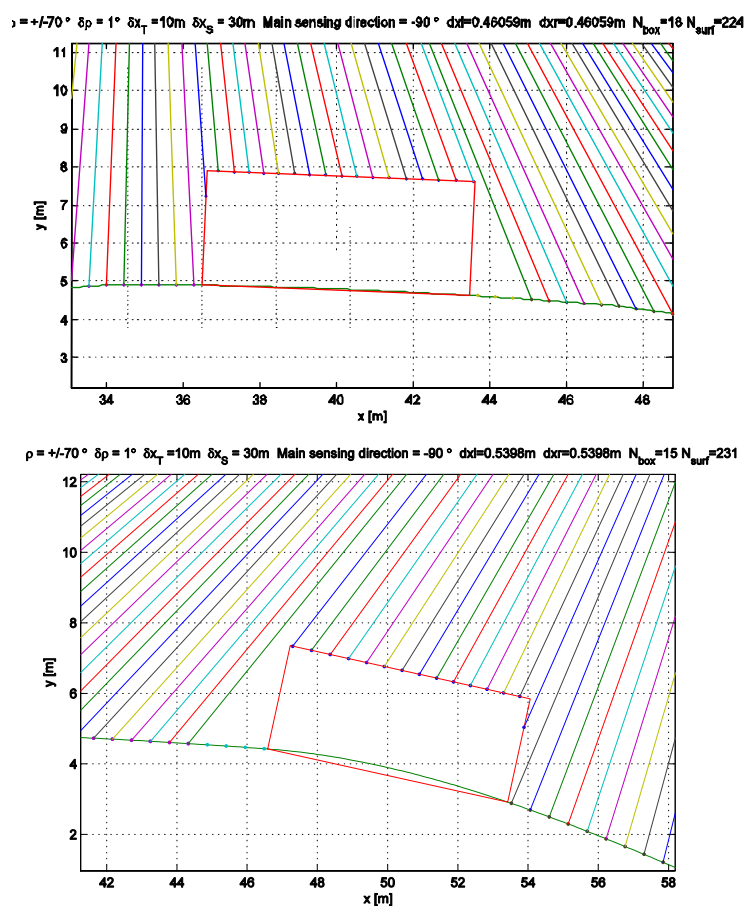
Samtidigt som sensorn förflyttar sig 30 meter i x-led mellan tidpunkten t_1 och t_2 förflyttar sig målet 10 meter. Hastighetsrelationen mellan sensor och mål är 3 ggr. Det kan nämnas att i detta fall befinner sig målet relativt centralt i ett sensorfast koordinatsystem med y i färdriktningen och x ner.



Figur 45. Sensorn (S) och målet (T) illustreras för tidpunkterna t_1 och t_2 på en yta med höjdprofilen $h(x)$. Målet och sensorn förflyttar sig $\delta x_T = 10\text{ m}$ resp. $\delta x_S = 30\text{ m}$ längs x-axeln.



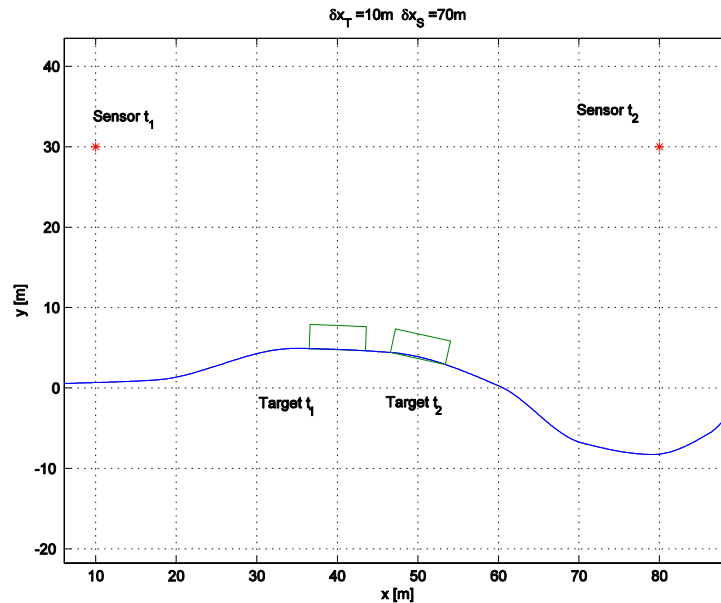
Figur 46. Differenssignalen $Z(t_2) - Z(t_1)$ samt sensormätningarna $Z(t_1)$ och $Z(t_2)$ för fallet kort sensorförflyttning. Notera att $Z(t_1)$ avsamplats i $Z(t_2)$:s x-koordinater. Notera interpolationsförfarandet.



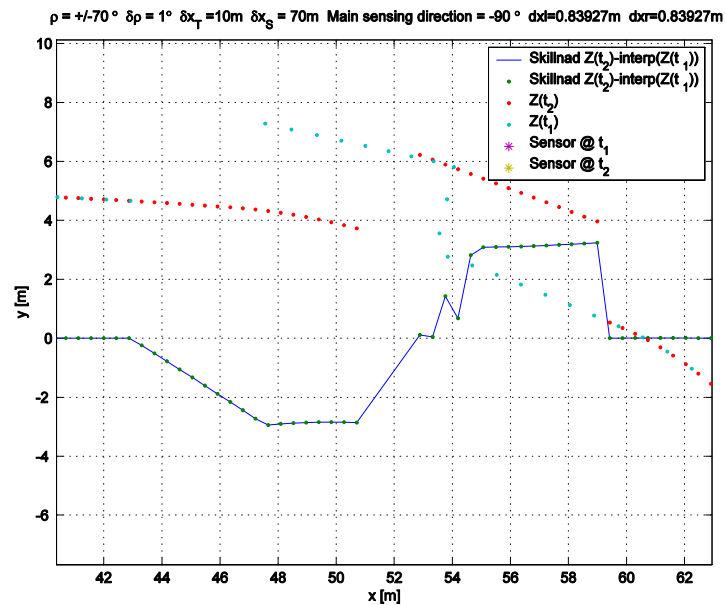
Figur 47. Sensormätningar. (A) I scan $Z(t_1)$ finns 18 avståndsmätningar på mål. (B) $Z(t_2)$ har 15 avståndsmätningar på mål.

Exempel 2: lång sensorförflyttning:

Sensorn förflyttar sig 70 meter i x-led mellan tidpunkten t_1 och t_2 . Förflyttning av målet på 10 meter bibehålls. Hastighetsrelationen mellan sensor och mål är nu 7 ggr.

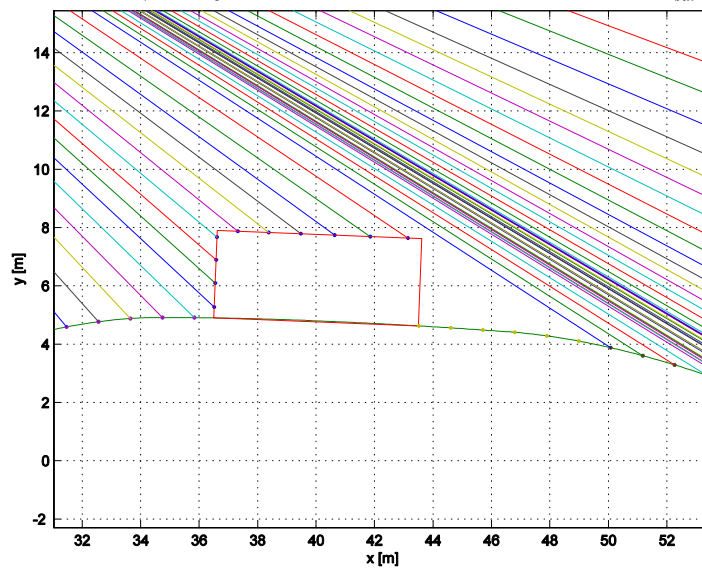


Figur 48. Sensorn (S) och målet (T) illustreras för tidpunkterna t_1 och t_2 på en yta med höjdprofilen $h(x)$. Målet och sensorn förflyttar sig $\delta x_T = 10\text{ m}$ och $\delta x_S = 70\text{ m}$ längs x-axeln respektive.

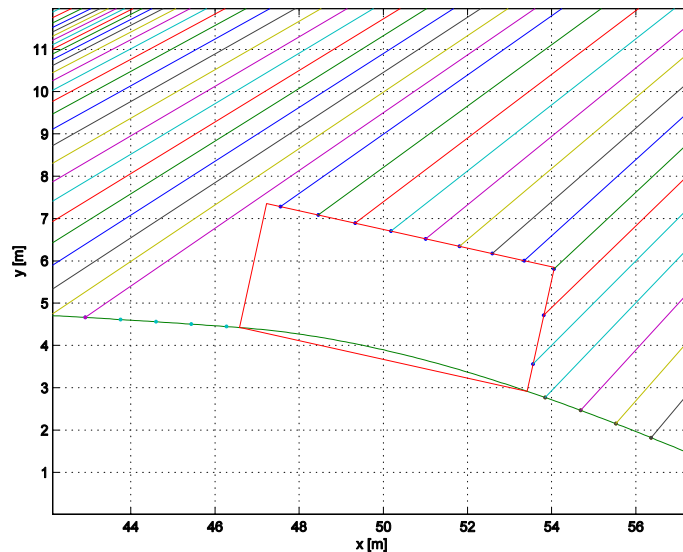


Figur 49. Differenssignalen $Z(t_2) - Z(t_1)$ samt sensormätningarna $Z(t_1)$ och $Z(t_2)$ för fallet lång sensorförflyttning. Notera att $Z(t_1)$ avsamplats i $Z(t_2)$:s x-koordinater. Notera interpolationsförfarandet.

$\rho = \pm 70^\circ$ $\delta\rho = 1^\circ$ $\delta x_T = 10\text{m}$ $\delta x_S = 30\text{m}$ Main sensing direction = -90° $dxl=1.0939\text{m}$ $dxr=1.0939\text{m}$ $N_{box}=10$ $N_{surf}=84$



$\rho = \pm 70^\circ$ $\delta\rho = 1^\circ$ $\delta x_T = 10\text{m}$ $\delta x_S = 70\text{m}$ Main sensing direction = -90° $dxl=0.83927\text{m}$ $dxr=0.83927\text{m}$ $N_{box}=11$ $N_{surf}=146$



Figur 50. Sensormätningar. (A) I scan $Z(t_1)$ finns 10 avståndsmätningar på mål. (B) $Z(t_2)$ har 11 avståndsmätningar på mål.

3.5 Växelvekan mellan målet och terrängen

Betrakta ett mål som rör sig fram i en ojämn terräng. Antag vidare att systemet får bra sensormätningar på ett avsnitt av terrängen. Görs mätningarna före passage, under passage och efter passage fås flera nya möjligheter enligt nedan:

1. Nya möjligheter ges att bestämma målets identitet. Detta gäller speciellt maskerade mål. Fordonet betraktas som ett dynamiskt filter med en ojämn terrängen som insignal. Fordonet har karakteristiska egenskaper - rörelse-signaturer. Vet man "insignalen" fås mycket mer information.

2. Då målet har passerat kan man få både hjulspår och fälld vegetation under *någon del* av dess framfart. Detta kan räcka och är fullt möjligt att mäta med multisensorsystem.
3. Den ojämna ytan ökar prediktionsfelet. Storleksordning på prediktionstiden är 0.2 till 10 sekunder beroende på verkansdel och fall.
4. Målet saktar in före hinder och diken. Systemet bör vara tillräckligt intelligent för att automatiskt nyttja geometrin vid bekämpning.

I detta avsnitt ges rums- och tids-modeller för ett rörligt mål på en ojämn höjdprofil $h(x, t)$. Sensorplattformens och målets rörelser sker alltså i ett vertikalt plan enligt figur 40. Grundmodellen för hela systemet finns och arbete pågår med dess egenskaper. Mer resultat finns i rapport under utarbetande.

3.5.1 Problemet

Det förenklade problemet som studeras består i att en sensorplattform rör sig rätlinjigt över marken med en känd konstant hastighet v_s . En rörlig markfarkost utgör målet vars rörelser skall estimeras med en i första hand avståndsmätande sensor. Farkosten som utgör målet rör sig på höjdprofilen $h(x, t)$. Sensorplattformens och målets rörelser sker alltså i ett vertikalt plan enligt figur 40.

3.5.2 Sensorplattformens tillståndsvariabler

Sensorplattformen (S) rörelse för det allmänna fallet kan beskrivas med tillståndsvariablerna $X_s = [x_s \ y_s \ v_s \ \theta_s]^T$ som är uttryckta i ett lokalt jordfast koordinatsystem. Rakbanan medför att höjden $y_s = h_s$ och vinkeln $\theta_s = 0$ i medel, men avvikelser i form av störningar kommer kraftigt att påverka sensordata. Notera också att dessa variablers fel kommer att vara svåra att särskilja ur sensordata. Eftersom att vi har god kunskap om hastigheten väljs därför tillståndsvektorn $X_s = [x_s \ y_s \ \theta_s]^T$. De kontinuerliga rörelseekvationerna som beskriver sensorplattformens rörelser är

$$\dot{x}_s = \frac{d(x_s)}{dt} = v_s \cos \theta_s \quad \dot{y}_s = \frac{d(y_s)}{dt} = v_s \sin \theta_s \quad \dot{\theta}_s = \frac{d(\theta_s)}{dt} = \omega_s$$

där ω_s i detta plana specialfall är idealt noll. Det är viktigt att inkludera tillståndsvariablerna x_s och θ_s så att de kan estimeras. Dessa tillståndsvariabler har stor inverkan på sensorfelen projicerade på ytan och målet.

3.5.3 Målets tillståndsvariabler

När det gäller målets (Target, T) rörelser beskrivs de med tillståndsvariablerna $X_T = [x_T \ y_T \ v_T \ \theta_T]^T$. Alternativt kan $\dot{x}_T$ och $\dot{y}_T$ ersättas och beskrivas med hastigheten v_T och vinkeln θ_T . Följande samband för hastighet och kurs gäller

$$\theta_T = \arctan\left(\frac{\dot{y}_T}{\dot{x}_T}\right) \quad v_T = \sqrt{\dot{x}_T^2 + \dot{y}_T^2}$$

3.5.4 Ytans och målets tillståndsvariabler

Målets rörelse styrs eller drivs av i princip tre faktorer i detta plana scenario: (1) Höjdprofilen form (2) Höjdprofilens ytegenskaper (halt, slirigt, ojämnt) i kombination med hjulens egenskaper (varierande radie, grepp, bredd) samt (3) förarens styrkommando. Därför önskas en beskrivning av x_T , y_T , och θ_T som funktion av ytans parametrar. Ett första antagande är att ytans lutning ungefär är lika med målets tippvinkel (pitch)

$$\gamma_T \approx \theta_T$$

där lutningsvinkeln uttrycks i första derivatan av höjden enligt

$$\gamma_T = \arctan\left(\frac{dh}{dx_T}\right)$$

Löser man sedan ut $\frac{dh}{dx_T}$ ur detta uttryck och utnyttjar antagandet ekvation (6) erhåller man

$$\frac{dh}{dx_T} = \tan(\gamma_T) \approx \tan(\theta_T)$$

eller om man löser ut θ_T

$$\theta_T(x_T) \approx \arctan\left(\frac{dh}{dx_T}\right)$$

och differentierar med x_T

$$\frac{d\theta_T}{dx_T} = \frac{1}{1 + \left(\frac{dh}{dx_T}\right)^2} \frac{d^2h}{dx_T^2}$$

vilket kan skrivas om som

$$\frac{d\theta_T}{dt} = \frac{d\theta_T}{dx_T} \frac{dx_T}{dt} = \frac{1}{1 + \left(\frac{dh}{dx_T}\right)^2} \frac{d^2h}{dx_T^2} \frac{dx_T}{dt}$$

där den sista derivatan kan approximeras med hjälp av antagandet (6). Enligt denna ovan genomförda härledning är följande tillståndsvariabler nödvändiga för att beskriva x_T , y_T , och θ_T som funktion av ytans egenskaper

$$X_h = \begin{bmatrix} h & \frac{dh}{dx_T} & \frac{d^2h}{dx_T^2} \end{bmatrix}^T$$

På sikt bör ytans påverkan av variabeln v_T utredas. Faktorer som bör undersökas är målets motorstyrka, grepp i och tvärs drivriktningen, varierande hjulradie, kontaktytans ytegenskaper, gropigheten samt naturligtvis förarens beteende. Om man antar att $h(x, t)$ är tre gånger differentierbar kan ytans tillståndsvariabler beskrivas spatiellt enligt

$$\frac{dX_h}{dx_T} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} X_h + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \frac{d^3 h}{dx_T^3}$$

eller alternativt om relationen $\frac{dX_h}{dt} = \frac{dX_h}{dx_T} \frac{dx_T}{dt} = \frac{dX_h}{dx_T} v_T$ samt $\frac{d^3 h(x_T)}{dx_T^3} = \ddot{h}$ utnyttjas i

(16) erhålles

$$\frac{dX_h}{dt} = \begin{bmatrix} 0 & v_X & 0 \\ 0 & 0 & v_X \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} X_h + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ v_X \end{bmatrix} \ddot{h}$$

I denna kurvrepresentation kan en godtycklig kurva genereras med en sekvens av $\ddot{h}$. Ytans "skrovlighet" modelleras med ett statistiskt mått för $\ddot{h}$. De sista två ekvationerna beskriver den ojämna terrängen som om den var genererad av ett fordon. Vidare, den sista är skalad i tid medan den tidigare är i rumsdomänen.

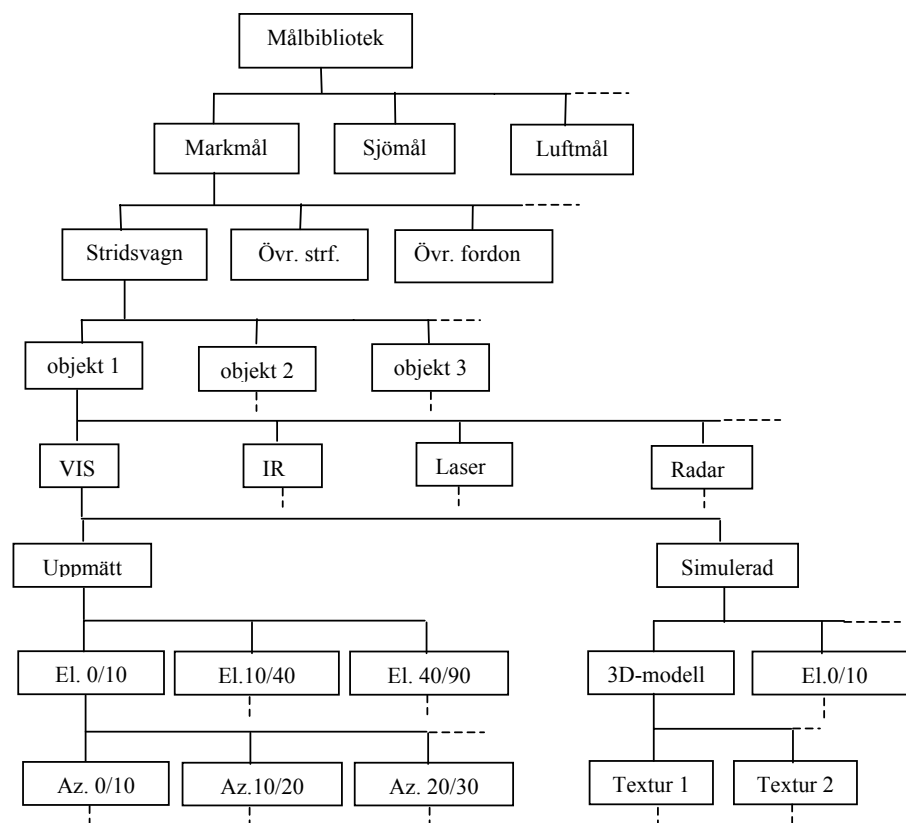
4 Mål/signaturbibliotek

Inom projektet har ett mål/signaturbibliotek börjat byggas upp. Målsättningen med målbiblioteket är att underlätta för kommande forskningsarbete inom olika forskningsområden såsom: måligenkänning, datafusion etc. Målbiblioteket kommer att innehålla både uppmätta signaturer från fältförsök och simulerade signaturer. Målbiblioteket är i första hand avsett för markmål, men även sjö- och luftmål kan på sikt bli aktuellt. Målbiblioteket kommer att innehålla data från flera olika sensorer som laser, IR och radar, och på sikt är det tänkt att biblioteket ska innehålla signaturer med våglängder från UV t.o.m. mikrovågor (radar).

Behörighet till målbiblioteket ges till de projektmedlemmar som behöver få tillgång till data. Målbiblioteket innehåller endast målsignaturer från öppna objekt, men eventuellt kommer referenser att finnas till hemliga mätningar. Följande avsnitt kommer att visa den aktuella strukturen hos målbiblioteket.

4.1 Målbibliotek

Målbiblioteket är under uppbyggnad så strukturen kan eventuellt komma att ändras något.



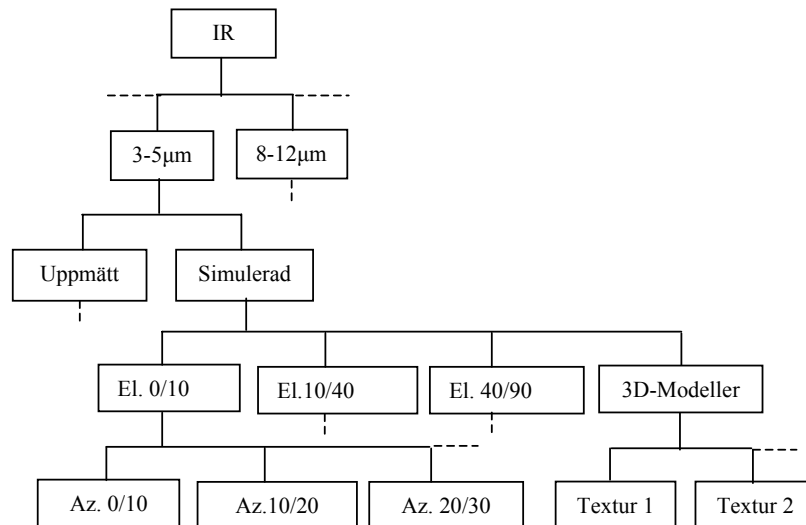
Figur 51. Målbiblioteket. El. (Elevation): El. 10/40 = $10^\circ \leq \text{Elevations vinklar} < 40^\circ$. Az (Azimuth): Az. 10/20 = $10^\circ \leq \text{Asimut vinklar} < 20^\circ$, 3D-Modell: Cad-modeller etc.

Målbiblioteket är indelat i flera olika nivåer som man kan se i figur 51. *Objekt* är de enskilda fordonen t.ex. IKV 91, T-72, BV 206, MTLB, Strv 104, Tgb40 som alla är uppmätta med både IR, laser och radar. Dessa mätningar är inlagda eller kommer inom kort att läggas in i målbiblioteket. De uppmätta fordonen är sedan indelade i tre grupper beroende på elevationsvinkeln. El.0/10 betyder elevationsvinklar mellan 0° och 10° dvs. data som uppmäts nästan rakt från sidan, t.ex. data från en stridsfältsradar. El.10/40 kan vara data från t.ex. en målsökare, eller en lågt flygande UAV och El.40/90 är data nästan rakt uppför vilken kan vara uppmäts med t.ex. en UAV från hög höjd. Data är även indelade i olika grupper från 0 - 360° beroende på azimuthvinkeln. Az. 10/20 betyder azimuthvinklar mellan 10° och 20°.

Data kan även vara simulerat med något simuleringsprogram. Här finns dessutom en undergrupp med 3D-Modeller vilket är Cad-modeller som kan ha olika texturer för att simulera olika kamouflering etc.

4.1.1 IR-gren

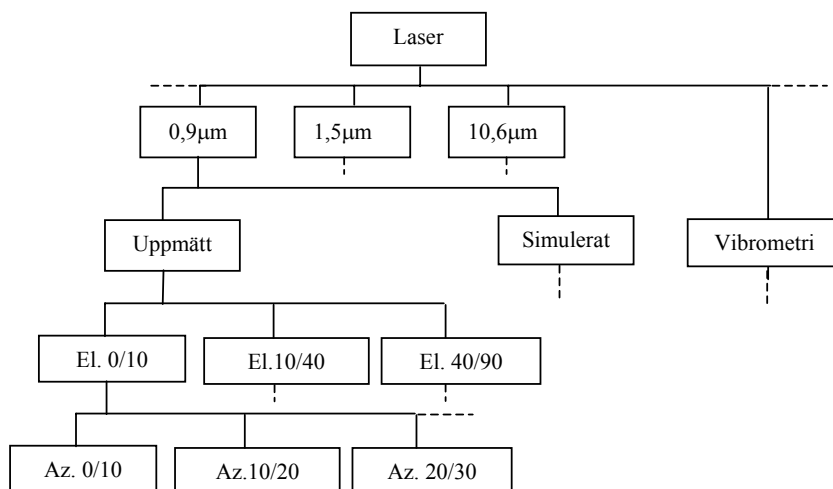
Använd mätutrustning har t.ex. varit: THV900 (3-5µm och 8-12µm), visuell video och NIR video.



Figur 52. IR-grenen på målbiblioteket.

4.1.2 Laser-gren

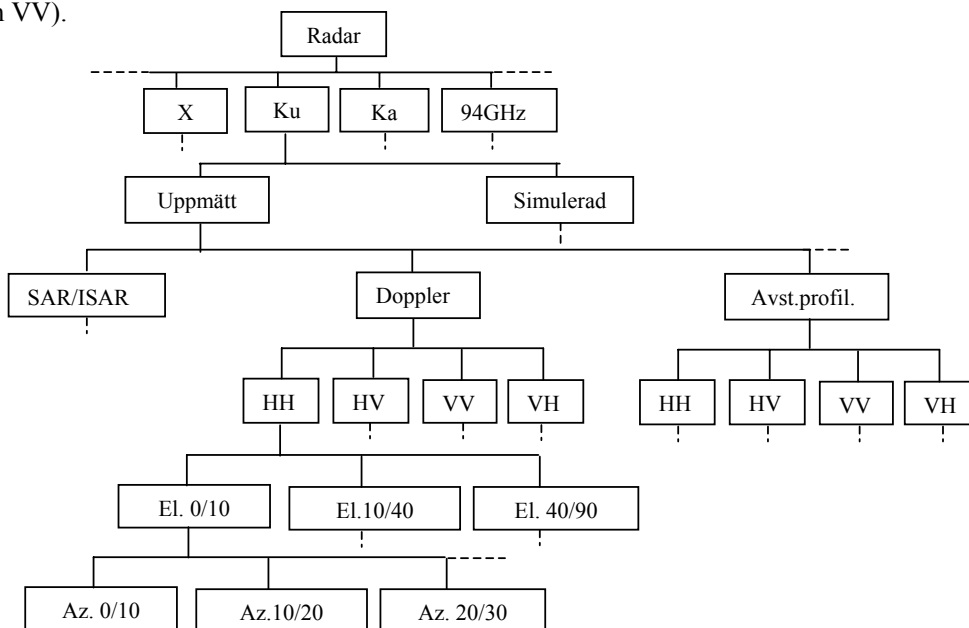
Använd mätutrustning har t.ex. varit: laserscannern Optech ILRIS-3D (1,5 μm).
 Vibrometridata finns på T-72.



Figur 53. Laser-grenen på målbiblioteket.

4.1.3 Radar-gren

Använd mätutrustning har t.ex. varit: ARKEN-radarn (9,5 GHz och 15,5 GHz, i både HH och VV).



Figur 54. Radar-grenen på målbiblioteket.

5 Sensorinventering

Detta avsnitt kommer att beskriva några olika sensortyper samt analysera vilka våglängdsband som är lämpliga för en målsökare i slutfasen.

5.1 IR-sensorer

Val av IR-detektor handlar, förutom valet av våglängdsband (ett eller flera), om vad som prioriteras mest, ett lågt pris eller höga prestanda. IR-detektorer kan delas in i okylda och kylda detektorer [27],[28]. I detektorsammanhang görs en godtycklig indelning av spektralområdet i *short wave* IR, SWIR (1 – 3 μm), *mid wave* IR, MWIR (3 – 5 μm) och *long wave* IR, LWIR (8-12 μm). P.g.a. besvärande atmosfärsabsorption bortses i regel från området mellan MWIR och LWIR.

5.1.1 Okylda IR-detektorer

Med okylda detektorer slipper man dyra och skrymmande kylsystem, men det sker till priset av sämre prestanda såsom känslighet, snabbhet och upplösning. Med okylda detektorer avses vanligen termiska detektorer. Dessa kännetecknas av att infallande, absorberad IR-strålning åstadkommer en temperaturändring hos ett responselement i detektorn. Ett annat kännetecken är att responsiviteten (utsignal/infallande strålningseffekt) är relativt oberoende av våglängden. Detektiviteten (D^*) för okylda detektorer (ferroelektriska) är av storleksordningen $10^8 - 10^9 \text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ i LWIR. Det bedrivs mycket forskning kring okylda kvantdetektorer men det finns idag få exempel med okylda kvantdetektorer i bildalstrande system.

Okylda IR-tekniker

De vanligaste okylda teknikerna i bildalstrande system är resistansbolometer och ferroelektrisk detektor.

Resistansbolometer. Principen är att det elektriska motståndet hos ett värmekänsligt element ändras vid absorption av IR-strålning. De vanligaste detektormaterialen är a-Si (amorft kisel) och VO_x (vanadinoxid) som används i spektralområdet 8 – 12 μm . a-Si-detektorn är kanske den detektor som har högst potential att bli en massproducerad, billig detektor. Ett exempel på ett företag som använder a-Si-detektorn (utvecklad av Sofradir) i sina kameror är det franska företaget Cedip. Ett typiskt NETD-värde (vid 300 K) är 100 mK.

Ferroelektriska detektorer. I ferroelektriska detektorer utnyttjas polarisationens temperaturberoende. Vanliga detektormaterial är LiTaO_3 , BST ($\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3$) och PST (blyskandiumtantalat). Spektralområdet är 8 – 12 μm . Tillverkningsprocessen för BST- och PST-detektorn är komplicerad men de ger båda höga prestanda. NETD (vid 300 K) är ca 80 mK. Exempel på system med BST är NightVision (Raytheon) till Cadillac:s bilmodeller DeVille DTS och Deville DHS.

5.1.2 Kylda IR-detektorer

Med kylda IR-detektorer menar man vanligen sensorer som arbetar vid kryogeniska temperaturer (77 K – temperaturen för flytande kväve – eller lägre) – kvantdetektorer. Principen för en kvantdetektor är att IR-strålningen ändrar en elektrisk storhet hos en halvledare (responselementet). Utmärkande är att responsiviteten är starkt

våglängdsberoende beroende på att en foton måste vara tillräckligt energirik för att flytta en elektron från ett ickeledande till ett ledande tillstånd i halvledaren. Det finns en kritisk våglängd, λ_{peak} , som varierar från material till material

$$\lambda_{peak} = \frac{hc}{E_g} \quad \text{Ekv. 5-1}$$

där E_g betecknar bandgapets energi. Infallande fotoner måste ha en energi $\geq E_g$ för att generera ledande elektroner. Då E_g minskar (in i IR-området) ökar också detektorbruset, varför kylning i regel krävs.

Kyllda IR-tekniker

HgCdTe (MCT). Den vanligaste kyllda detektorn är HgCdTe (MCT) som utmärks av hög känslighet. En kontinuerlig utveckling av MCT-detektorn har pågått sedan 1959. Dess spektralområde är MWIR – LWIR. MCT nämns ofta, tillsammans med InSb, som den intressantaste kyllda IR-tekniken [28],[29]. NETD (noise equivalent temperature difference) vid 300 K är typiskt 25 mK i MWIR och 40 mK i LWIR. Detektiviteten (D^*) är av storleksordningen $10^{11} \text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ i MWIR och $5 \cdot 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ i LWIR.

InSb. InSb-detektorn utmärks liksom MCT av hög känslighet. Dess spektralområde är 1,5 – 5 μm . Detektiviteten (D^*) är av samma storleksordning som för MCT, d.v.s. $10^{11} \text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$.

QWIP (AlGaAs/GaAs). QWIP-detektorn kan göras känslig i 3 – 5 μm och 8 – 12 μm . En QWIP-detektor kännetecknas av att ha ett smalbandigt känslighetsområde, t.ex. 8 – 9,2 μm . Utmärkande för QWIP-arrayer är en hög uniformitet. NETD (vid 300 K) i MWIR och LWIR är < 18 mK. Typiskt är QWIP-detektorns detektivitet en storleksordning mindre än för MCT, d.v.s. i LWIR är den ca $5 \cdot 10^9 \text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$.

PtSi. PtSi-detektorns spektralområde är 3 – 5 μm . Den kännetecknas av att vara känsligare mot kortare våglängder. PtSi-arrayer utmärks av hög uniformitet. PtSi var det första detektormaterialet som möjliggjorde större bildalstrande arrayer. NETD (vid 300 K) är betydligt högre än för MCT-detektorn, ca 75 mK.

PbS och PbSe. PbS-detektorn kan användas upp till 3 μm och PbSe-detektorn upp till knappt 5 μm . PbSe-detektorn är ett exempel på en kvantdetektor som ger bra prestanda i MWIR med endast termoelektrisk kylning. Med termoelektrisk kylning fås en temperatur ned mot en bit över 200 K, t.ex. – 40 °C. En okyld PbS-detektor har en detektivitet D^* i storleksordningen $10^{11} \text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ och en termoelektriskt kyld PbSe-detektor $2 \cdot 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$.

5.1.3 Val av systemparametrar

Våglängdsband – spektral dimension

De målobjekt, bl.a. T72-TANK, som diskuteras i projektet ”Intelligenta verkanssystem” har framträdande signaturer i SWIR, MWIR och LWIR. SWIR ger huvudsakligen information om reflekterad strålning och ger i dagsljus detaljerad information om ett objekts form och ytstruktur liksom av terrängen. MWIR ger huvudsakligen information om emitterad strålning och avslöjar heta källor, t.ex. uppvärmda avgasrör. Vid temperaturen 25 °C återfinns en svartkroppstrålares maximala utstrålning vid ca 10 μm , d.v.s. mitt i LWIR. Val av IR-band med avseende på detektion och igenkänning har diskuterats i tidigare rapporter vid FOI [29],[30]. LWIR har varit ett traditionellt val i målsökare och ger god

information om ett föremåls temperatur. SWIR-MWIR ger fördelar vid bestämning av formen hos ett objekt och måligenkänning. En analys måste göras för varje operationsmiljö vilket våglängdsområde som kan förväntas ge maximal målkontrast. Exempel på samtidig registrering av ett fordon (kamouflagemålad lastbil) i SWIR, MWIR och LWIR visas nedan (5.1.4 Multispektral teknik).

Ett IR-systems räckvidd försämras av atmosfären genom spridning, absorption, emission och turbulens [31]. Spridningen kan delas in i Rayleigh-spridning och Mie-spridning. Med Rayleigh-spridning avses spridning i en atmosfär där kvoten $2\pi r/\lambda \ll 1$, vilket är fallet i luft utan aerosolpartiklar; r betecknar partiklarnas radie och λ våglängden. För IR-system har Rayleighspridningen mindre betydelse. Av betydelse för IR-system är däremot Mie-spridning med vilken avses spridning orsakad av aerosolpartiklar. Aerosolerna dämpar även signalen genom absorption. Speciellt för kortare IR-våglängder är dämpningen (spridning+absorption) p.g.a. aerosol-partiklar väl korrelerad med atmosfärens fukthalt. Aerosoldämpningen tenderar att minska mot LWIR-området. Om aerosolpartiklarna är stora (t.ex. dimma) är dämpningen ungefär lika stor i IR-området, vilket den även är i regn. Över ca 2,5 μm begränsas IR-områdets användbarhet av absorption i atmosfären, där MWIR och LWIR utgör atmosfäriska fönster. Absorptionen sker av små molekyler som H_2O , CO_2 , CH_4 , N_2O , CO och O_3 med spår av andra gaser som CFCl_3 och CF_2Cl_2 . Stark absorption vid en viss våglängd motsvaras av stark emission vid samma våglängd. Absorptionen beskrivs av Beers lag, också kallad Bouguers lag:

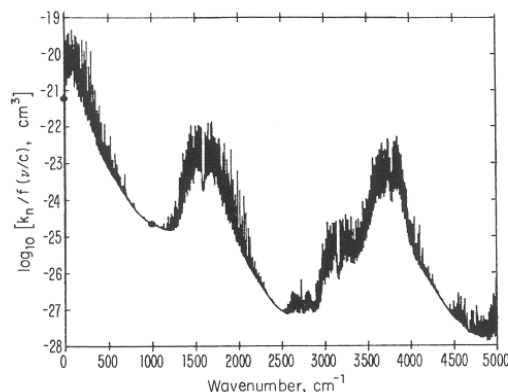
$$I = I_0 \cdot e^{-\epsilon c d} \quad \text{Ekv. 5-2}$$

där I_0 är IR-strålningens utgångsintensitet, ϵ är absorptionskoefficienten, c är koncentrationen och d är sträckan. Det är framförallt vattenhalten i atmosfären som påverkas av vädret. Teoretiskt beräknade absorptionskoefficienter för vatten visas i figur 55. Transmissionsfönster syns vid 1000 cm^{-1} (10 μm), 2400 cm^{-1} (4,2 μm) och

4300 cm^{-1} (2,3 μm). I dessa fönster dominerar kontinuumabsorption som, till skillnad från linjeabsorption, inte varierar så mycket med våglängden. Då luftfuktigheten är hög är transmissionen bättre i MWIR än i LWIR.[28],[31],[32] I torr luft är däremot transmissionen bättre i LWIR än i MWIR p.g.a. stark CO_2 -absorption vid 4,3 μm . Detta är vanligen fallet då lufttemperaturen understiger 25 °C.

Turbulens uppstår av solens uppvärmning av luften nära marken. Uppvärmningen leder till en inhomogen temperaturfördelning hos luften och därmed olikheter i brytningsindex. Turbulensstyrkan karakteriseras av brytningsindex strukturparameter

C_n^2 . Turbulens kan vara en begränsande faktor för högpresterande NFOV (narrow field of view < 0,5°) -systems prestanda [33]. Under dagtid avtar C_n^2 med höjden som $C_n^2 h^{-4/3}$. Av stor betydelse är därför bantypen som kan vara horisontell eller sned, riktad uppåt eller nedåt. Är banan sned och nedåtriktad tenderar turbulensen att bli av liten betydelse för ett system jämfört med optik och detektor [34].

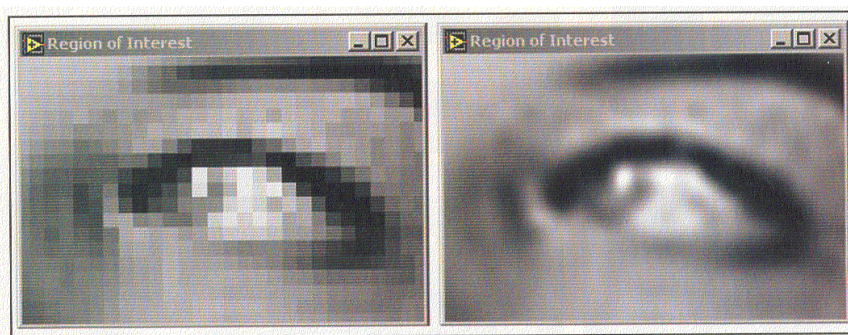


Figur 55. Teoretiska absorptionskoefficienter för ren vattenånga vid 296 K och 1 bar. x-axeln visar vågtal, cm⁻¹; omräkning till μm görs genom sambandet $\mu\text{m} = 104/\text{cm}^{-1}$ [32].

Upplösning – spatial dimension

Johnson-kriteriet och erforderlig spatial upplösning

Enligt Johnson-kriteriet krävs för måligenkänning 4 linjepar (lp) över målets minsta dimension. Om höjden för stridsvagnen "T72", som är ca 2 m, ansätts som minsta dimension fås 2 lp/m. Maximal d_g (distance on the ground) för varje pixel blir då 0,25 m vilket med avståndet 3000 m ger en maximal IFOV (Instantaneous Field-of-View) = $0,25/3000 = 0,083$ mrad. Det i projektet specificerade systemet med FPA = 256×256 och FOV = $5^\circ \times 5^\circ$ ger IFOV $\approx 0,34$ mrad. Kravet att IFOV ska vara mindre än 0,083 mrad uppfylls därmed inte. Upplösningen är en faktor ca 4 för dålig. Otillräckliga prestanda innebär dock inte med automatik att ett mer avancerat, dyrt system krävs. Utvecklingen av datormjukvara har gjort att avancerade sensorsystem till en del kan simuleras men självklart finns det gränser. Skälet till att använda datormjukvara är kostnaden. Datormjukvara är avsevärt billigare än ett avancerat optroniksystem.



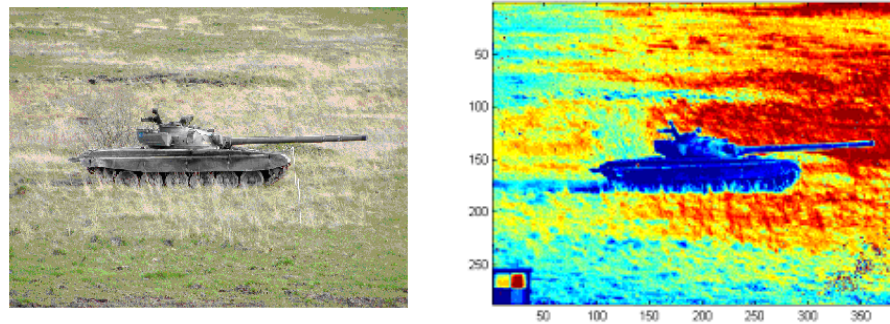
Figur 56. Simulering av högupplöst system genom interpolation. Vänstra figuren visar originalbilden. Den högra figuren visar en bild med 10× högre upplösning genom interpolation.

Figur 56 visar simulering av ett högupplösande system utifrån ett system med lägre upplösning. [35] Resultatet hade förmodligen blivit ännu bättre genom att filtrera interpolationsbilden och skärpa till den.

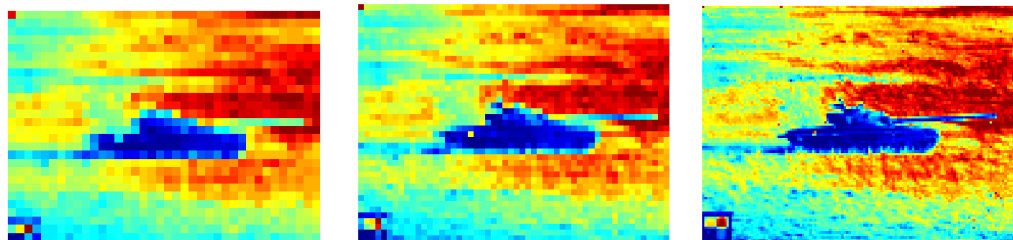
Simulering av anflygning mot mål

IFOV tecknas d/fl , där d = detektorstorlek och fl = fokallängden. Den nedre gränsen för detektorstorleken är idag ca $20\ \mu\text{m}$ (MCT, InSb, QWIP). Med detta värde fås en erforderlig fokallängd ($20\ \mu\text{m}/0,083\ \text{mrad}$) som är ca 240 mm. Nedan visas en simulerad anflygning med 200 mm-optik mot mål på 3000 m avstånd.

Figur 57 visar en registrering i SWIR med en MCT-kamera ($d=20\ \mu\text{m}$) av "T72" på avståndet 150 m. Antalet lp över minsta dimensionen, höjden 2 m, är ca 32. Figur 58 visar en simulering av anflygning från avståndet 3000 m mot "T72" under registrering med 200 mm-optik. På avståndet 3000 m är i detta fall antalet lp över minsta dimensionen $\approx 3,2$.



Figur 57. Registreringar av "T72". Vänstra bilden är ett foto taget med digitalkamera i det visuella spektralområdet; högra bilden är en registrering i ett band i SWIR ($1,55\ \mu\text{m} - 1,75\ \mu\text{m}$) med MCT-kamera (100 mm-optik) på avståndet 150 m.



3000 m (lpm $\approx 3,2$) $\rightarrow$ 2000 m (lpm $\approx 4,8$) $\rightarrow$ 1000 m (lpm $\approx 9,6$)

Figur 58. Figuren visar en simulering av anflygning mot T72. Registrering görs i ett band i SWIR ($1,55\ \mu\text{m} - 1,75\ \mu\text{m}$) med 200 mm-optik med början vid 3000 m. lpm = lp över minsta dimension. Hänsyn har ej tagits till atmosfärsdämpningen.

MRTD (Minimum resolvable temperature difference)

En uppskattning av igenkänningsavståndet för "T72" för ett IR-system med en MCT-detektor känslig i MWIR görs nedan med hjälp av MRTD-kurva och Johnson-kriteriet som förutsätter homogena mål- och omgivningstemperaturer. Uppskattningen kan ses som en jämförelse med de uppgivna måligenkännings-avstånden i reklam/data-blad.

"Modellsystemet" har en array-storlek 256×256 och ett synfält $\approx 1,5 \times 1,5$ grader. En teoretisk MRTD-kurva kan beräknas enligt [36].

$$MRTD(f) = \frac{\pi^2}{8} \frac{\left(\frac{S}{N}\right)_{thres} NETD \sqrt{H_{LP}(f)} 2f \sqrt{\frac{P_{HFOV} P_{VFOV}}{H/W}}}{MTF_{system}(f) \sqrt{\tau_{eye} R_F}} \quad \text{Ekv. 5-3}$$

där

S/N_{thres} (signal to noise threshold) sattes till 2,25 i enligt med ref. [36],

$NETD$ sattes till 25 mK,

H_{LP} är ett matchat brusfilter

$$H_{LP}(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{\int |MTF_{noise}(f,0)|^2 df} \right)^2}} \quad \text{Ekv. 5-4}$$

där MTF_{noise} sattes till 1 för alla frekvenser i enlighet med ref.[35],

f är den spatiala frekvensen,

P_{HFOV} och P_{VFOV} är IFOV i horisontell respektive vertikal led,

H/W är förhållandet mellan målets höjden och bredd $\approx 1/4$ för T72,

τ_{eye} är ögats integrationstid som sattes till 0,02 i enlighet med ref. [36],

R_F är frame rate som sattes till normal videotakt (30 Hz),

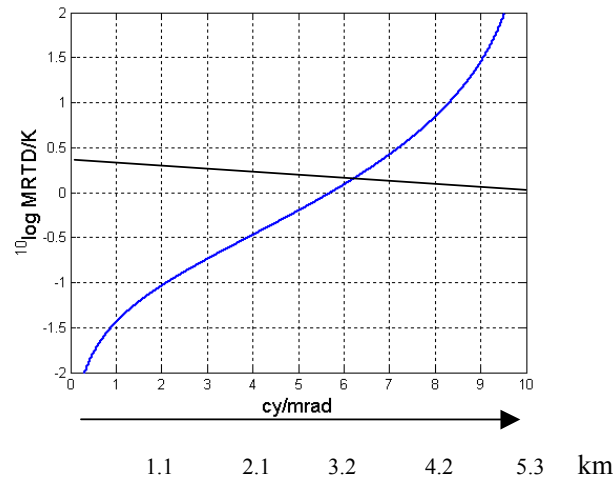
MTF_{system} approximerades till $MTF_{detektor} \cdot MTF_{diffraction} \cdot MTF_{aberration}$ som beräknades enligt [37], med följande inparametrar: fokallängd 200 mm; detektorstorlek 20 μm ; $f/\# = 4$; våglängd = 4,5 μm , vågfrontsfel (W_{rms}) = 1/14.

Med parametrarna ovan fås MRTD-kurvan i Figur 59, där längdskalan i km också ritats ut (1,9 cy/mrad $\Leftrightarrow$ 1 km). Antag att stridsvagnens temperatur är 3 grader över omgivningens temperatur och extinktionskoefficienten är 0,2/km, som motsvarar en transmission $\approx 55\%$ över 3 km. Den apparenta temperaturskillnaden räknas ut som

$$\Delta T_a = \Delta T \cdot \exp(-\alpha \cdot R) \quad \text{Ekv. 5-5}$$

där α är extinktionskoefficienten och R är målavståndet. Med värdena ovan fås då

$\Delta T_a = 1,04$ K vid 5,3 km. $\Delta T = 3$ K vid 0 km och $\Delta T_a = 1,04$ K vid 5,3 km ger ett igenkänningsavstånd $\approx 3,3$ km enligt Figur 59.



Figur 59. MRTD-kurva för att uppskatta igenkänningsavståndet för en stridsvagn T72 då ett IR-system med en MCT-detektor används.

5.1.4 Multispektral teknik

Nedan visas ett exempel med registrering av ett fordon med en multispektral kamera och en QWIP-kamera [38]. Figur 60 visar en visuell bild av scenen. Fordonet var placerat väl synligt på avståndet 138 m (ca). Före utplaceringen hade fordonet varmkörts några km ute på landsväg. Vid mättillfället var det mulet väder. Utomhustemperaturen var ca 2°C och luftfuktigheten 89%.



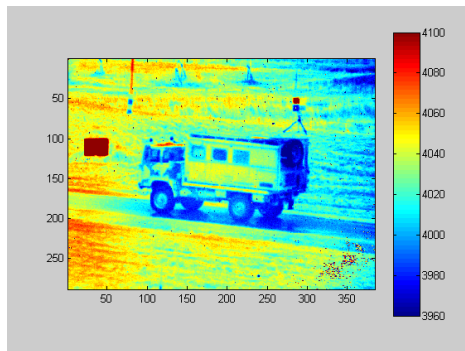
Figur 60. Foto av fordonet i det visuella spektralområdet taget med digitalkamera

Den multispektrala kameran är baserad på en kyld MCT-detektor. FPA-storleken är 384×288. Kamerans spektralområde är 1,5 – 5,2 μm . Den är försedd med ett roterande filterhjul med fyra filter vilket möjliggör registreringar i fyra delband:

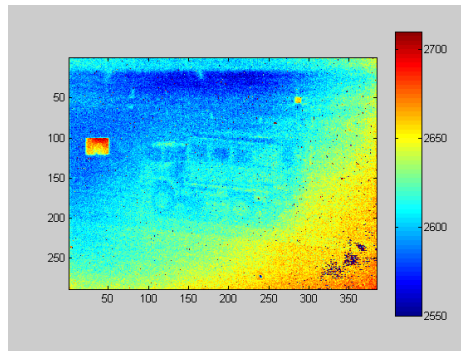
- Filter 1: 1,55 – 1,75 μm
- Filter 2: 2,05 – 2,45 μm
- Filter 3: 3,45 – 4,15 μm
- Filter 4: 4,55 – 5,2 μm

QWIP-kamerans spektralområde är 8 – 10 μm . FPA-storleken är 320×240.

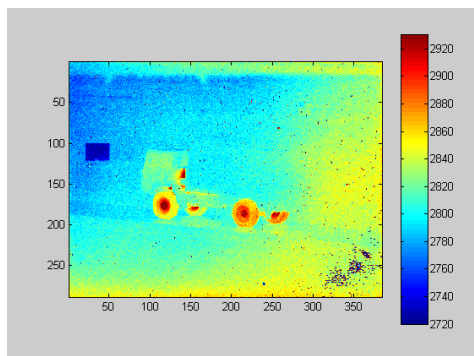
Figur 61 visar registrering av fordonet med den multispektrala kameran. Bilden med filter 1 visar huvudsakligen reflekterad strålning. Bilderna med filter 3 och 4 visar huvudsakligen emitterad strålning. Figur 62 visar en samtidig registrering av scenen med QWIP-kameran. Notera att den multispektrala kameran och QWIP-kameran inte hade samma optik vid registreringsstillfället. En viss in-zoomning av bilden registrerad med QWIP-kameran har gjorts.



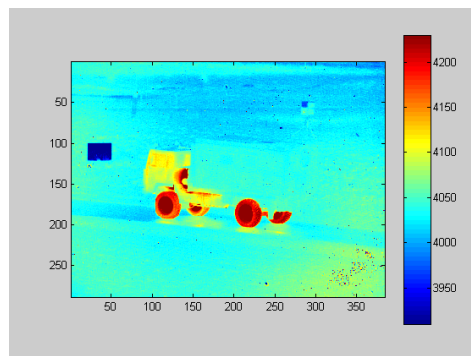
Filter 1



Filter 2

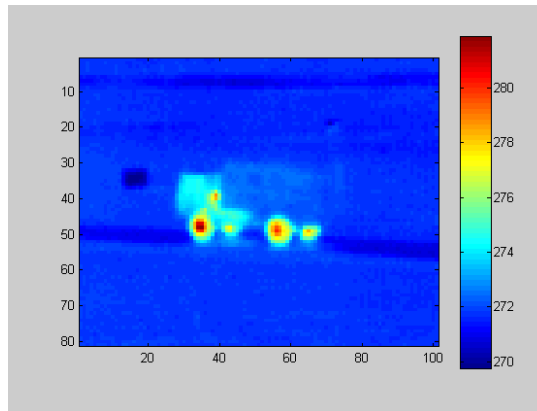


Filter 3



Filter 4

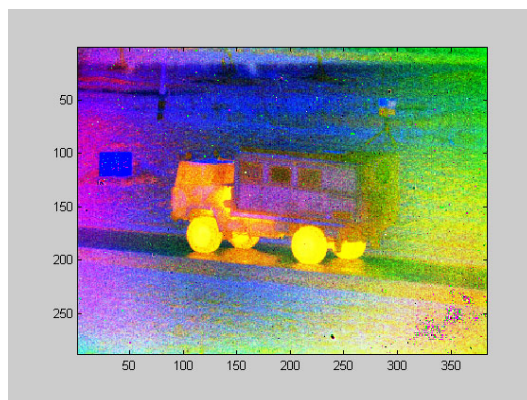
Figur 61. Figuren visar registrering av fordon med multispektral kamera försedd med fyra filter. De fyra filtrens spektralområden är 1,55 – 1,75 μm (filter 1), 2,05 – 2,45 μm (filter 2), 3,45 – 4,15 μm (filter 3), 4,55 – 5,2 μm (filter 4).



Figur 62. Figuren visar registrering av fordon med QWIP-kamera. QWIP-kamerans spektralområde är $8 - 9 \mu\text{m}$.

Multispektral registrering kan ge en förbättrad mål/bakgrundskontrast p.g.a. korrelation mellan olika spektralband [38], [39]. Figur 62 visar en RGB-bild med kodning av röd, grön och blå kanal med registreringarna från filter 4, filter 3 respektive filter 1 (från figur 61). Figur 63 är ett exempel på fusionering av multispektrala IR-bilder.

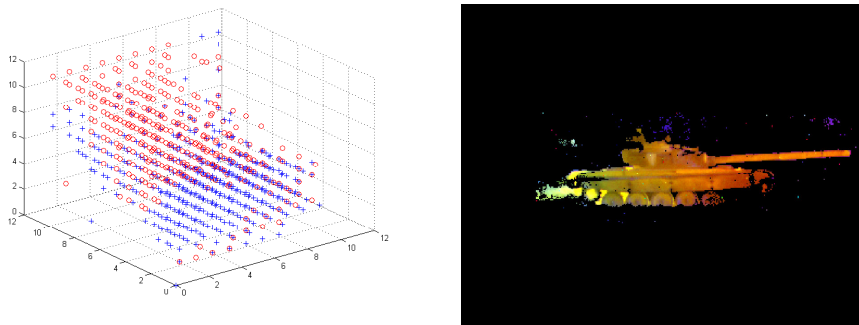
RGB-bilder medger fusionering av högst tre dimensioner. Genom dimensionsreducering, t.ex. principalkomponentanalys, kan ett godtyckligt antal dimensioner fusioneras. För spektrala data återfinns typiskt mer än 90% av bildinformationen i de tre första principalkomponenterna, vilka kan kodas med rött, grönt respektive blått och visualiseras som en RGB-bild.



Figur 63. Figuren visar en RGB-bild med registreringar från filter 4, filter 3 och filter 1 (från figur 61) kodade med röd, grönt respektive blå färg.

En annan multispektral teknik är bakgrundsdiskriminering. Bilddata analyseras i, om registrering gjorts i n band, en n -dimensionell rymd (scatter-plot) där bakgrunden definierar ett visst område i denna rymd. Alla pixlar utanför detta område definieras som mål. Med en lookup-tabell kan bakgrundsdiskriminering utföras snabbt (realtid).

Figur 64 visar ett exempel på en scatterplot med bilddata registrerad med multispektral MCT-kamera – se Figur 61 och Figur 57 – och resultatet av en bakgrunds-diskriminering.



Figur 64. Bakgrundsdiskriminering. Vänstra bilden visar en scatterplot med bakgrund (+) och mål (o); bara tre av de ursprungliga fyra dimensionerna (spektralbanden) är medtagna p.g.a. svårigheten att åskådliggöra fyra dimensioner. Den högra figuren visar resultatet av en bakgrundsdiskriminering (jämför Figur 57).

5.1.5 Framtida teknikanvändning år 2020

Sensorer som kombinerar t.ex. LWIR och MWIR eller två olika band inom LWIR eller MWIR alternativt t.ex. LWIR och UV samt IR med millimetervågsradar kommer antagligen vara vanligare 2020.

Trenden mot s.k. hyperspektral teknik avser användning av några få väl valda smala spektralband. Möjligheter finns också att titta i tiotals kanske hundratals spektralband för att bättre kunna upptäcka kamouflerade objekt, falska och dolda objekt. Vissa avancerade system finns för studier av marken – kartläggning av mineraler m.m. från satelliter men används troligen inte i flygplans-/UAV -miljö ännu.

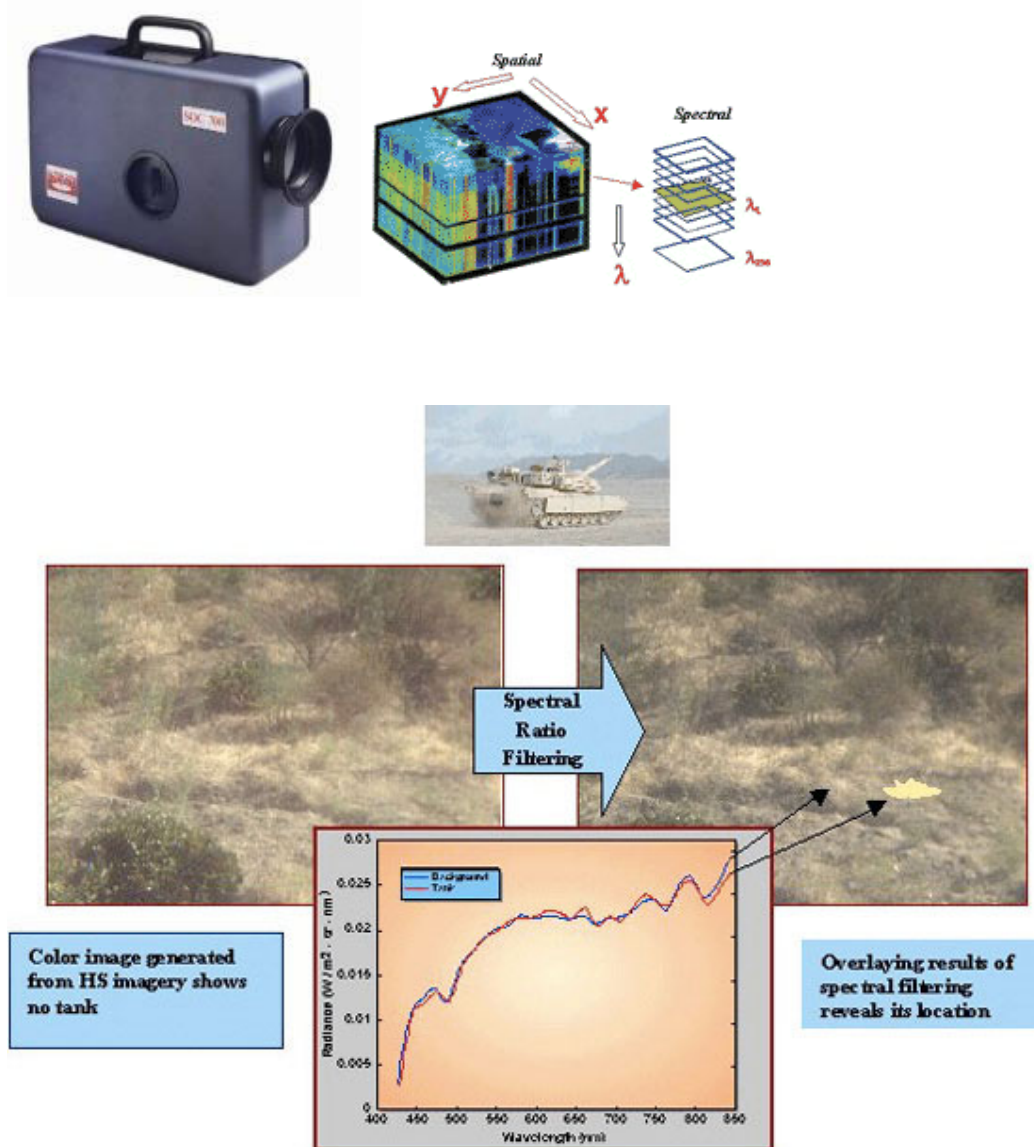
Dual band inom QWIP tekniken anses som det mest ekonomiska alternativet för att studera bilder inom smala valda band och sedan kombinera dessa bilder med varandra för att få multispektral information, istället för att använda en bred detektor med roterande filter.

I MAW (missile warning systems) används MCT detektorer (384x288 pixlar) inom MWIR och LWIR med roterande filterhjul med upptill 800 Hz fullbildshastighet, för att minska falsklarmsrisken genom att mäta i minst tre olika våglängdsband för varje pixel.

Det pågår forskning inom MCT tekniken att tillverka multibandgapsstrukturer för multi- och hyperspektrala detektorer. Detta möjliggör spektral upplösning i varje pixel, vilket skulle kunna användas inom ett enkelt SWIR, MWIR, LWIR eller tvärs över flera spektrala band.

Tillverkningen av dessa delar beror starkt av möjligheten att skapa material i vilken sammansättningen av materialet ändras snabbt (kallas heterojunctions) och ger kontroll av bandgapet. För att dessa strukturer ska fungera är det viktigt att inga defekter finns eller skapas i materialet. I MCT kan sådana defekter uppkomma beroende på den snabba materialförändringen som orsakar spänningsinducerade defekter eller Hg vakanser beroende på den stora diffusionsgradienten tvärs över ytan.

Surface Optics är en tillverkare av hyperspektrala utrustningar där problemet ofta är de enorma mängder data som produceras varje sekund, men i takt med att större mängd data kan processas så kommer antagligen denna teknik användas i avancerade spanings- och målsökarsammanhang någon gång i framtiden [11].



Figur 65. Surface Optics hyperspektral-system, med exempel på detektion av en kamouflerad stridsvagn [11].

Inom en snar framtid kommer data inte att behöva skickas ned till mark för att bli till målinformation utan bearbetning kommer att ske sensornära. Samtidigt kommer system där upptäckta objekt kopplas till en GPS-punkt – finns redan idag implementerat i CMC's MX-20 gyroplattform.

I framtiden kommer troligen okylda IR-detektorer att användas alltmer i många nya koncept. Detta eftersom de har tillräckligt bra prestanda för att fungera i vissa missiler och kan tillverkas till lägre kostnader. Vikten, energiförbrukningen och de fysiska måtten blir alla mindre när ingen kylning krävs! Idag behövs en liten batteridrivna termoelektrisk temperaturregulator för att hålla temperaturen jämn; forskning pågår för att eliminera detta behov och därmed ytterligare kunna minska vikten och måtten [7], [8], [9], [10].

5.2 Laser

I detta avsnitt beskrivs kort en modern laserskanner, Optech ILRIS-3D. Därefter följer ett avsnitt om framtida avståndsväckande arraydetektorer vilka kan ge en 2.5D ytplot med en enda kort laserpuls.

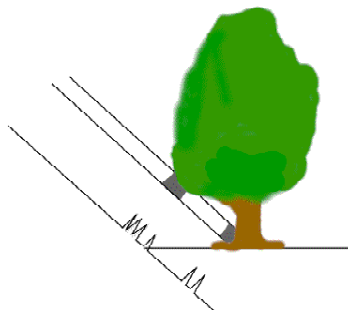
5.2.1 Laserskanner Optech ILRIS-3D

ILRIS-3D från Optech Inc., är ett skannande laserradarsystem som mäter avstånd och reflekterad intensitet. Några data för systemet visas i tabell 7. Mät huvudet innehåller en laseravståndsmätare, skanner och en digitalkamera för orientering och dokumentation. På en display visas bilden från digitalkameran och operatören kan ställa in önskat bildfält för skannern. Uppmätta data lagras på ett inbyggd flash-kort som ett punktmoln innehållande (x, y, z, intensitet), vilket kan behandlas vidare för att ge en bild eller användas som indata till andra modelleringsprogram eller liknande. Likaså lagras bilden från digitalkameran på flashkortet. Mät huvudet visas i figur 66.



Figur 66. Mät huvudet till ILRIS-3D. På framsidan (bilden till vänster) syns fönstret bakom vilken sändare och mottagare samt digitalkamera finns. På baksidans display (bilden till höger) visas bilden från digitalkameran.

För att beräkna avståndet till mätobjektet, mäts tiden från det att en laserpuls sänds ut till dess att den kommer tillbaka ("time of flight"). Det finns möjlighet att välja om första eller sista eko skall sparas, skillnaden åskådliggörs i figur 67. Tiden mäts med en högprecisionsräknare, och räknas sedan om till ett avstånd med hjälp av en mikroprocessor. Den smala laserstrålen producerar inga falska eken och visar små detaljer (ner till en centimeter) på stora avstånd.



Figur 67. Det är möjligt att mäta antingen första ekot (trädgrenarna) eller sista ekot (marken).

Skannern opererar både i mörker och i dagsljus utan retroreflektorer eller speglar. Hur långt skannern klarar av att mäta beror på reflektansen på den yta laserstrålen träffar, se tabell 7. På grund av att militära objekt ofta har en ganska låg reflektans (ibland någon enstaka procent) är signaturmätning lämpligast att utföra på mellan 30-50 meters avstånd.

Tabell 7. Tekniska data för Optech ILRIS-3D.

Maximalt avstånd	350 m (4 % reflektans) 800 m (20 % reflektans)
Mätnoggrannhet	X-Y på 50 m ± 7 mm X-Y på 100 m ± 10 mm Z på 50 m ± 10 mm Z på 100 m ± 10 mm
Mätupplösning	Laserns punktstorlek på 50 m: 15 mm, på 100 m: 20 mm Avstånd mellan punkter vid 50 m < 10 mm, 100 m < 20 mm
Måthastighet	2000 punkter per sekund
Laservåglängd	1,5 μ m (NIR)
Stråldivergens	0,2 mrad
Scanområde (Field of view)	40° ($\pm 20^\circ$)
Ögonsäkerhet	Klass 1 för den skannande strålen, ögonsäker

5.2.2 Mätförfarande och databehandling

Vid mätning med Optech ILRIS-3D erhålls en binärfil (I3D) från varje skannad vy. Dessa filer kan omvandlas i Optechs s.k. "parserprogram" till en standardiserad textfil (x-, y-, z-koordinat samt intensitet) för varje vy (RAW), en bitmap, vilken är en bild av scenen tagen med den integrerade digitalkameran, samt en loggfil, dvs. en textfil innehållande bildinformation (avstånd, bredd mellan laserskotten på ett givet avstånd, antalet punkter i höjd och sida etc.) Parserprogrammet kan leverera en rad olika format beroende på vilken tillämpning data ska användas till.

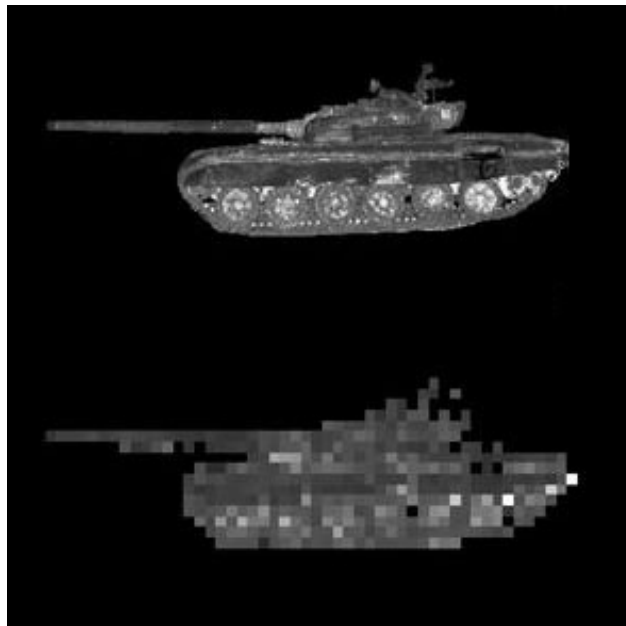
5.2.3 Felanalys vid mätning med Optech ILRIS-3D

I presenterade tekniska data säger Optech att felet vid avståndsmätning är ca ± 10 mm vid 50 m. Kontroll av felet för avståndet har gjorts genom att mäta referenstavlan för de 8 vyerna från mätningarna av T72 Kvarn. Standardavvikelsen beräknas direkt i ScanViewprogrammet (se vidare i texten under utvärderingsmetoder för mätta data, samt generering av intensitetsbilder och polärdiagram). Cirka 400 mätpunkter ingår vid denna beräkning av standardavvikelse för varje vy. För samtliga vyer är beräknad standardavvikelse 0,01 m, det vill säga precis vad databladet till skannern säger.

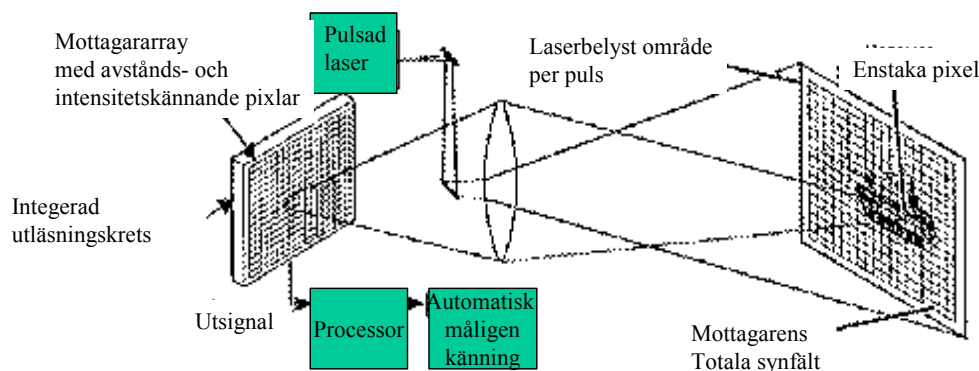
Databladet på ILRIS-3D säger inget om hur noggrant den mäter intensitet. Beräkning av standardavvikelse på intensiteten görs genom att mäta upp de olika reflektanstavlorna (99 %, 60 %, 30 % samt 2 %) i ScanView programmet. Samma vyer som ovan har använts. Spridningen över en och samma referenstavla får anses vara ganska stor 10-30 %. Eftersom det dock är samma area som mätes vid varje kalibrering är inte spridningen mellan de olika vyerna mer än från 0,6 % upp till 3 % vilket får anses vara mycket bra.

5.2.4 Framtida avståndskännande arraydetektorer

I bl.a. USA och England utvecklas nu avståndskännande fokalplanarrayer där varje pixel kan registrera avstånd (tid) och intensitet. Med hjälp av en sådan detektor kan man erhålla en "3-D bild" med en enda kort laserpuls. Dagens prestanda innebär $NEP < 1 \text{ nW}$ vid $1,55 \mu\text{m}$ och en avståndsupplösning i klassen 15-20 cm. Dessutom kan den reflekterade vågformen samplas i ca 20 punkter, vilket ger ytterligare information om målets geometri. En sådan array med 128×128 element beräknas vara tillgänglig för utvärdering i slutet av 2002 [1]. För automatisk måligenkänning (ATR) har man kommit fram till tumregler som säger att det krävs ca 200 pixlar på målet och 15 cm avståndsupplösning för att ATR-algoritmerna skall fungera väl. I figur 68 visas ett exempel från en bild genererad med Optech ILRIS-3D med ca 20000 pixlar på objektet som har delats ner till 200 pixlar. Figur 69 visar en principskiss av hur ett sådant avståndskännande system skall fungera.



Figur 68. T-72 nerdelad från cirka 95000 pixlar till cirka 200 pixlar på objektet.



Figur 69. Principskiss för en 3-D-laserradar med avståndskännande fokalplanearray.

5.3 Radar

Inom detta område har en när/fjärrfältsstudie gjorts för att undersöka giltighetsområdet hos resultaten som erhållits med fältberäkningsprogrammet FOPOL. En radarmålsökare som belyser ett sammansatt objekt som är mycket större än radarvåglängden (t.ex. mm-vågor mot stridsvagn), kommer vid anflygning från mycket stort avstånd mot objektet så småningom in i dettas *närfält*sområde. Då uppfattar radarn inte längre målet som en ouppöst punkt, som i fjärrfältet, utan uppdelat så att radarreturen ofta verkar komma från mer eller mindre begränsade *spridningscentra*. Returfälten från dessa adderas vid målsökaren; deras interferens kan leda till välkända radareffekter som glittring (engelska *glint*), m.m.

Vid beräkning av radarmålarean från CAD-modeller har vi använt fältberäkningsprogrammet FOPOL. FOPOL använder sig av en *fjärrfältapproximation*, d.v.s. avståndet till det spridande objektet antas vara stort. Eftersom vi här är intresserade av sensorfunktionen i slutfasen som är nära målet har en studie gjorts av närfälts/fjärrfältsförhållanden.

Arbetet som kommer att beskrivas här har utförts för att studera när/fjärrfältsskillnader

- a) som funktion av avståndet,
- b) tvärsiktlinjen för ett antal specifika målavstånd i närfälts- och fjärrfältsområdet.

Den första variationen a) avser att studera hur den av robotantennen totalt insamlade radarreturen ändras som funktion av minskande avstånd (R) mellan radar och mål. Kommer effektens avståndsberoende att avvika från det klassiska $1/R^4$, och i så fall när börjar avvikelser bli märkbara?

Den andra variationen b) avser att se hur returfältet varierar över antennaperturen. Om denna variation är stor är det kanske inte acceptabelt att se ett fältvärde beräknat i en enda punkt med t.ex. FOPOL som representativt för den av en målsökarantenn uppmätta fältet, som ju är en summering av bidrag över antennaperturen.

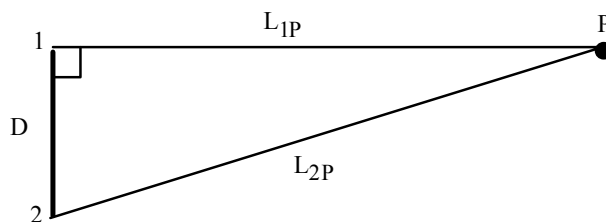
Båda analyserna har gjorts fullpolarimetriskt, d.v.s. det elektriska fältets alla komponenter behandlas (vektoriell behandling av fältet). Undersökningen har baserats på simuleringar vid frekvensen 94 GHz med utnyttjande av en radarmodell av ett stridsvagnslikt mål. Simuleringarna har gjorts med 0,3 m upplösning.

Studien visar att det kan förekomma avsevärda variationer i parametrar som är viktiga vid måligenkänning, då en radarmålsökare förflyttas från långt avstånd i målets fjärrfältsområde in i närfältsområdet. I verkligheten kan man dock använda algoritmer med medelvärdesbildning över ett flertal upplösningceller hos radarn vilket bör minska inverkan av anomalier, varför skillnader mellan närfält/fjärrfält bör minskas så att prestandavärden för måligenkänning förmodligen är hyggligt pålitliga.

5.3.1 Närfält/fjärrfält

Gränsen mellan närfälts- och fjärrfältsområdet för utstrålningen från ett objekt (t.ex. en antenspiegel eller ett belyst målobjekt), har inte något exakt värde; det är snarare fråga om ett övergångsområde [12]. För t.ex. en antenn är i en fjärrfältspunkt avståndet till antennen så stort att avståndsskillnaderna (räknat i våglängder) till antennaperturens olika delar kan försummas. Låt oss kvantifiera denna mening något och definiera ett grovt "gränsavstånd" L_0 med hjälp av figur 70, som visar en antenn med diametern D och en fältpunkt P [13]. Ett vanligt val för L_0 är det avstånd L_{1P} vid vilket L_{2P} överstiger L_{1P} med en kvarts våglängd. Vid avstånd större än L_0 anländer delvågorna från de diametrala punkterna 1

och 2 ungefär i fas till punkt P, och därmed kan man säga att bidragen från alla punkter på antennaperturen (apertur=öppning) är ungefär i fas i P. Vid denna betraktelse använder vi oss av Huygens' princip genom att uppfatta strålningen från antennaperturen som summan av ett antal sfäriska delvågor, som utstrålas av aperturens olika ytelement.



Figur 70. Fjärrfältsområdet för en antenn. Punkten P ligger i fjärrfältsområdet om fasskillnaden mellan delvågor som sänds ut från de diametralt liggande punkterna 1 och 2 på antennens aperturplan är mindre än $\pi/2$, d.v.s. om $L_{2P} - L_{1P} < \lambda/4$.

Enligt figuren får vi

$$L_{2P}^2 = L_{1P}^2 + D^2 \quad \text{Ekv. 5-6}$$

Vid gränsavståndet L_0 fås

$$D^2 = L_{2P}^2 - L_{1P}^2 \approx (L_{2P} - L_{1P})2L_0 = \frac{\lambda}{4} 2L_0 \quad \text{Ekv. 5-7}$$

Alltså är

$$L_0 \approx \frac{2D^2}{\lambda} \quad \text{Ekv. 5-8}$$

Denna formel förekommer också med andra konstanter är 2 i täljaren (ofta 1), beroende på hur stor gångvägsskillnad mellan L_{2P} och L_{1P} man antar vid definitionen av fjärrfältsavståndet. Mer allmänt kan man alltså skriva

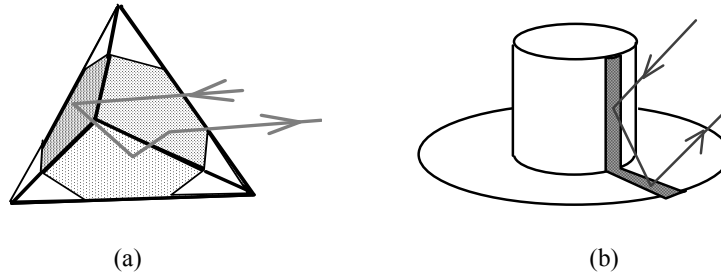
$$L_0 = a \frac{D^2}{\lambda} \quad \text{Ekv. 5-9}$$

där a är ett tal av storleksordningen 1.

5.3.2 Målmodellering för närfälts/fjärrfältsstudium

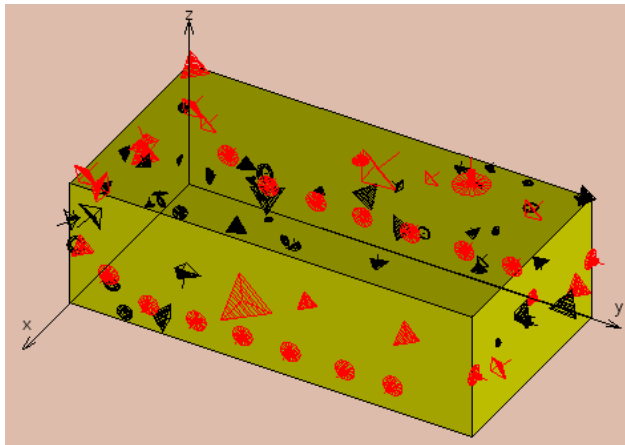
För att på ett hanterbart sätt studera närfältseffekter för ett sammansatt målobjekt, utan långa datorkörningar, måste en förenkling av problemet göras via någon modellansats. Denna bör framhäva egenskaper som är viktiga för tillämpningen, medan övriga egenskaper utelämnas. En sådan modell för mm-vågsmålsökare mot markmål av stridsvagnstyp finns framtagna i andra FOI-projekt, beskrivet senast i [14]. I denna modell byggs målen radarmässigt upp med hjälp av ett antal små reflektorer av enkelt slag, storleksordningen 100 st. De fördelas över målets delar, som antas vara rektangelformade och bilda en lådformad kontur. Två reflektortyper har valts, nämligen cylinderformad hatt, och en trihedral hörnreflektor, med tre vinkelräta, triangulära sidoytor. Figur 71 visar reflektorerna och hur reflektionen sker i dem, beskrivet via strålar, vilket är en god approximation om våglängden är liten i förhållande till reflektorerna. Returspridningen

(fält och målareor) erhålles då med mycket enkla formler, och hela målets returspridning fås genom koherent (fasriktig) summation av de enskilda reflektorernas retur.



Figur 71. De två reflektortyper som valts för modelleringen med diskreta spridningscentra: (a) en hörnreflektor bestående av tre mot varandra vinkelräta, triangulära sidor, och (b) en cylinderhatt. Med antagande om att våglängden är liten jämfört med reflektordimensionerna, kan spridningen analyseras med hjälp av strålar, som i optiken. Triedern ger retro-reflektion efter tre reflektioner ("udda" typ), cylinderhatten efter två ("jämn" typ). Endast en del av respektive reflektor bidrar till radarreturen, som indikerats av de skuggade delarna. De bidragande delarna hos cylinderhatten bildar approximativt en plan dieder.

Reflektorernas typ, antal, storlek och orientering i modellen väljs med stöd av uppmätta signaturer från stridsvagnar. Figur 72 visar ett av målen som modellerats, och som använts för studierna i föreliggande arbete. Det har en Centurion-stridsvagn som förebild. Den detaljerade modelleringen och modellanvändningen finns beskriven i [14]).



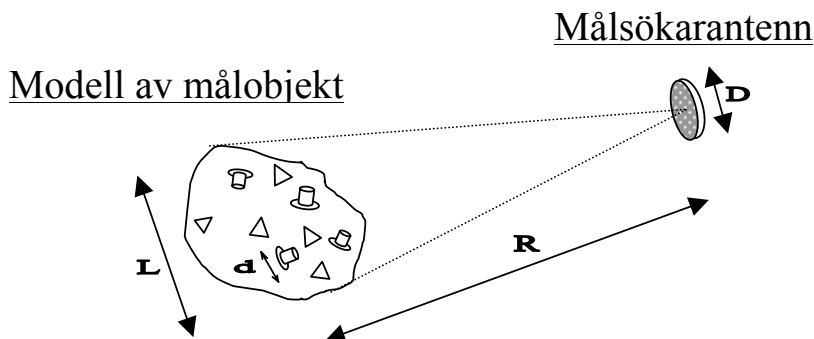
Figur 72. Radarmodell av en stridsvagn med deterministiskt definierade reflektorer (35 st) visade i rött, vilka representerar ordnade geometriska strukturer, t.ex. hjulraderna på båda sidor. Reflektorer som genererats stokastiskt (53 st) är ritade i svart. Triederna (med streckade aperturer) har förstörats fem gånger för att man skall kunna se dem i någon detalj, medan cylinderhattarna är skalriktiga.

Det bör betonas att den beskrivna modelleringen främst gjorts för principiella studier av stridsvagnslika mål, och inte för att försöka erhålla detaljerat representativa modeller för specifika stridsvagnstyper. Modellerna efterliknar egenskapen som nämndes ovan, nämligen att returspridningen hos ett komplext mål ofta kan uppfattas vara alstrad i spridningscentra. En annan väsentlig egenskap är att man med de båda reflektortyperna i

Figur 72 kan beskriva ett måls polarimetriska egenskaper, d.v.s. att målet har olika spridningsegenskaper för olika infallande polarisation hos radarvågen. Vid en modern behandling av radarmål bör denna aspekt beaktas.

5.3.3 Olika fjärrfältsavstånd i modelleringen

Det kan vara befogat att framhålla att det finns flera fjärrfältsavstånd i det modellerade scenariot radar/målobjekt, jfr figur 73.



Figur 73. Modellöversikt. En målsökare med antenndiametern D belyser ett mål på avståndet R . Målet modelleras med diskreta reflektorer med utsträckningen d , tvärsiktlinjen till radarn, medan hela målets motsvarande utsträckning är L . Avståndet R antas mycket större än övriga längdmått.

Vi antar att avståndet till målet, R , är mycket större än antennen och målobjektets utsträckning. Om vi utgår från antennen, blir dess fjärrfältsgrens lika med 28 m enligt (5-9) med $a=1$, för en antenndiameter 0,3 m, och våglängden 3,2 mm (94 GHz). Vi kommer enbart att studera mål i antennen's fjärrfält, d.v.s. $R > 28$ m. Detta innebär att man kan räkna med att den mot målet infallande vågen är sfärisk.

Reflektorerna i målet antas vara ungefär av samma utsträckning som antennen, vilket betyder att denna befinner sig i de enskilda reflektorernas fjärrfält. Varje delretur från en specifik reflektor kan därmed anses utgöra en sfärisk våg då den träffar antennen.

Målet betraktat som en helhet har en mycket större fjärrfältsgrens enligt (5-9). Om vi använder mållängden 7 m för värdet på L i figur 73, blir fjärrfältsavståndet 15 km. Det innebär att de i projektet intressanta avstånden, där inriktning av en verkansinsats är aktuell, kan ligga långt in i målobjektets närfältsområde. De exakta förhållandena avgörs av hur målets delreflektorer (spridningscentra) är fördelade tvärsiktlinjen inom radarns upplösningceller; ovanstående beräkning ger bara en grov övre gräns. De följande simuleringarna avser att ge en mer detaljerad och realistisk bild, med målet uppdelat i avstånds-”luckor” med ett djup lika med avståndsupplösningen hos radarn, som antas vara hög. Varje lucka analyseras separat. Luckor med en enda reflektor kommer att ge en sfärisk returväg vid antennen, alltså ett fjärrfältsförhållande, medan den sammanlagda returen från flera reflektorer i en lucka kan ge närfältseffekter vid mottagarantennen (icke-sfärisk våg, glint, fluktuerande målareor).

Systemparametrar

I tabell 8 ges relevanta systemdata vid de simuleringar som gjorts med de modellerade målen. De variationer som gjorts är av måltypen och azimutvinkeln, förutom avståndet.

Tabell 8. Systemparametrar vid simuleringarna

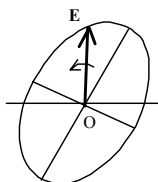
Egenskap	Värde
Sensor	
Frekvens	94,0 GHz
Våglängd (λ)	3,2 mm
Modulation	rektangulär puls
Pulslängd	2 ns
Avståndsupplösning	0,3 m
Antennndiameter (D)	0,3 m
Lobform	rektangulär [1 för $0 \leq \theta \leq 1.2\lambda / (2D)$, 0 för $\theta > 1.2\lambda / (2D)$
3 dB lobbredd, $1.2\lambda / D$	0,73°
Aperturverkningsgrad	0,5
Polarisationskanaler	<u>fullpolarimetrisk</u> , <u>koherent</u> : sänd H och V mottagen H och V
Målobjekt	
Form	”låda”
Dimensioner (längd × bredd × höjd)	7,0 m × 3,6 m × 2,2 m
Typ	1) stridsvagn 2) ospecificerad (slumpad)
Geometri	
Avstånd mål/radar	15 km -> 100 m
Sensorelevation	5°
Sensorazimut	45°, 80°

5.3.4 Spridningsmatrisen och dess vektorisering

Elliptisk polarisation

Det gäller för en våg i ett isotropt och förlustfritt utbredningsmedium (vilket antas vara fallet) att fältstyrkan är transversell, d.v.s. vinkelrät mot utbredningsriktningen. Vi gör

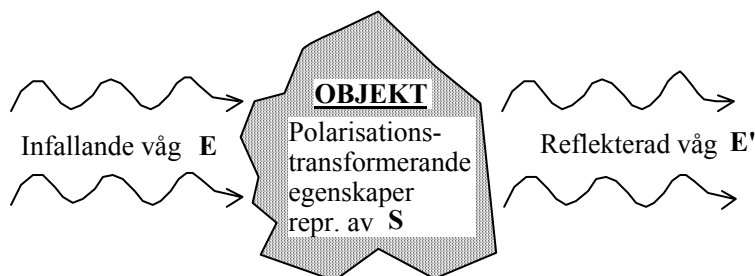
approximationen att betrakta radarvågorna som monokromatiska (sinusformade) i den tänkta tillämpningen. Den allmänna polarisationsformen för en sådan våg är **elliptisk polarisation**, vilket innebär att spetsen hos den elektriska fältstyrkevektor beskriver en ellips (polarisationsellipsen) som funktion av tiden, i en fix punkt i rummet (figur 74). Linjär och cirkulär polarisation utgör specialfall, där ellipsen degenererat till en linje resp. cirkel.



Figur 74. En monokromatisk, plan elektromagnetisk våg är allmänt elliptiskt polariserad. I en observationspunkt O i rummet beskriver den elektriska fältstyrkevektorns (E) spets hos den passerande vågen en ellips som funktion av tiden. Ellipsen ligger i ett plan vinkelrätt mot vågens utbredningsriktning.

Spridningsmatrisen

En polarimetrisk beskrivning av spridningen av en radarvåg i ett målobjekt enligt figur 75 görs med den s.k. spridningsmatrisen (eller synonymt polarisationsmatrisen).



Figur 75. Schematiskt spridningsförlopp, då ett radarmål träffas av en infallande våg. Den elektriska fältstyrkan betecknas med E .

Om man gör antagandet att den infallande plana vågen sprids linjärt av målet, och att fältet är transversellt kan man skriva komponenterna hos den spridda vågen som en linjärkombination av den infallande vågens komponenter enligt

$$E'_1 = s_{11}E_1 + s_{12}E_2$$

$$E'_2 = s_{21}E_1 + s_{22}E_2 \quad \text{Ekv. 5-10}$$

Här är E'_1, E'_2 och E_1, E_2 (de komplexa) vektorkomponenterna hos den reflekterade resp. infallande vågen i ett koordinatsystem som ligger i ett plan vinkelrätt mot utbredningsriktningen. Problemet är tvådimensionellt. De fyra komplexa talen $s_{11}, s_{12}, s_{22}, s_{21}$ beskriver spridningen. [Radarmålarean σ är proportionell mot kvadraten av respektive koefficients belopp, t.ex. $\sigma_{11} \propto |s_{11}|^2$].

Vi har alltså en matrisekvation

$$\mathbf{E}' = \mathbf{S}\mathbf{E}. \quad \text{Ekv. 5-11}$$

Här är

$$E' = \begin{pmatrix} E'_1 \\ E'_2 \end{pmatrix} \text{ och } E = \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \end{pmatrix} \quad \text{Ekv. 5-12}$$

och spridningsmatrisen (eller polarisationsmatrisen) ges av

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{21} & s_{22} \end{pmatrix} \quad \text{Ekv. 5-13}$$

Matriselementen i $\mathbf{S}$ hanterar absoluta fasrelationer; beskrivningen är **koherent**. Det krävs alltså 8 reella tal för att beskriva spridningen i målet. Beskrivningen är *fullständig* i den meningen att det inte ger någon ytterligare information att känna till matriselementen för någon annan polarisationskombination infallande/reflekterad våg än 11,22,12,21, t.ex. någon cirkulär kombination. Dessa går att beräkna ur $s_{11}, s_{12}, s_{22}, s_{21}$. I de flesta monostatiska fall gäller reciprocitet, och spridningsmatrisen blir då symmetrisk med $s_{12} = s_{21}$ med en i radarsammanhang vanlig koordinatsystemkonvention, se [15] s. 40-41, [19].

I och för sig skulle man kunna undersöka spridningsmatrisens element med avseende på frågeställningarna som formulerades i inledningen av detta avsnitt 5.3, men i detta arbete skall vi studera ett annat parameterintervall enligt följande.

Målvektorn

Ett framsteg i vår förståelse av hur man bäst skall kunna extrahera fysikalisk information från den klassiska spridningsmatrisen har varit att införa systemvektorer [16], [17], [18], [19]. Man utvecklar spridningsmatrisen i en viktad summa av en uppsättning 'bas'-matriser, där dessa väljs med tanke på någon önskvärd egenskap, t.ex. att ge en enkel analys eller vara fysikaliskt relevanta. Koefficienterna i utvecklingen bildar komponenterna i systemvektorn, en komplex målvektor eller spridningsvektor², $\mathbf{k}$, som utgör en koherent målbeskrivning, då den bibehåller spridningsmatrisens absoluta fasinformation. Ett ofta använt basystem är Pauli-matriserna [20].

$$\sigma_0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \sigma_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \quad \sigma_2 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad \sigma_3 = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix} \quad \text{Ekv. 5-14}$$

Dessa matriser är fullständiga och ortogonala, men inte normerade eftersom

$$\text{Tr} \sigma_\mu \sigma_\nu^\dagger = 2 \delta_{\mu\nu}, \quad \mu, \nu = 0, 1, 2, 3, \quad \text{Ekv. 5-15}$$

där † anger transponering och komplexkonjugering. Tr är förkortning för eng. "Trace", matrisens spår, summan av diagonalelementen. [Normen för en matris $\mathbf{A}$ är $\sqrt{\text{Tr}(\mathbf{A}^\dagger \mathbf{A})} = \sqrt{\text{Tr}(\mathbf{A} \mathbf{A}^\dagger)}$.] Vid valet av uppsättningen Paulibasmatriser, måste man normera på ett korrekt sätt, så att systemvektorn och spridningsmatrisen blir ekvivalenta målbeskrivningar.

I fallet med en symmetrisk spridningsmatris ser man att den kan skrivas som en viktad summa av enbart de tre första Pauli-matriserna

² Det verkar inte finnas någon allmän vedertagen benämning

$$\mathbf{S} = \left[\frac{s_{11} + s_{22}}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} + \frac{s_{11} - s_{22}}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} + s_{12} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \right] \quad \text{Ekv. 5-16}$$

Målvektorn blir en 3-dimensionell vektor vars komponenter utgörs av utvecklingskoefficienterna framför respektive Pauli-matris i (5-16), normerade på lämpligt sätt. Normeringen bestäms så att målvektorns norm skall vara lika med spridningsmatrisens norm,

$$|\mathbf{k}|^2 = \mathbf{k}^\dagger \mathbf{k} = \text{Tr}(\mathbf{S}\mathbf{S}^\dagger) = |s_{11}|^2 + 2|s_{12}|^2 + |s_{22}|^2 \quad \text{Ekv. 5-17}$$

Denna normering uttrycker att man håller den totalt tillgängliga effekten från målet invariant mellan de båda målbeskrivningarna, då målet belyses med två ortogonalt polariserade antenner. Man får med denna normering Paulispridningsvektorn

$$\mathbf{k} = \begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} s_{11} + s_{22} \\ s_{11} - s_{22} \\ 2s_{12} \end{pmatrix} \quad \text{Ekv. 5-18}$$

[Man noterar att de tre Paulimatriserna som uppträder i (5-16) kan tolkas som spridningsmatriserna hos tre enkelspridare, där den första är en plan yta, den andra och tredje diedrar med orienteringen 45° relativt varandra. Viktskoefficienterna framför, som utgör komponenterna i målvektorn, anger därmed hur mycket karaktär av respektive enkelspridare som det aktuella målet har].

Likhetsparametern

Den definierade målvektorn kan användas för att jämföra hur lika två spridningsmatriser är, genom att man med hjälp av skalärprodukten mellan motsvarande två målvektorer bildar en *likhetsparameter* (engelska *similarity parameter*) som utgör ett mått på korrelationen mellan de båda spridningsmatriserna [21]. Vi övertar här definitionen i [21], som är kvadraten på en korrelationskoefficient och kan anta värden mellan 0 och 1, dock med en annorlunda normering.

I vårt fall vill vi först och främst jämföra spridningsvektorn $\mathbf{k}_1$ för ett löpande avstånd R med samma vektor $\mathbf{k}_2$ på ett konstant, mycket stort avstånd i fjärrfältet. Vi använder normen för denna senare vektor för normering av likhetsparametern, som vi definierar som

$$r(\mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2) = \frac{|\mathbf{k}_1^\dagger \mathbf{k}_2|^2}{\|\mathbf{k}_2\|_2^4} \equiv r_R, \quad \text{Ekv. 5-19}$$

där $\|\cdot\|_2^2$ betecknar kvadratsumman av absolutvärdena hos vektorns komponenter. Den så definierade koefficienten kan anta värden större än 1. [[21]. har normeringen $\frac{\|\mathbf{k}_1\|_2^2 \|\mathbf{k}_2\|_2^2}{\|\mathbf{k}_1\|_2^4 \|\mathbf{k}_2\|_2^4}$ i nämnaren av (5.19), vilket innebär att man normaliserar bort skillnader i målstorlek, vilket är lämpligt i deras tillämpning.].

Vi vill göra en andra jämförelse med hjälp av likhetsparametern, av hur representativt fältet i aperturcentrum är för det integrerade fältet (eller medelvärde) över aperturytan. En integration av bidragen från aperturens delement efterliknar den automatiska summering, som i verkligheten fås i en antenn, av bidragen från det infallande fältet inom aperturens olika delar. Det är inte realistiskt att efterlikna en sådan summering över en antennapertur

med programmet FOPOL, eftersom det skulle kräva orälistiska beräkningstider, utan fältet i aperturcentrum tas där att representera summan över aperturen, och används för att beräkna (fjärrfälts)målären. Med målmodelleringen enligt avsnitt 5.3.2 kan en realistisk undersökning göras av hur stort fel som begås vid denna procedur. Vi jämför spridningsmatrisen, S_0 , erhållen ur fältberäkningar i aperturcentrum för olika polarisationskombinationer, med en över aperturen medelvärdesbildad (summerad) spridningsmatris $\bar{S}$; jämförelsen görs genom att bilda

$$r(S_0, \bar{S}) = \frac{|\bar{k}^\dagger k_0|^2}{\|\bar{k}\|_2^4} \equiv r_0, \quad \text{Ekv. 5-20}$$

där $k_0, \bar{k}$ är målvektorerna svarande mot spridningsmatriserna S_0 resp. $\bar{S}$ enligt (5-18) och där $\|\cdot\|_2^2$ betecknar kvadratsumman av absolutvärdena hos vektorns komponenter.

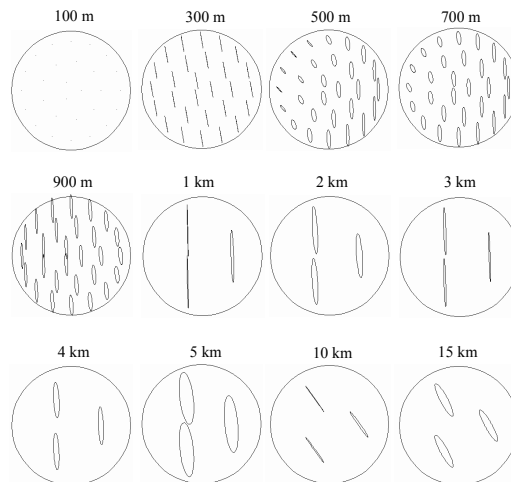
5.3.5 Resultat: variation hos aperturfält, likhetsparameter och målären från fjärr- till närfält

I detta avsnitt ges en åskådlig illustration av fältbilden hos radarreturen över antennaperturen, för olika avstånd i målobjektets när- och fjärrfält. Även en mer kvantitativ jämförelse görs av variationer från fjärr- till närfältsområdet med hjälp av likhetsparametern (se ovan) med målären i olika polarisationer.

Aperturfält

Bildserien i Figur 76 illustrerar hur den mottagna radarreturen från en upplösningcell hos radarn (avståndslucka) varierar över aperturplanet hos robotantennen, som belyser ett stridsvagnsmål på olika avstånd mellan 100 m och 15 km, i samma elevationsriktning, 5°, sett från målcentrum. Azimutriktningen är 45° från framriktningen. Fältet har beräknats polarimetriskt med användning av målmodelleringen enligt avsnitt 5.3.2. Målet är ett stridsvagnsliknande mål med Centurion som förebild (mål nr 1 i [14]). För en viss utsänd polarisation (H eller V) beräknas det mottagna fältet komponentvis, i de olika punkterna över aperturen. Det som därvid varierar från punkt till punkt är gångvägen från reflektorerna (som geometriskt behandlas som punktstrålare) till resp. punkt på aperturen. Gångvägsskillnaderna motsvarar fasskillnader, vilket medför att den summerade fältstyrkekomponenten från samtliga reflektorer inom avståndsluckan skiljer sig från punkt till punkt, och polarisationsellipsen kan ändras till storlek och form. Speciellt stor blir variationen om avståndsluckan innehåller interfererade reflektorer av ungefär samma storleksordning. Det utvalda exemplet i figur 76 representerar ett sådant fall. Som kommer framgå har de flesta avståndsluckor mindre variationer. I luckor med en enda dominerande reflektor uppstår ingen interferens och därmed inga variationer enligt figur 76.

Som diskuterades i avsnitt 5.3.3 ligger målet i antennens fjärrfält för de visade avstånden, medan roboten ligger inom målets närfält (gränslinjen närfält/fjärrfält antas D^2/λ). Man ser att fältet delvis är klart inhomogent över aperturen, tydligast för intervallet $\approx 500 - 900$ m. Även förändringen av returellipsernas form och orientering som funktion av avståndet sker snabbast inom detta intervall. Att inhomogeniteten skenbart minskar för de kortaste avstånden beror på att antennen där löser upp målet i vinkelled, så att endast en enda (eller ingen) reflektor bidrar till radarreturen, vilket medför att inga interferenseffekter mellan reflektorer uppstår (ingen ”glint”).

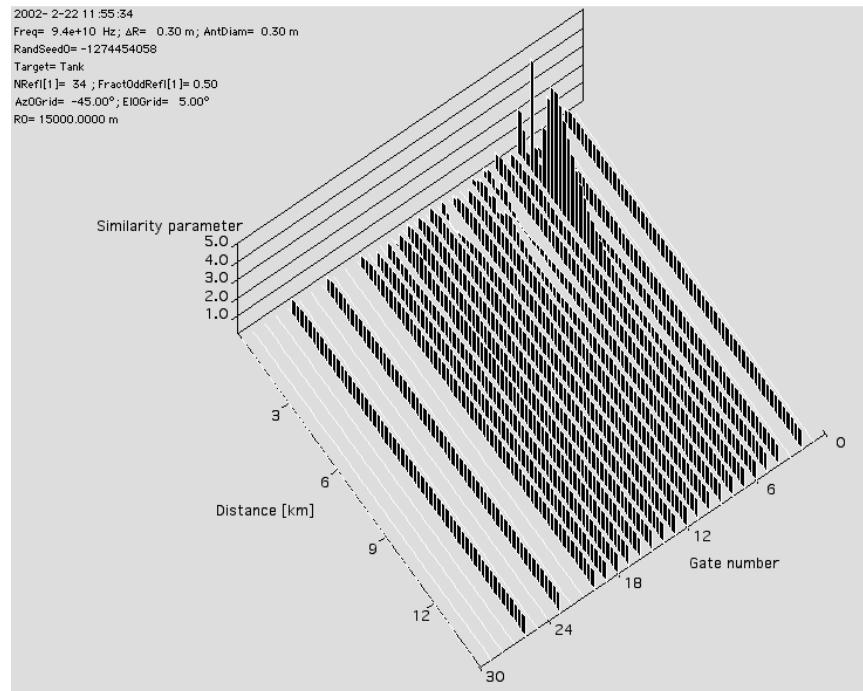


Figur 76. Polarisationsellipsens utseende hos radarreturen i olika punkter över antennens aperturplan för olika avstånd från det stridsvagnsliknande målet. Returen alstras av reflektorer inom en och samma avståndslucka med 0.3 m djup. Ellipserna är sedda i returvägens utbredningsriktning, in mot antennaperturen. För avstånd mindre än 1 km visas ellipser i 28 punkter på aperturen, med ellipserna centrerade på fältpunkten; för de längre avstånden 1 - 15 km är antalet punkter på aperturen 3. Skalan för alla utritade ellipser är densamma för ett visst avstånd, däremot ändras den från ett avstånd till nästa för att få en lämplig ellipsstorlek i figurerna. Polarisationen är vertikal vid sändning. Den visade avståndsluckan uppvisar de starkaste variationerna av samtliga luckor (jfr nästa avsnitt). Avstånd över 15 km ger obetydliga förändringar jämfört med 15 km.

Likhetsparameter och målarea

Figur 77-78 visar variationen i varje avståndslucka längs målet av likhetsparametrarna r_R och r_0 definierade i (5-19) och (5-20), som funktion av robotens avstånd från målet, mellan 100 m och 15 km, för samma målobjekt som i föregående avsnitt (stridsvagn), och för samma robotposition relativt målet: 5° elevation och 45° azimuthvinkel räknat från fordonets framriktning. Figur 79-81 visar motsvarande figurer för radarmålareorna σ_{VV} , σ_{HH} , σ_{VH} , där index anger kombinationen sänd/mottagen polarisation.

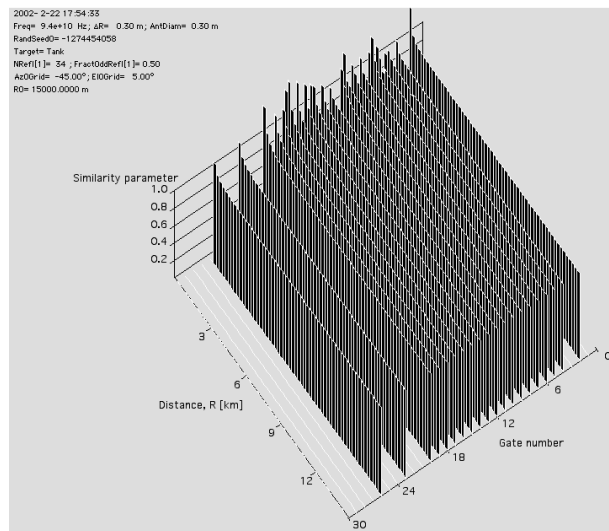
En ensam punktspridare har ett $1/R^4$ -beroende för både likhetsparametrar och målareor. Ett sådant beroende har normaliserats bort i figurerna, eftersom vi inte är ute efter absolutvärden, utan avvikelser från ett enkelt radarmåls karakteristika. Flera luckor har ett $1/R^4$ -beroende enligt figurerna.



Figur 77. Likhetsparametern r_R [definierad i 5-19] som funktion av avståndet R mellan radar och det modellerade stridsvagnsmålet. Radarns elevation och azimuthvinkel relativt fordonets framriktning är konstanta, 5° resp. 45° . Likhetsparametern uttrycker korrelationen mellan spridningsmatrisen på det löpande avståndet R och spridningsmatrisen på mycket stort avstånd (fjärrfält), här valt till 15 km. Ett allmänt $1/R^4$ - beroende, som gäller för målarean hos en ensam punktspridare har normaliserats bort hos r_R . Varje avståndslucka är individuellt visad. Totalt 26 st luckor av djupet 0.3 m (avståndsupplösningen) täcker hela fordonets utsträckning i djupled. Luckskalan i figuren kan alltså omvandlas till meterskala genom multiplikation av graderingen med 0.3.

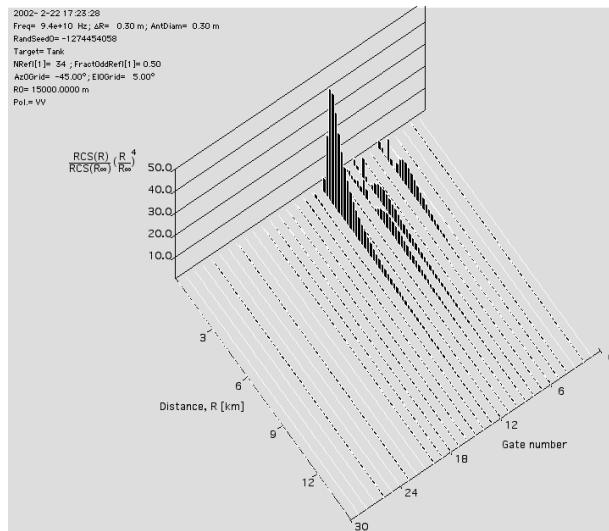
Figuren visar att stora fluktuationer kan börja uppträda hos r_R med minskande avstånd i vissa avståndsluckor, orsakade av att gångvägsskillnaden för radarreturen från ungefär lika stora reflektorer i en och samma avståndslucka genomlöper multiplar av våglängden då R ändras i stridsvagnens närfältområde. Lucka 6 uppvisar de starkaste fluktuationerna, som med minskande avstånd först manifesteras av en allmän långsamt ökande avvikelse från ett punktmåls $1/R^4$ -beroende. Detta markerar förekomsten av mer än en reflektor i avståndsluckan (två ungefär lika stora cylinderhattreflektorer, se vidare figur 83). Ett oscillerande mönster uppträder för avstånd under ca 2 km på grund av nämnda förändringar av gångvägsskillnader.

För luckor med en enda dominerande reflektor är parametern ≈ 1 för hela det undersökta avståndsintervallet. Några luckor utan reflektorer uppträder utan signal. (lucka 1,3,21,22,24,25).

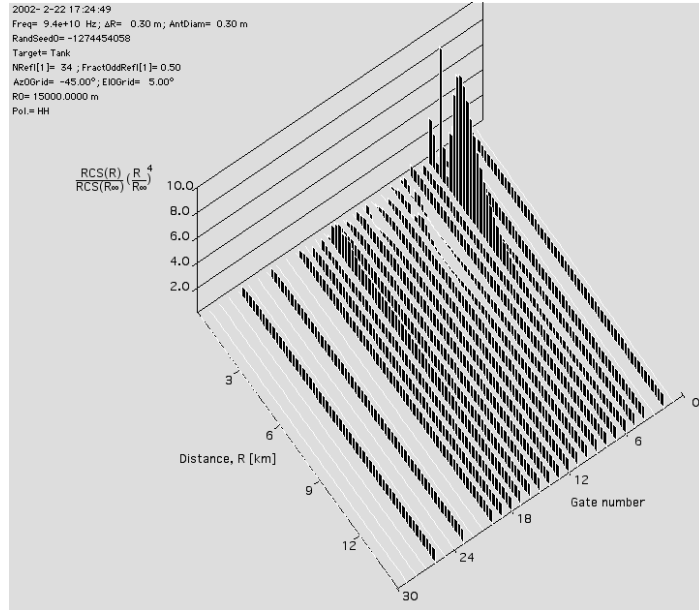


Figur 78. Likhetsparametern r_0 [definierad i (5-20)] som funktion av avståndet R mellan radar och det modellerade stridsvagnsmålet. För ett visst avstånd är parametern ett mått på fältets homogenitet över antennaperturen. Övriga figurdata är som i figur 77.

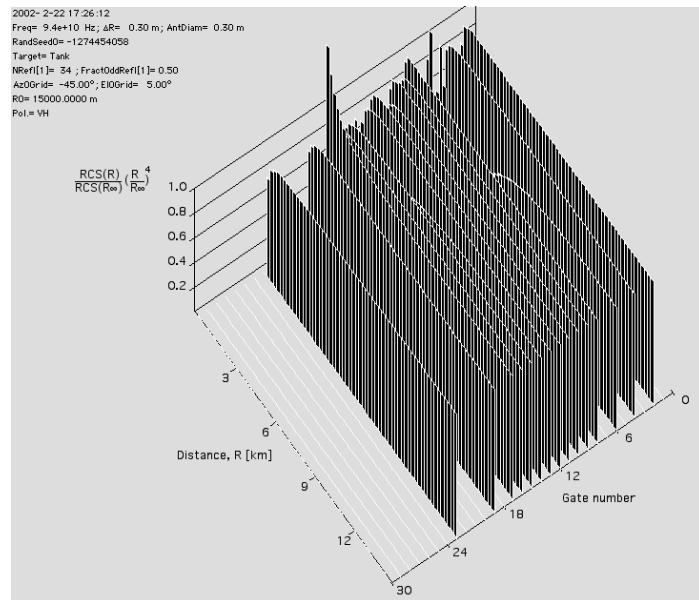
Man ser att endast för de kortaste avstånden mindre än ca 1 km fås tydliga avvikelser från parametervärdet 1, som gäller för ett homogent fält.



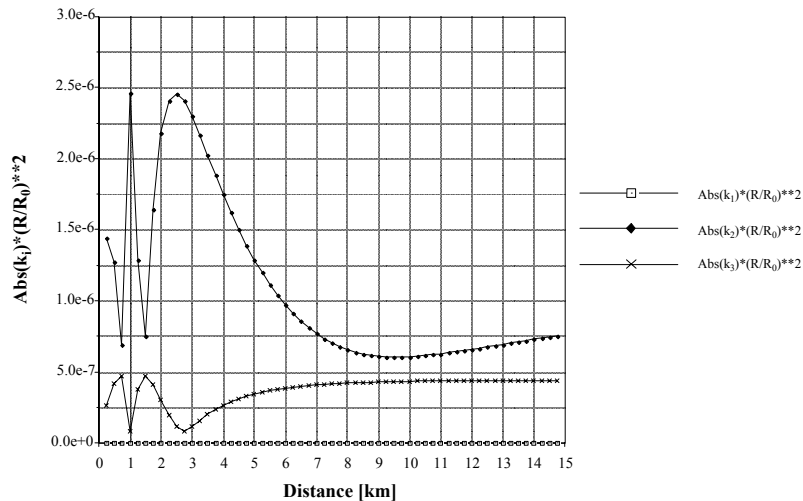
Figur 79. Radarmålarean i de individuella avståndsluckorna som funktion av avståndet, $RCS(R)$, normaliserad med radarmålarean $RCS(R_\infty)$ på mycket stort avstånd R_∞ (fjärrfältsvärdet), där R_∞ tagits till 15 km. Dessutom har ett allmänt $1/R^4$ -beroende, som gäller för en ensam punktspridare normaliserats bort. Polarisationen är vertikal vid sändning och mottagning (VV).



Figur 80. Radarmålarean i de individuella avståndsluckorna som funktion av avståndet, där samma normalisering gjorts som i figur 79. Polarisationen är HH.

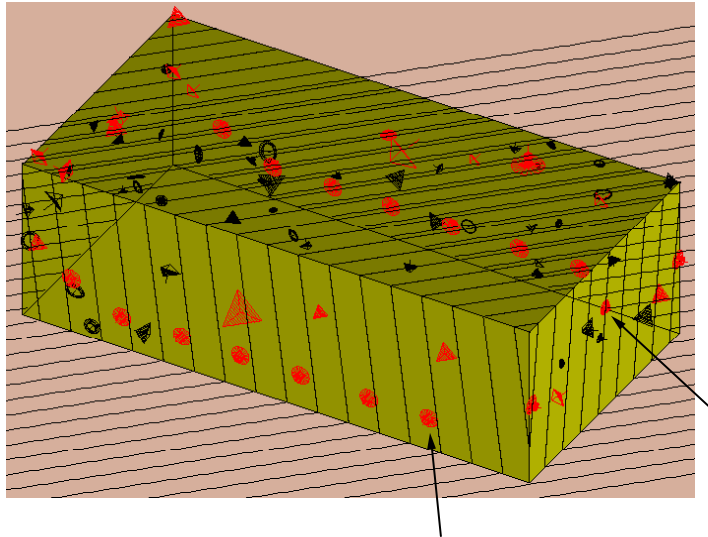


Figur 81. Radarmålarean i de individuella avståndsluckorna som funktion av avståndet, där samma normalisering gjorts som i figur 79. Polarisationen är VH.



Figur 82. Avståndsberoendet hos absolutvärdena hos de tre komponenterna k_1, k_2, k_3 hos spridningsvektorn för avståndslucka 6, som uppvisar de största fluktuationerna (jfr figur 77). En normalisering av värdena har gjorts med $(R/R_0)^2$, för att eliminera det förväntade $1/R^2$ -beroendet hos en punktspridare. Endast komponenterna $k_2, k_3 \neq 0$, vilket betyder att radarreturen från avståndsluckan enbart har diederkaraktär, jfr kommentaren i anslutning till ekv. (5-18).

Lucka 6 uppvisar enligt figur 77-81 det kraftigaste fluktuationsmönstret. Figur 82 visar absolutvärdet av spridningsvektorns $\mathbf{k}_1$ [se ekv. (5-18)] tre komponenter för denna lucka som funktion av avståndet. Värdena har normaliserats med ett förväntat $1/R^2$ -beroende för en punktreflektor, genom multiplikation med $(R/R_0)^2$, där $R_0 = 15$ km. De tre komponenternas avståndsberoende återfinnes i skalärprodukten i täljaren i (5-19) och därmed också i likhetsparametern. Komponenterna anger enligt kommentaren i anslutning till ekv. (5-18) hur mycket karaktär av returspridning från en plan yta, en dieder med lutningsvinkeln 0 relativt horisonten respektive en dieder med lutningen 45° , som ligger i radarreturen från lucka 6. Eftersom den första komponenten k_1 är noll för hela avståndsintervallet, har returspridningen enbart diederkaraktär. Som en slutlig geometrisk kontroll av denna analytiska slutledning visar figur 83 målmodellen, med den aktuella indelningen i avståndsluckor. Avståndslucka 6 innehåller tre cylinderhattreflektorer av vilka två har ungefär samma målarea, medan den tredje är mindre. Det är avståndsberoendet hos interferensen mellan de båda största reflektorerna (markerade med pilar i figuren) som återfinns som variationer i similaritetsparametern i figur 77. Reflektorerna representerar det främsta högra drivhjulet respektive eldrörets infästning i tornet.



Figur 83. Stridsvagnsmodellen med avståndsluckornas fördelning över vagnen då radarn belyser vagnen från elevationsriktning 5° och azimutriktning 45° från fordonets framriktning. Som diskuteras i texten uppträder fluktuationer i likhetsparametern och målareor starkast i en lucka (nr 6 i figur 77-81), där det finns två ungefär lika stora radarreflektorer av cylinderhattyp, markerade med pilar i figuren. Avståndsberoende interferenser mellan radarreturerna från dessa orsakar fluktuationerna.

5.3.6 Slutsatser av när/fjärrfältsstudien

Studien har visat att det kan förekomma avsevärda variationer i parametrar som är viktiga vid måligenkänning, då en radarmålsökare förflyttas från långt avstånd i målets fjärrfältsområde in i närfältsområdet. Undersökningen har baserats på simuleringar vid frekvensen 94 GHz med utnyttjande av en radarmodell av ett stridsvagnslikt mål. Dessa visar att för ett mål av denna storlek ligger övergången mellan när/fjärrzon på ca 15 km avstånd, i god överensstämmelse med en välkänd formel för uppskattning av detta avstånd. Då målsökaren är nere på mindre än en eller ett par km:s avstånd kan fluktuationerna i enskilda avståndsupplösningceller av radarn bli mycket stora. De flesta upplösningceller uppvisar dock små variationer.

Även om studien baserar sig på ett enda specifikt målfall, är den fysikaliska mekanismen bakom fluktuationerna generell och välkänd under en målsökares slutfas: radarinterferens mellan ungefär lika stora delreflektorer inom målet. Mekanismen ger bl.a. upphov till det välkända radarglitringsproblemet. Slutsatserna bör därför vara representativa för stridsvagnsmål i allmänhet. Mycket hög avståndsupplösning minskar möjligheterna för uppkomsten av fluktuationerna, eftersom sannolikheten för förekomsten av ungefär lika stora, dominerande radarreflektorer inom samma upplösningcell minskas. Simuleringarna har gjorts med 0,3 m upplösning, men i projektet skall även 0,1 m upplösning studeras.

Den primära frågeställningen som uttrycktes i Inledningen, om fältberäkningar med FOPOL-programmet (som ger fjärrfältsvärden) kan användas för måligenkänningsstudier i närfältszonen, kan preliminärt besvaras på följande sätt. Prestandavärden för måligenkänning är förmodligen hyggligt pålitliga, bl.a. därför att det är rimligt att i verkligheten använda algoritmer med medelvärdesbildning över ett flertal upplösningceller hos radarn. Inverkan av anomalier bör minskas av denna process, varför skillnader mellan närfält/fjärrfält bör minska. Man bör emellertid vara uppmärksam på problemet och undersöka det vidare. I ett första steg kan detta göras genom att man använder det utvecklade modelleringsprogrammet (avsnitt 5.3.2) i en utökad studie med

fullständig prestandaberäkning, där man använder fjärrfältsdata i målobjektets närfält, alltså en simulering av FOPOL-förfarandet. De prestandavärden man får fram jämförs med dem som erhålles med en korrekt fältberäkning för varje individuellt avstånd. Om skillnaderna blir avsevärda måste en annan fältberäkning göras än den aktuella med FOPOL, men för närvarande finns inget alternativt beräkningsprogram för fältberäkningar av de aktuella CAD-beskrivna målen.

6 Sammanfattning och slutsatser

Arbetet som redovisats i denna rapport behandlar flera olika områden som är mycket viktiga för ett intelligent verkanssystem. I rapporten har en del av det arbete som utförts under år 2002 beskrivits, vilket innefattar: signalbehandling, precisionsstyrning, målbibliotek och sensorinventering.

Uppbyggnaden av en simuleringsmiljö för IR- och laserradarsensorer har beskrivits. Denna simuleringsmiljö kommer att kraftigt underlätta testning av objektigenkänningsalgoritmer som under ett annalkandeförlopp försöker att känna igen markfordon från skilda orienteringar mot varierande bakgrunder.

Analys och bearbetning av laserdata som tidigare har samlats in i projektet har utförts under året. Från det inskannade data har totala lasermålarean, medelreflektans, tvärsnittsarea m.m. beräknats, vilket sedan kan presenteras i polärplottar. Arbeta har även utförts för att generera geometriska modeller av de uppmätta stridsfordonen vilket kommer att användas i simuleringsmiljön för IR- och laser.

Radarsignaturberäkningar på CAD-modeller av stridsfordon har beskrivits, samt en algoritm för beräkning av polarimetriska särdrag från dessa radarsignaturer. Dessa särdrag ska användas vid kommande klassificeringsstudie.

Arbetet som bedrivits inom precisionsstyrning har fokuserat på att undersöka hur noggrant position, riktning/orientering och hastighet kan skattas hos ett markmål. Ett viktigt mål för ansatsen är att senare kunna beskriva hur bomavståndet påverkas av olika sensorparametrar och styrbarheten hos verkansdelen.

Rapporten har även visat den aktuella strukturen på mål/signaturbiblioteket som håller på att byggas upp inom projektet. Målsättningen med målbiblioteket är att underlätta för kommande forskningsarbete inom olika forskningsområden såsom: måligenkänning, datafusion etc. Målbiblioteket kommer att innehålla data från flera olika sensorer som laser, IR och radar, och på sikt är det tänkt att biblioteket ska innehålla signaturer med våglängder från UV t.o.m. mikrovågor (radar). Biblioteket kommer att innehålla både uppmätta signaturer från fältförsök och simulerade signaturer.

Arbetet inom sensorinventeringen som beskrivits i rapporten ger en kort genomgång av några våglängdsband och några sensortyper, med fokusering på deras lämplighet för en målsökare i slutfasen.

En studie av när/fjärrfält har utförts för att undersöka om radarsignaturberäkningarna är giltiga även på korta avstånd då målsökaren befinner sig i närfältsområdet. Studien visar att det kan förekomma avsevärda variationer i parametrar som är viktiga vid måligenkänning, då en radarmålsökare förflyttas från fjärrfältsområde in i närfältsområdet. Algoritmer med medelvärdesbildning bör dock kunna minska inverkan av anomalier, varför skillnader mellan närfält/fjärrfält bör minskas så att prestandavärden för måligenkänning förmodligen är hyggligt pålitliga.

7 Fortsatt arbete

Det fortsatta arbetet i projektet kommer i huvudsak att bestå i en fortsatt utveckling av metoder och algoritmer för att bearbeta data från IR-, laser- och radarsensorer för att undersöka viktiga frågeställningar för intelligenta verkanssystem såsom:

- Måligenkänning
- Estimering av målorientering
- Prediktion av målets kinetik
- Sensoråterkopplad styrning
- Datafusion

Studierna ska identifiera kritiska parametrar i intelligenta verkanssystem vilka sedan ska kvantifieras. Exempel på sådana parametrar är:

- Avstånd för måligenkänning
- Noggrannhet vid bestämning av mål
- Tid för måligenkänningen
- Noggrannhet vid bestämning av träffpunkt

Inom precisionsstyrning ska de krav som ställs på styrsystemet i verkanssystemet studeras och analyseras. Olika styrfall ska klassificeras och olika styrmetoder ska undersökas. Centralt är målets osäkerhet i positions-, hastighets- och orienteringsestimat och hur de är relaterade till sensorparametrar och sensorernas styrning. Notera problemställningens dualitet; på korta avstånd har sensorerna bättre upplösning men möjligheterna att påverka trajektorian är små. På stora avstånd finns bra möjligheter att ändra banans slutpunkt men sensorernas upplösning och S/N (signal-brus förhållande) är sämre. Styr banan i t.ex. spiral in mot målet finns ett direkt motsatsförhållande mellan informationsextraktion och styrning. Dessa viktiga "trade off" skall analyseras kvantitativt men med förenklade modeller.

8 Referenser

- [1] Richmond, R.: AFRL Wright Laboratory, "*Personlig kommunikation*".
- [2] Larsson, C, Ljung, S.: "*Polex: Beskrivning och verifiering*", FOA-D—94-00040-3.2—SE november 1994
- [3] Eriksson, J, Sandström, S-E.: "*Vidareutveckling av programvara för fasettbaserad fysikalisk optik*", FOA-R--95-00148-3.2--SE juni 1995.
- [4] Jonas Rahm (information).
- [5] Gustafsson, M.: "*Radarmålareaoptimering av en UAV*", FOI—0023—SE, januari 2001.
- [6] Helstrom, C.: "*Elements of signal detection & Estimation*", Englewood Cliffs, Prentice Hall, 1995.
- [7] Internet www.army-technology.com
- [8] Internet www.ee.uwa.edu.au/~mrg/Research/johnd_merc.html
- [9] Internet www.wescam.com
- [10] Internet www.cmccicnci.com
- [11] Internet: www.surfaceoptics.com
- [12] Kristensson, Gerhard.: "*Spridningsteori med antenntillämpningar*", 2 uppl. Lund, Studentlitteratur, 2001.
- [13] Crawford, M.H: Wave.: "*Berkely Physics Course*", vol.3, New York: McGraw-Hill, 1968, 600 s.
- [14] Sume, Ain.: "*Recognition of Ground Targets with Polarimetric Seeker Radar at 94 GHz*", Linköping: FOI-R—0180—SE, 58s, september 2001.
- [15] Huynen, J.R.: "*Phenomenological Theory of Radar Targets*", Ph.D. Thesis, Delft Technical University, Rotterdam, 1970. First Revision. Los Altos Hills, California: P.Q. Research, 216 s, s40-41, november 1987.
- [16] Huynen, J.R.: "*Towards a Theory of Perception for Radar Targets*", i W-M Boerner, Inverse Methods in Electromagnetic Imaging, Part 2, s797-822, Reidel 1985.
- [17] Cloude, S, R.: "*Polarimetry, The Characterization of Polarisation Effects in EM Scattering*". Ph.D. Thesis, University of Birmingham, 1986.
- [18] Cloude, S, R.: "*Uniqueness of Target Decomposition Theorems in Radar Polarimetry*", i W-M, Boerer (red), Direct and Inverse Methods in Radar Polarimetry, Part 1, s267-296, Dordrecht, Kluwer, 1992.
- [19] Cloude, S, R, Pottier, E.: "*A Review of Target Decomposition in Radar Polarimetry*", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol GES-34, s. 498-518, mars 1996.
- [20] Arfken, George, B, Weber, Hans J.: "*Mathematical Methods for Physicists*". San Diego, Academic Press, 1995, 1029s.

-
- [21] Yang, J, Peng, Ying-Ning, Lin, Shi-Ming.: *"Similarity between two scattering matrices"*, Electronics Letters, vol 37, No 3, februari 2001.
- [22] Sume, Ain.: *"Radarreturen från ett system av diskreta reflektorer"*, Linköping: FOA Rapport A30064-33, 100s, augusti 1992.
- [23] Sume Ain, Eriksson, Mikael.: *"Polarimetrisk målkaraktisering med radar, tillämpad på flygplansmodell och sfäroid"*, Linköping: FOA-D—96—00298-3.3—SE, 43s, december 1996.
- [24] Johansson, Conny, Sume Ain.: *"Polarimetrisk kalibrering av koherent radar med tillämpning vid 94 GHz"*, Linköping: FOI-R—0161—SE, 77s, augusti 2001.
- [25] Huynen, J, R.: *"Physical relevance in radar target polarimetry"*, Proceedings of the Second International Workshop on Radar Polarimetry, JIPR 92, Nantes: IRESTE, 1992.
- [26] Bickel, S, H.: *"Some invariant properties of the Polarization Scattering Matrix"*, Proceedings of the IEEE, vol. 58, no 8. s. 1070-1072, augusti 1965.
- [27] Svensson, T.: *"Okylta IR-sensorer – marknadsöversikt och tillämpningar"*, FOI-R—0391--SE, januari 2002.
- [28] Holm, L.: *"IR-systemstudie för sensoraktiverade skydd"*, FOI-R—0288—SE, december 2001.
- [29] Karlsson, M, Lauberts, A, Letalick, D, Nilsson, S, Nygårds, J.: *"Laserradar/IR/Millimetervågsradar i målsökare"*, FOA-R—00—01552-314—SE, juli 2000.
- [30] Steinvall, O, Letalick, D.: *"The Potential of Combined active and passiv electrooptical sensors"*, FOA-R—00—01605-408—SE.
- [31] Hågård, A.: *"Optisk Transmission i Atmosfären"*, kurskompendium, april 1998.
- [32] Goody, R, M, Yung, Y, L.: *"Atmospheric Radiation"*, Oxford University press 1995.
- [33] Kreipels, K, Driggers, R, G, Vollmerhausen, R, H, Kopeika, N, S, Halford, C, E.: *"Atmospheric turbulence modulation transfer function for infrared target acquisition modelling"*, Opt Eng 40(9), 1906-1913, september 2001.
- [34] Klasén, L, Steinvall, O, Bolander, G, Elmqvist, M.: *"Grindad avbildning – Inledande prov vid långa avstånd"*, FOI—0302-SE, december 2001.
- [35] Hogan, H.: *"Hard Photonics Problems require soft solutions"*, Photonics Spectra 60-68, september 2002
- [36] Wigren, C.: *"A genericIRST detection Performance model"*, FOA-R—00—01464-616—SE, mars 2000.
- [37] Holst, G, C.: *"Electro-Optical Imaging System Performance"*, JCD Publishing, 1995.
- [38] Renhorn, I, Svensson, T, Carlsson, G, Letalick, D, Larsson, H, Steinvall, O.: *"Försök med multispektrala aktiva/passiva sensorer"*, FOI-R—0290—SE december 2001.
- [39] Svensson, T, Renhorn, I.: *"Multispectral MWIR imaging sensor"*, Proceedings of SPIE Vol. 4820, 2002, Infrared technology and Applications XXVIII.
-