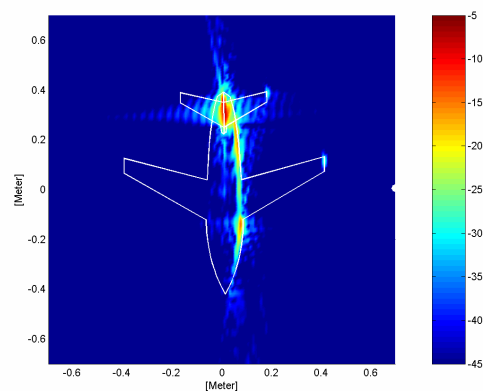
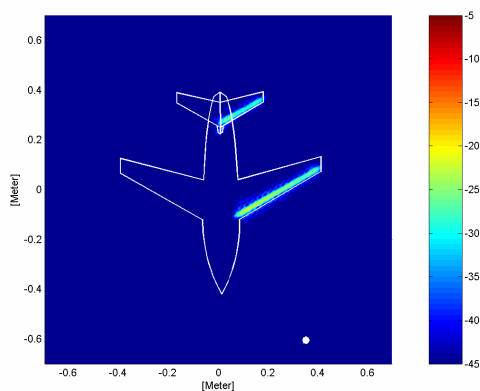


Mikael Karlsson, Magnus Gustavsson, Sara Molin, Fredrik Näsström

Utvärdering av SPECRAY EM

Ett programpaket för radarsignaturberäkningar och radarsimuleringar



TOTALFÖRSVARETS FORSKNING SINSTITUT

Sensorteknik

Box 1165

581 11 Linköping

FOI-R--1354--SE

Oktober 2004

ISSN 1650-1942

Användarrapport

Mikael Karlsson, Magnus Gustavsson, Sara Molin, Fredrik Näsström

Utvärdering av SPECRAY EM

Ett programpaket för radarsignatur-
beräkningar och radarsimuleringar

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Sensorteknik Box 1165 581 11 Linköping	Rapportnummer, ISRN FOI-R--1354--SE	Klassificering Användarrapport
	Forskningsområde 6. Telekrig och vilseledning	
	Månad, år Oktober 2004	Projektnummer E3062, E3015, E3069
	Delområde 62 Signaturanpassning	
	Delområde 2 51 VVS med styrda vapen	
Författare/redaktör Mikael Karlsson Magnus Gustavsson Sara Molin Fredrik Näsström	Projektledare Jonas Rahm, Leif Carlsson, Lage Svensson	
	Godkänd av Lena Klasén	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning FM	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig	
Rapportens titel Utvärdering av SPECRAY EM - Ett programpaket för radarsignaturberäkningar och radarsimuleringar		
Sammanfattning (högst 200 ord) <p>SPECRAY EM, med tillhörande programmoduler, är ett verktyg för beräkning av radarmålyta och simulering av elektromagnetisk spridning i syntetiska omgivningar. Programvaran är utvecklad av det franska företaget OKTAL SE i samverkan med ONERA. Sverige har idag ett stort behov av ett sådant verktyg, exempelvis vid signaturanpassning av farkoster och fordon, eller vid utvärdering av t.ex. nya sensor-koncept till radarmålsökare eller SAR-system för UAV:er. Denna rapport redovisar den utvärdering av SPECRAY EM som gjorts av FOI under sommaren 2004.</p> <p>Programvaran är baserad på ray-tracingteknik och använder geometrisk optik i kombination med fysikalisk optik för beräkning av elektromagnetisk spridning. Till skillnad från de verktyg som finns i Sverige idag, kan SPECRAY EM hantera bl.a. bistatisk spridning, dielektriska material, avståndsluckor, monostatiskt markklotter, doppler och antenn-diagram.</p> <p>SPECRAY EM har validerats för en rad generiska testfall och har i samtliga väsentliga fall givit korrekta resultat. Det slutgiltiga omdömet är att SPECRAY EM är ett kompetent program som har en stor potential.</p>		
Nyckelord radar, radarmålyta, simulering, radarsensorsimulering, syntetiska omgivningar, PTD, fysikalisk optik		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 37 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--1354--SE	Report type User report
	Programme Areas 6 Electronic Warfare and deceptive measures	
	Month year October 2004	Project no. E3062, E3015, E3069
	Subcategories 62 Low Observables	
	Subcategories 2 51 Weapons and Protection	
Author/s (editor/s) Mikael Karlsson Magnus Gustavsson Sara Molin Fredrik Näsström	Project manager Jonas Rahm, Leif Carlsson, Lage Svensson	
	Approved by Lena Klasén	
	Sponsoring agency Swedish Armed Forces	
	Scientifically and technically responsible	
Report title (In translation) Evaluation of SPECRAY EM - A program package for radar signature calculations and radar simulations		
Abstract (not more than 200 words) <p>SPECRAY EM, with complementary software modules, is a tool for calculation of radar cross section and simulation of electromagnetic scattering in synthetic environments. The software is developed by the French company OKTAL SE in cooperation with ONERA. There is today a great need in Sweden for this kind of tool, e.g. for signature reduction of craft and vehicles, or for evaluation of, for instance, new sensor concepts for missile seekers and SAR-sensors for UAVs. This report presents the evaluation of SPECRAY EM that has been carried out by FOI during the summer of 2004.</p> <p>The software is based on ray tracing technology and uses geometrical optics in combination with physical optics for calculating electromagnetic scattering. As opposed to the tools available in Sweden today, SPECRAY EM is capable of handling bistatic scattering, dielectric material, range gating, monostatic ground clutter, doppler and antenna diagrams.</p> <p>SPECRAY EM has been validated in a number of generic test cases and has in all important cases given correct results. The lasting impression is that the software is very competent and has great potential.</p>		
Keywords Radar, RCS, radar cross section, simulation, radar sensor simulation, synthetic environment		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 37 p.	
	Price acc. to pricelist	

Innehåll

1	INTRODUKTION.....	6
1.1	OKTAL SE	6
1.2	OPTISKA BERÄKNINGSMETODER.....	7
1.3	EXAKTA LÖSNINGSMETODER.....	7
2	ÖVERSIKT AV INGÅENDE PROGRAMMODULER.....	8
2.1	SPECRAY EM.....	8
2.2	VISUSPS	8
2.3	PHOTOSHOP TEXTURE TOOL 2 (PTT2)	9
2.4	GEOMETRIDATABASKONVERTERING (FFT)	9
2.5	GAIA IR.....	9
3	INSTALLATION OCH UPPSTART	11
3.1	INSTALLATION OCH KONFIGURERING AV PROGRAMMODULER	11
3.2	UPPSTART OCH ”ATT KOMMA IGÅNG”	11
4	SPECRAY EM FÖR BERÄKNING AV RADARMÅLYTA	13
4.1	RAYTRACER	13
4.1.1	<i>Raytracerns algoritm i korthet</i>	14
4.2	FYSIKALISK MODELL	15
4.2.1	<i>Valideringsfall dihedraller</i>	15
4.2.2	<i>Valideringsfall bistatisk beräkning på dielektrisk platta</i>	17
4.2.3	<i>Beräkningar på ”Rak” och ”Rund”</i>	19
4.3	UTVÄRDERING DIFFRAKTION (ILDC).....	20
4.4	BERÄKNINGSTIDSSTUDIE	22
5	SIMULERING AV RADARSENSORER	25
5.1	MARK OCH KLOTTERMODELL	26
5.2	REALAPERTUR OCH SAR.....	27
5.3	DOPPLER.....	28
5.3.1	<i>Platta som rör sig linjärt</i>	28
5.3.2	<i>Roterande platta</i>	29
6	GEOMETRI OCH MATERIALHANTERING	30
6.1	GEOMETRI- OCH TERRÄNGDATABASKONVERTERING.....	30
6.2	MATERIALHANTERING OCH KLASSIFICERING.....	31
7	DOKUMENTATION.....	33
7.1	SUPPORT.....	33
8	SLUTSATSER OCH KOMMENTARER.....	34
8.1	VALIDERING AV RADARMÅLYTEBERÄKNINGAR	35
8.2	SIMULERING AV RADARSYSTEM I SYNTETISKA MILJÖER	35
9	REFERENSER.....	37

1 Introduktion

Beräkning av radarreturen från ett objekt givet en tredimensionell datormodell är av mycket stort intresse för militära applikationer. Det mest kända användningsområdet är signaturanpassning, men många andra tillämpningar börjar bli allt mer betydelsefulla. En av dessa är förmågan att kunna utvärdera radarsensorer med tillhörande signalbehandlingsalgoritmer i realistiska syntetiska miljöer trots att man inte har tillgång till den hårdvara man vill undersöka. Sådana simuleringar kan användas för att utveckla, utvärdera och verifiera sensoralternativ eller signalbehandlingsalgoritmer tidigt i en utvecklingscykel och på så vis undvika att bygga dyra prototyper eller testsystem. Ur underrättelsesynpunkt är det också betydelsefullt att kunna värdera motståndarens system utan att ha tillgång till dessa. Med realistiska simuleringar av dessa system i realistiska terrängmodeller kan man även utvärdera taktik, förfina motmedel etc. Det är således av yttersta vikt för såväl den militära forskningen som industrin och de operativa förbanden att vi har kapacitet att göra avancerade simuleringar av såväl enskilda objekt som objekt i terräng.

Denna rapport redovisar resultatet av utvärderingen av SPECRAY EM med tillhörande kringprogramvara. Programvaran är utvecklad av det franska företaget OKTAL SE, i nära samarbete med det franska militära forskningsinstitutet ONERA (ONERA kallar produkten FERMAT). Programvaran finns tillgänglig på ett flertal plattformar, varav Linux och Windows är av störst intresse för oss.

SPECRAY EM är den centrala delen i programpaketet och är avsedd för radarmålteberäkningar (RCS) och radarsensorsimuleringar i syntetiska omgivningar, se kapitel 4 och 5. Programmet har bland annat en markklottermodell integrerad i beräkningsmodellen och den kan hantera dielektriska material. Den kan även beräkna RCS multistatiskt och hantera stora objekt, samtidigt som det är mer flexibelt än exempelvis andra beräkningsprogram för radarmålarea som exempelvis FOPOL [10].

De övriga programvarorna har utvärderats med varierande noggrannhet. Fokus har här lagts på de verktyg som hanterar objekt databaser, dvs. terräng, CAD-modeller och materialhantering, se kapitel 6.

En kortfattad översikt av använda moduler ges i kapitel 2.

1.1 OKTAL SE

OKTAL Synthetic Environments (OKTAL SE) är ett dotterbolag till det franska företaget OKTAL. OKTAL SE har ca 25 anställda och är baserat i Toulouse och Paris. OKTAL SE har som huvudsaklig affärsidé att utveckla

och sälja verktyg för simuleringar av syntetiska miljöer. Produktfloran innefattar moduler för att simulera IR-scener, elektromagnetiska fältberäkningar från t.ex. mobiltelefonmaster, radarsensorberäkningar etc. OKTAL SE har även verktyg för att skapa syntetiska miljöer och säljer konsulttjänster för att bygga upp miljöer.

1.2 Optiska beräkningsmetoder

Det finns ett antal programvaror på marknaden som hanterar beräkning av radarmålyta på objekt i frirymd. Dessa programvaror är framtagna av olika forskningsinstitut och universitet runt om i världen. De vanligaste metoderna som används är baserade på geometrisk optik och fysikalisk optik. Dessa metoder är baserade på optiska approximationer och i deras ursprungliga formulering hanteras inte komplicerade vågfenomen som diffraktion och mer komplicerad refraktion. Ett antal korrektionsmetoder finns dock för att förbättra och korrigera resultaten från dessa metoder, såsom Physical Diffraction Theory (PTD) och Incremental Length Diffraction Coefficient (ILDC).

Optiska metoder med korrektioner ger ganska bra resultat, men är ej exakta i alla detaljer. En icke försumbar del av diskrepanserna i resultaten från olika beräkningsprogram, baserade på denna kategori av beräkningsmetoder, kan dock härledas till rena programmeringsfel och olika val av strålföljnings-algoritm (raytracer).

Raytracing-algoritmen är den enskilt viktigaste komponenten i implementeringen av de optiska beräkningsmetoderna. Den är gränssättande för vilka prestanda som kan uppnås och olämpliga approximationer eller optimeringar i denna del får en direkt påverkan på beräkningsresultatet. Effektiva raytracing-metoder är idag ett forskningsområde av stort intresse och utveckling sker kontinuerligt.

1.3 Exakta lösningsmetoder

Idag finns en mängd ”exakta” lösningsmetoder för elektromagnetiska spridningsproblem. Några av dessa är momentmetoden (MoM), finita tids-differensmetoden (FDTD) eller finita elementmetoden (FEM). Gemensamt för dessa ”exakta” metoder är att samtliga i någon bemärkelse löser Maxwells ekvationer numeriskt. För att lösningarna skall konvergera krävs att ett stort antal element per våglängd används, vilket medför en mycket stor beräkningsvolym vid höga frekvenser. Dessa metoder brukar därför kallas lågfrekvensmetoder.

2 Översikt av ingående programmoduler

I detta avsnitt ges en kort beskrivning av de programmoduler som varit av störst intresse under utvärderingen. Förutom själva kvalitén och korrektheten i den huvudsakliga beräkningsmodulen SPECRAY EM är kvalitét och funktion hos verktyg för geometridatabaskonvertering och materialklassning av stort intresse.

2.1 SPECRAY EM

SPECRAY EM är kärnan i beräkningsprogrammet. SPECRAY EM är en modul för beräkning av elektromagnetisk spridning baserad på raytracing-teknik tillsammans med fysikalisk optik (PO) och Incremental Length Diffraction Coefficient (ILDC). Modulen hanterar radarmålyteberäkningar, fältberäkningar och simuleringar av objekt i markklotter. Fältberäkningar inkluderar även närfält inom den s.k. Fraunhoferregionen.

2.2 VISUSPS

VISUSPS [1] är ett visualiseringsverktyg för beräkningsresultat. Det är främst designat för att visualisera bilder med hög dynamik, såsom IR-bilder, men lämpar sig även bra till att visa SAR-bilder eller ISAR-bilder. Ett normalt grafikkort och skärm i en dator klarar bara av att visa 8 bitar per färgkanal. Det innebär 256 nivåer för rött, grönt och blått var för sig. Då IR och radarbilder oftast har högre dynamik, används för dessa oftast 14 (16384 nivåer) eller 16 (65536 nivåer) bitar per bildpunkt. Eftersom IR och radar inte använder färg i egentlig mening, medför detta ett problem då man vill titta på beräkningsresultat på en vanlig dator. Det mänskliga ögat kan inte heller urskilja så många gråa nyanser, vilket gör det omöjligt att tillgodogöra sig informationen i en bild med 14 eller 16 bitar.

För att komma runt detta problem tillåter VISUSPS att den önskade dynamiken sätts med hjälp av en max- och minnivå. Det innebär att man kan "zooma" in på olika nivåer i bilder för att se detaljer och strukturer som vid full dynamik inte syns på grund av den låga dynamiken hos datorskärmen och det mänskliga ögat.

Verktyget har för övrigt rätt begränsad funktionalitet. Man kan zooma och visuellt inspektera beräkningsresultaten, men inte genomföra mer ingående

analyser av resultatet. För det krävs att data importerats i andra verktyg, exempelvis Matlab.

2.3 Photoshop texture tool 2 (PTT2)

För IR och elektromagnetiska beräkningar behövs ett verktyg som gör det möjligt att från en 3D-databas med visuell textur erhålla en klassificerad textur med fysikalisk materialinformation. För att få en klassificerad textur behövs två operationer: identifiering och klassificering. Photoshop används för texturidentifieringen och PTT2 [2] används för texturklassificeringen.

Vid identifieringen måste användaren visuellt identifiera karakteristiska områden från en komplex visuell textur. Dessa områden ska då representera samma terrängtyp (skog, väg, fält etc.). Photoshop används för att separera de olika områdena i olika lager, där varje lager representerar en unik terrängtyp.

Efter identifieringen görs klassificeringen då man associerar varje område som har blivit separerat i olika lager med grundläggande fysikaliska material. Detta sker genom att man associerar ett fysikaliskt material från den fysikaliska materialreferensdatabasen till en färg som är vald för just det lagret. Den fysikaliska materialreferensdatabasen innehåller fysikalisk materialinformation från olika terrängtyper som jord, gräs, asfalt etc., och denna kan kompletteras med nya materialtyper vid behov. För att specificera sammansättning för ett lager kan upp till fyra olika material användas.

2.4 Geometridatabaskonvertering (FFT)

En viktig del i verktygsuppsättningen är verktygen som hanterar konverteringen av olika geometridatabaser (syntetiska omgivningar och objekt) till och från OKTAL SEs filformat (SDM) som är formatet som används i simuleringarna. FFT [3] är en uppsättning program för att hantera detta. De format som hanteras av FFT-programmen är OpenFlight och OpenInventor VRML. För FOI är det främst OpenFlight-delarna som har varit av intresse att utvärdera, eftersom databaserna som använts är lagrade med detta format.

2.5 GAIA IR

GAIA IR [4] är ett program där man på ett enkelt sätt kan hantera geometridatabasen och t.ex. associera ytor med fysikaliska data (materialegenskaper). Databasen som är en geometrisk beskrivning av ett fysikaliskt objekt kan sedan användas av SPECRAY EM eller SensorVision för att beräkna dess karakteristik för ett specifikt våglängdsband.

Med GAIA IR fås en tydlig visualisering av databasen och dess hierarki. I visualiseringsfönstret kan olika operationer utföras som att välja polygoner, zooma, translatera och rotera objekt, ta bort objekt och polygoner från databasen etc. För att associera en eller flera polygoner med ett material med hänsyn till geometriska faktorer använder man polygontexturering. I GAIA IR finns det flera automatiska textureringsmoder och en manuell textureringsmod.

Man kan även ändra materialegenskaperna som RGB-data för visuell representation och de optroniska egenskaperna. För de elektromagnetiska egenskaperna finns det flera parametrar som kan varieras, t.ex. amplitud och fasvärden för reflektionskomponenterna H och V för varje våglängd, amplitud och fasvärden för bakåtspridningskomponenterna HH, HV, VH och VV för varje våglängd. Nya materialegenskaper kan erhållas genom att sätta samman olika material i en följd av lager. Man måste då bestämma tjocklek och vilket material som ska associeras till varje lager.

3 Installation och uppstart

3.1 Installation och konfigurering av programmoduler

Installationen av programmet är enkel då alla moduler ligger samlade i en kataloghierarki vilket innebär att filer inte behöver kopieras till olika delar av hårddisken, som exempelvis Windowskataloger etc. Grundprogrammen använder inte Windows register, vilket ytterligare förenklar installationen. Det som behöver göras manuellt är att sätta upp sökvägen till programkatalogen.

Programmets exekveringsmiljö konfigureras på UNIX-vis, dvs man använder en uppsättning omgivningsvariabler (environment variables) för exekveringskonfigurationen. För att underlätta för Windows-användare har dessa samlats i en ".env"-fil (environment-fil) till de olika programmen.

Ett problem som uppstod var att alla env-filer som används av programmen innehåller sökvägar som är relativa till sin egen katalog, vilket medför att de måste köras från den egna katalogen. Detta kan göras antingen genom att lägga en genväg på skrivbordet, eller i den katalog man vill arbeta i, och konfigurera denna korrekt. Alternativt kan filen köras från ett kommandofönster stående i programkatalogen. Det verkar dock vara möjligt att konfigurera om verktygen med hjälp av env-filerna om man önskar ett annat beteende. Kommandofiler (BAT-filer) är också ett alternativt sätt för att underlätta hanteringen.

De grafiska verktygen kräver en OpenInventor-licens vilket skapade logistiska problem under utvärderingen, eftersom endast en sådan licens fanns att tillgå.

3.2 Uppstart och "att komma igång"

Programmen använder ett stort antal konfigureringsfiler för beräkningarna. För varje objekt (målobjekt, terrängavsnitt, hus etc.) behövs en uppsättning filer som beskriver geometri, material, materialfördelning i form av textur, materialkonstanter för de olika materialen (för olika våglängder och sensortyper) osv. Objekt som ska förflytta sig under scenariot kopplas till olika trajektoriefiler där rörelsen definieras med hjälp av "waypoints". För uppsättning av själva sensorn och beräkningsparametrar används en sensorfil, och eventuellt en trajektoriefil om sensorn ska förflytta sig. Allt sammanställs sedan i en scenariofil, där objekt och sensorer knyts samman.

Det är framför allt materialhanteringen som är komplicerad och svår att komma igång med. Den är fördelad på en så stor mängd filer att man snabbt rör till det hela.

Vi har även haft en del problem med definitionen av trajektorier och inriktning av sensorer och objekt. Detta har främst varit relaterat till att två olika koordinatsystemsdefinitioner används i olika beräkningsmoder. Det är naturligtvis önskvärt att programmet använder samma definition rakt igenom, men när man arbetat ett tag med detta är det inga problem.

Det enklaste och effektivaste sättet att arbeta med programvaran för att göra beräkningar är att använda sig av gamla filer som mallar och sedan modifiera dessa för att göra det man önskar.

4 SPECRAY EM för beräkning av radarmålyta

Radardelen av programpaketet SPECRAY EM (även kallad FERMAT) och är implementerad för att behandla följande elektromagnetiska spridningsfenomen [5].

- Bistatisk Fysikalisk optik (PO) i kombination med geometrisk optik (GO) för både metalliska och dielektriska material. Interaktionen mellan delspridare beräknas med GO och bidraget till radarn beräknas med PO.
- Bistatisk Fysikalisk diffraktions teori (Incremental Length Diffraction Coefficient, ILDC) i kombination med (GO) för metalliska material. Interaktionen mellan delspridare beräknas med GO och bidraget till radarn med ILDC.

Validering av fysikaliskoptik-program har länge varit eftersatt i Sverige. Genom benchmark-studier [6] har det visat sig att en stor del av de i Sverige existerande PO-koderna innehåller ”buggar”, varför man inte fullt ut kan lita på resultaten från dessa. Det är därför viktigt att en noggrann validering görs av beräkningskoder innan program inhandlas, dels för att hitta och korrigera eventuella ”buggar”, men också för att se vilka fysikaliska modeller som har använts och i vilka sammanhang. Det sistnämnda är speciellt viktigt om dokumentationen över programmets ingående fysik är bristfällig eller saknas. Detta är inte aktuellt för SPECRAY EM där nästan all ingående fysik redovisas utförligt i [7].

I detta kapitel kommer SPECRAY EMs kapacitet att beräkna radarmålyta (RCS, Radar Cross Section) att valideras. I avsnitt 4.1 beskrivs SPECRAY EMs raytracer kortfattat. I avsnitt 4.2 valideras PO-GO algoritmen tillsammans med SPECRAY EMs hantering av dielektriska material och i 4.2.3 valideras diffraktionsdelen. Programmets snabbhet värderas i avsnitt 4.4.

4.1 Raytracer

SPECRAY EM utvecklades ursprungligen för att beräkna IR-signaturer för objekt i naturliga omgivningar, och kallades då enbart SPECRAY. Tidigt valdes en raytracing-metod som kallas ”forward raytracing”. Detta innebär att man utgår från strålkällorna då strålföljningen görs. Traditionellt används inte denna metod av raytracer-program, utan vanligtvis följer man strålarna baklänges, d.v.s. från observatören och ut i scenen. Moderna metoder använder dock allt oftare en kombination av dessa två huvudvarianter. Den

raytracer-metod som används i SPECRAY EM idag är i grunden samma raytracer som i den ursprungliga IR-versionen. Denna betydelsefulla del är alltså väl validerad, vilket ökar tillförlitligheten hos implementationen.

4.1.1 Raytracerns algoritm i korthet

Raytracerns ”forward”-implementation innebär att strålar skjuts ut från källorna i ett initialt rutsystem (grid). Dessa strålar används dock inte oberoende av varandra, vilket är vanligt hos raytracing-algoritmer, utan bildar så kallade strålnippen (eng: ray tubes). Algoritmen undersöker om strålen träffar en fasett. Om så är fallet bildar strålnippet en parallelogram på fasetten och ett nytt strålnippe skjuts ut från fasetten med en riktning som beräknats med GO.

Normalriktningarna definieras antingen i fasettens vertexpunkter (kantpunkter), eller per fasett. Om vertexnormaler används, linjärinterpoleras dessa över fasetten med de tre normalerna som grund för att på så sätt få normalriktningar som är så lika en icke-meshad yta som möjligt (s.k. Phong-interpolering). Om normalriktningarna definieras på fasetten görs ingen interpolation.

GO-algoritmen upprepas därefter rekursivt, maximalt det antal gånger som angivits av användaren. Det finns ingen övre gräns för hur många rekursioner (studsar) som kan användas. I realiteten är det dock inte ofta fysikaliskt försvarbart att använda mer än 3-5 studsar, eftersom det då kan börja uppfattas som en kavitetsberäkning, något som fysikalisk optik inte är lämpat för. I SPECRAY EM definieras det initiala rutsystemets pixelstorlek av användaren. Det första rutsystemet fungerar som ett filter där objekt mindre än pixelstorleken filtreras bort och därför inte tas med i beräkningen.

Om ett strålnippe träffar fler än en fasett och vinkelskillnaden mellan fasetternas normaler eller avståndet skiljer sig åt för mycket, uppstår s.k. aliasing-fenomen. När detta detekteras, delas strålnippet upp i fyra ytterligare strålar och beräkningen görs om för varje subdel. Denna procedur upprepas rekursivt det antal gånger som anges av användaren. Genom denna procedur fås en stor pixeltäthet vid skarpa kanter, där stor noggrannhet kan krävas. Samtidigt sparas beräkningstid då en relativt låg pixeltäthet kan användas där objektets geometriska variation kan anses vara liten. Detta kallas adaptiv raytracing och skiljer sig från traditionella program, som exempelvis FOPOL, där pixelstorleken är konstant över hela scenen. Om inte anti-aliasing görs, eller om subdelningen av strålnippet befinner sig på den sista nivån, väljs den mest belysta fasetten och den på fasetten belysta ytan beräknas som projektionen av strålen på fasetten. De andra fasetterna som belyses av strålen ignoreras.

4.2 Fysikalisk modell

Utvärderingen av fysikalisk optik-delen, s.k. PO-delen, av SPECRAY EM har utförts genom beräkning på ett antal generiska testfall där en del har ingått i en benchmark-studie [6] och i CEPA:s (Common European Priority Areas) arbete [8], som bedrivs i samarbete med FOI-projektet ”Radarmål i bakgrund”. Dessa testfall är utvalda för att främst utvärdera PO-GO delen av programmet, samt behandlingen av dielektriska material. Resultaten har jämförts med ”valideringskoder” som endast fungerar på en begränsad uppsättning spridningsproblem.

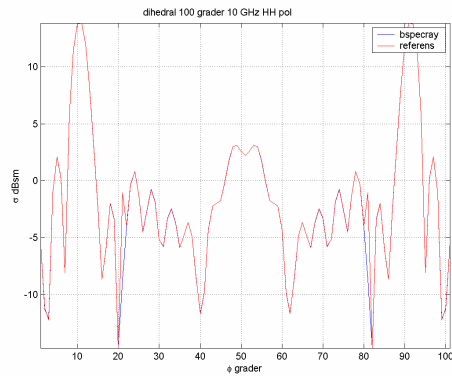
I avsnitt 4.2.1 används perfekt ledande (PEC) dihedraller för att utvärdera SPECRAY EMs raytracing-algoritm. De testfall som presenteras här är en utökad delmängd av valideringsobjekten som ingår i [6]. I avsnitt 4.2.2 prövas SPECRAY EMs multistatiska beräkningsalgoritmer, samt dess behandling av dielektriska ytor. Valideringsobjektet utgörs i detta fall av en dielektrisk platta för vilken ett antal olika testfall presenteras. Plattan utgör ett valideringsobjekt i CEPA-samarbetet, dock kommer inga resultat från andra länder att presenteras i denna rapport utan jämförelse görs endast med referenskod skriven vid FOI. Beräkningar på mer komplicerade objekt som de generiska flygplansmodellerna ”Rak” och ”Rund” [9] jämförs med beräkningsprogrammet FOPOL och presenteras i avsnitt 4.2.3. Det bör också påpekas att valideringen verkar ha haft hög prioritet för OKTAL SE och ONERA, varför det finns en stor mängd resultat att tillgå från franska valideringsfall. Dessa kommer dock endast sparsamt att kommenteras i denna rapport då ovan nämnda testfall anses mycket väl utvärdera programmets funktionalitet.

4.2.1 Valideringsfall dihedraller

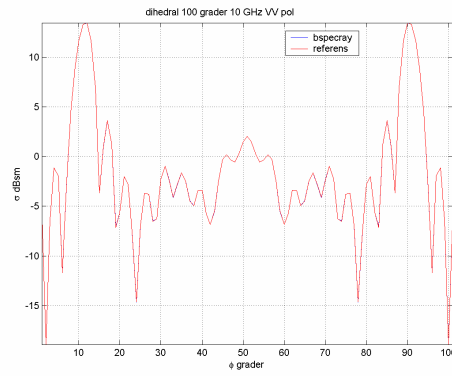
Varje diedral representerar olika antal GO-studsar, 2 för 100, 3 för 80 och 4 för 45 graders diedral. Dessa testfall prövar således om raytracing-algoritmen fungerar korrekt i fråga polarisationsvridning, skuggning och delbelysning av objekt. Det bör påpekas att SPECRAY EM klarar ett godtyckligt antal studsar, men det är tveksamt om kombinationen GO-PO är tillämpbar för fler än 5-6 studsar, då ingen hänsyn tas till lobmönster, avståndsberoende eller energikonservering för de interagerande fälten.

Resultaten från SPECRAY EM jämförs med resultaten från en av FOI egenutvecklad referenskod.

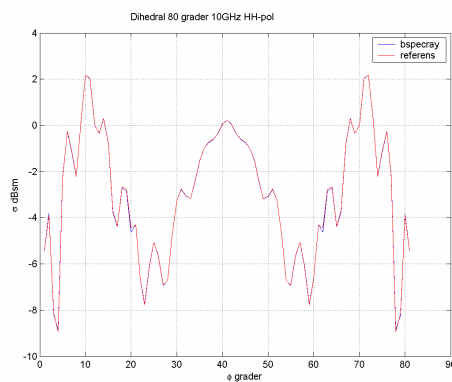
I Figur 4-1 (a)-(f) illustreras jämförelse mellan SPECRAY EM och referenslösningen för dihedraller med alla kantlängder lika med 0.2 m och vid 10 GHz, men där öppningsvinkeln varierats.



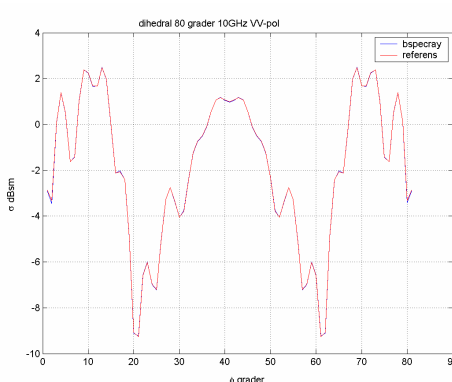
(a)



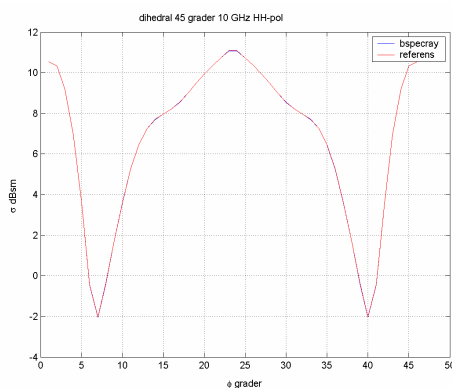
(b)



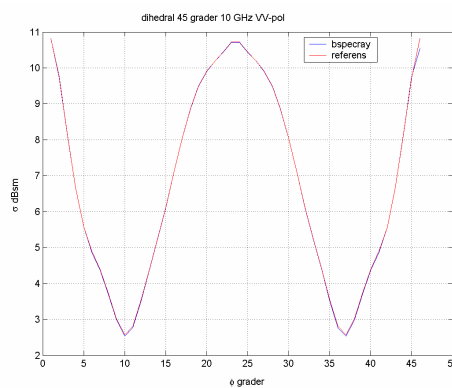
(c)



(d)



(e)

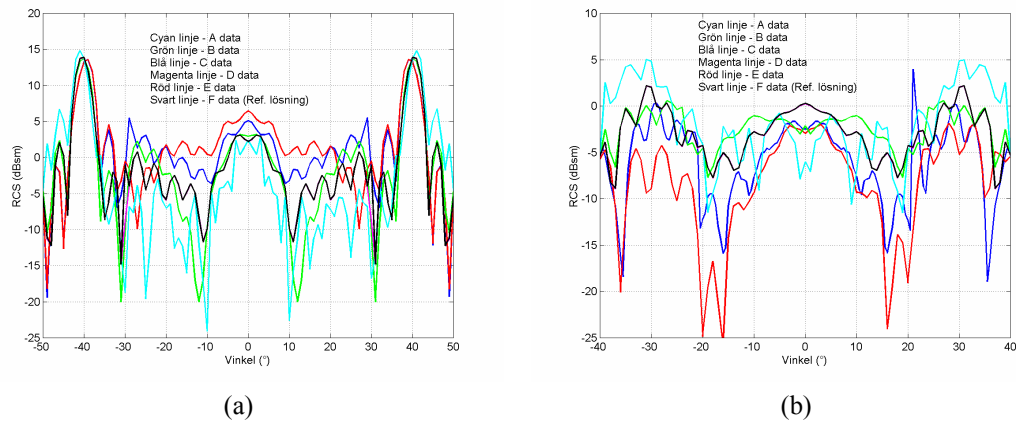


(f)

Figur 4-1 (a)-(f): Illustrerar radarmålarean vid 10 GHz för dihedraller med alla sidorna 0.2 m och öppningsvinklarna 100, 80 och 45 grader. Varje rad representerar de olika öppningsvinklarna och de båda kolumnerna HH- respektive VV-polarisation. Blå kurvor visar SPECRAY EM och röda kurvor visar referenslösningen.

Som Figur 4-1 visar är överensstämmelsen så gott som exakt mellan SPECRAY EM och referenskoden. En liten avvikelse noteras dock i Figur 4-1 (a) vid $\varphi \approx 20^\circ$ och 80° grader. Denna beror dock på numerisk osäkerhet då dihedralens andrabidrag har en mycket stor derivata i dessa punkter. Genom att minska vinkelsteget reduceras denna artefakt och man kan visa att ”offseten” i φ -led är proportionell mot vinkelsteget.

En jämförelse mellan referenslösningen och en mängd beräkningsprogram som finns tillgängliga i Sverige i dag illustreras i Figur 4-2 (a) och (b) och är hämtad ur [6].



Figur 4-2 (a)-(b): Illustrerar radarmålarean vid 10 GHz och HH-polarisation för en dihedral med alla kanter 0.2 m och öppningsvinkeln 100 respektive 80 grader. Resultaten är beräknade med olika PO-beräkningsprogram som finns tillgängliga i Sverige i dag.

Analys av ovanstående figurer visar att det finns betydande skillnader mellan referenslösningen och de flesta PO-koder. Endast en kod uppvisar en försumbar skillnad till referenslösningen. Eftersom alla PO-program använder sig av ungefär samma typ av GO-PO strålgångsalgoritm är det troligt att skillnaden mellan de olika kodernas direktbidrag är väldigt liten. Slutsatsen från Figur 4-2 är att skillnaderna mellan de olika koderna beror på ”buggar” i programmens sätt att hantera multipelbidrag, förutsatt att användarna av programmen har gjort rätt.

4.2.2 Valideringsfall bistatisk beräkning på dielektrisk platta

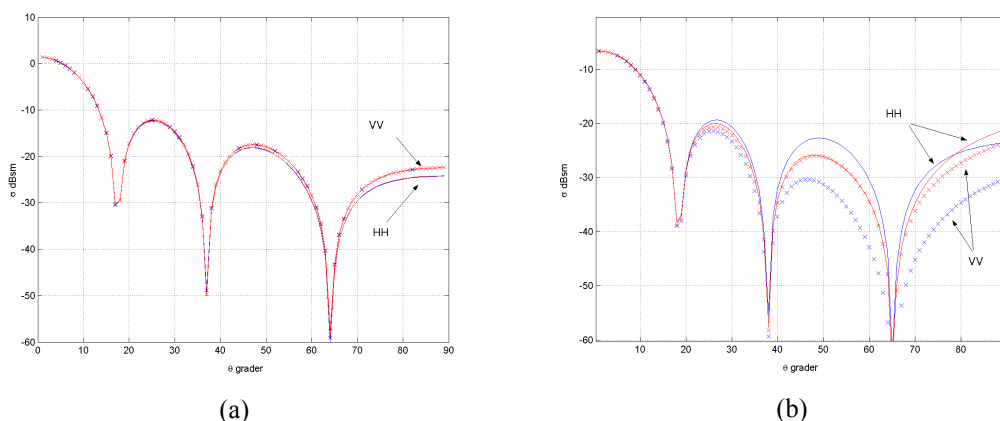
SPECRAY EM klarar även dielektriska material och bistatisk spridning. Eftersom raytracing-algoritmen är analog med det monostatiska fallet så när som på den sista studsens behövs inte någon utförligare evaluering av den algoritmen. Det bistatiska fallet inkluderar dock koordinattransformationer mellan sändare och mottagare och därför testas dessa i detta avsnitt.

För att hantera dielektriska material använder sig SPECRAY EM av en lookup-tabell där reflektionskoefficienterna R_{\perp} och R_{\parallel} (inte att förväxla med Fresnelkoefficienter) finns tabellerade för varje heltalsinfallsvinkel i övre halvplanet. När en stråle har en vinkel som hamnar mellan två tabellerade vinklar görs linjärinterpolation för att få reflektionskoefficienterna för infallande vinkel. Denna lookup-tabell eller textur kan sedan knytas till en eller flera fasetter, vilket på ett smidigt sätt möjliggör beräkningar på objekt bestående av många olika material.

För att skapa tabellen av reflektionskoefficienter kan programmet EM2MPS som följer med i programpaketet användas. EM2MPS använder sig av s.k. impedansrandvillkor för att beräkna reflektionskoefficienterna vilket innebär att multilagerskikt kan beräknas och hänsyn tas till alla studsar inne i

materialet. Det fiffiga är att man genom reflektionskoefficientrepresentationen inte behöver bry sig om fälten inne i materialet. Eftersom Fresnelkoefficienterna är framtagna genom impedansrandvillkor för ett oändligt tjockt material gäller samma begränsningar som för Fresnelkoefficienterna d.v.s. att materialet är homogent och att ingen hänsyn tas till vågledarmoder och andra excitationer som kan förekomma inne i materialet. Detta är analogt med fysikalisk optikapproximationen som inte beaktar yt- och krypvågor. Möjligheten att använda förberäknade tabelldata finns, vilket gör det möjligt att hantera även anisotropa material. I övrigt gäller samma approximationer som för homogena material.

SPECRAY EM behandlar inte transmitterade strålar vilket gör att i det bistatiska fallet beräknas inte fälten exakt, om inte det transmitterade fältet är noll, vilket är fallet om texturen innehåller metall (PEC) i något av dess skikt. Den verkliga begränsningen för beräkning på verkliga objekt är relativt liten då åtminstone de flesta beräkningsobjekten innehåller ett metallskal som sedan dielektriska material har lagts på. För att validera den bistatiska- och dielektriska beräkningsfunktionen i SPECRAY EM, samt att visa på effekten av att inte ta hänsyn till transmitterat fält har beräkningar gjorts på en rexolitplatta och jämförts med en av FOI egenutvecklad referenskod. Resultaten illustreras i Figur 4-3 (a) och (b).



Figur 4-3 (a)-(b): Illustrerar bistatisk RCS-beräkning vid 10 GHz där sändare och mottagare är separerade 90° gjord på en kvadratisk rexolitplatta, $\epsilon_r = 2,54$, med sida 0.1 m och tjocklek 1.27 cm med, figur (a), och utan, figur (b), metallisk undersida. Plattan ligger i xy -planet och sändaren är placerad mot normalens riktning. Röda kurvor visar resultaten från referenslösningen och blå från SPECRAY EM. Kurvor med kryss representerar VV-polarisation och heldragna HH.

Resultaten från Figur 4-3 (a) visar att SPECRAY EM och referenslösningen ger samma resultat för båda polarisationerna. Samma sorts beräkning har gjorts för en rad konfigurationer som skall generera samma resultat. Det har visat sig att i alla beräkningsfall (utom ett) överensstämmer SPECRAY EM med referenslösningen. Men problem uppstår då mottagaren befinner sig i $\theta = 0$ då denna punkt inte är entydigt bestämd av det polära koordinatssystemet, $[\theta, \varphi]$ som används för att beskriva positionen av mottagaren i den bistatiska konfigurationen. I det monostatiska fallet uppstår inte detta problem. Denna ”bugg” är inte speciellt allvarlig då den endast uppkommer

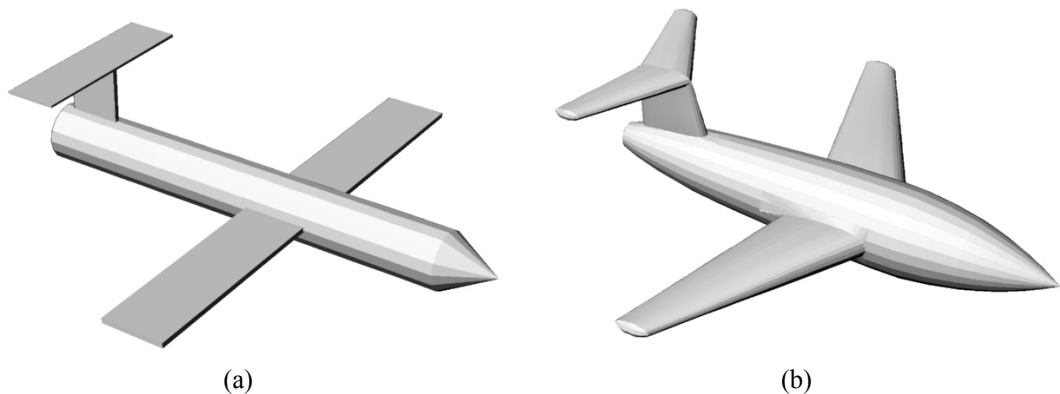
i en enda punkt. OKTAL SE har informerats om problemet som skall vara åtgärdat till nästa version som släpps inom kort.

Figur 4-3 (b) visar resultaten för en rexolitplatta utan metallisk undersida. Som tidigare nämnts beaktas inte det transmitterade fältet vilket ger upphov till skillnader mellan referenslösningen och SPECRAY EM.

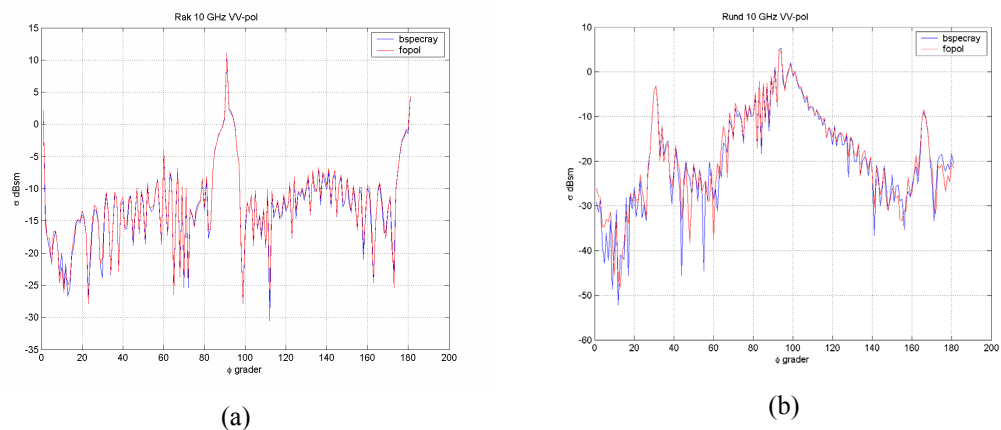
4.2.3 Beräkningar på "Rak" och "Rund"

Detta avsnitt redogör för beräkningar gjorda med SPECRAY EM och FOPOL [10] på de generiska flygplanstyperna "Rak" och "Rund", som finns illustrerade i Figur 4-4.

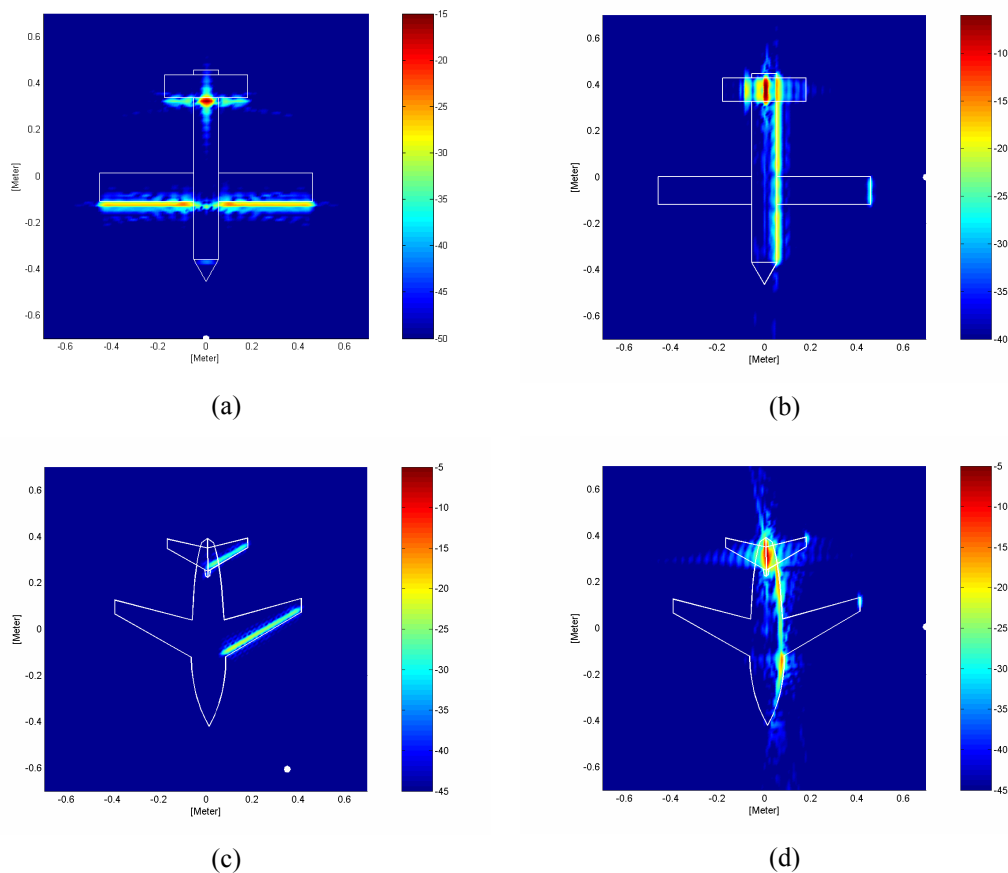
En jämförelse mellan en RCS-beräkning gjord av FOPOL och SPECRAY EM på flygplansmodellerna visas i Figur 4-5 (a) och (b). ISAR-bilder av data framtaget med SPECRAY EM illustreras i Figur 4-6 (a)-(d).



Figur 4-4 (a)-(b): Illustrerar de generiska flygplanstyperna "Rak" (a) och "Rund" (b).



Figur 4-5 (a)-(b): Illustrerar radarmålearen för flygplansmodeller rak (a) och rund (b) beräknad med SPECRAY EM (blå kurva) och FOPOL (röd kurva) vid 10 GHz och VV-polarisation.



Figur 4-6 (a)-(d): Illustrerar ISAR-bilder på flygplansmodellerna "Rak" (a)-(b) och "Rund" (c)-(d) där data beräknats med SPECRAY EM. För ISAR-processeringen har Columbus 2002 [11] använts. Radarn befinner sig i 0° figur (a), 90° figur (b), 30° figur (c) och 90° figur (d). Avstånds- och vinkelupplösningen är 1,5 respektive 4 cm.

En jämförelse mellan resultaten i Figur 4-5 (a) och (b) visar på små skillnader mellan FOPOL och SPECRAY EM för båda flygplansmodellerna. En viktig skillnad mellan programmen är dock trippelstudsens flygkropp - stabilisator - flygkropp som ger bidrag till målarean vid $\varphi = 90^\circ$. Detta bidrag syns tydligt i Figur 4-6 (b) vid $x \approx -0.1$ m och $y \approx 0.4$. P.g.a. annan strålgångsalgoritm kommer FOPOL inte ta hänsyn till detta verkliga bidrag vilket medför att detta inte uppkommer för en ISAR-bild beräknad med FOPOL. Detta beror på att FOPOL inte beaktar fasetter som inte syns från pixelskärmen. I beräkningarna har fasettnormalinterpolationen utlämnats för att på så sätt få en så lika jämförelse mellan programmen som möjligt.

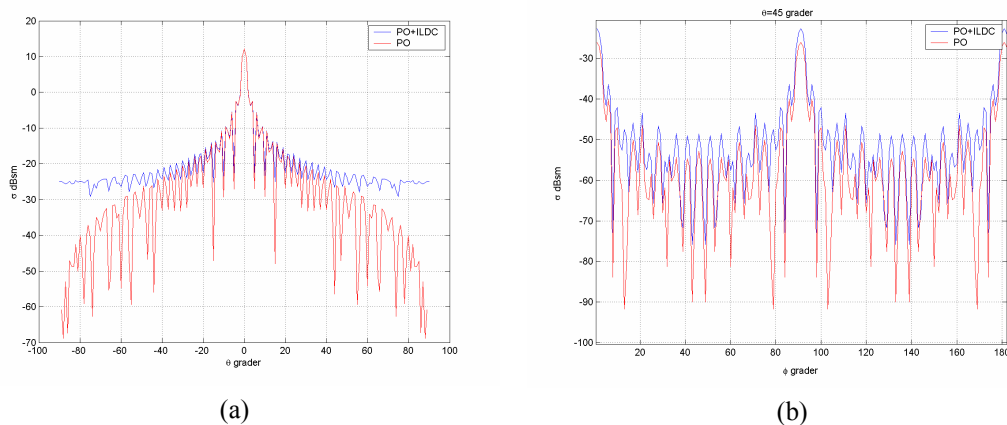
4.3 Utvärdering diffraktion (ILDC)

Någon jämförelse mellan SPECRAY EM och referenskod kommer inte att göras i detta avsnitt. I stället kommer beräkningar på en platta att göras för olika vinkelsvep, med och utan Incremental Length Diffraction Coefficient (ILDC), samt beräkning på 100 graders dihedral, med och utan ILDC. Beräkningarna jämförs med fysikalisk optik.

ILDC-koden som finns implementerad i SPECRAY EM bygger på Mitzners ILDC [12] och behandlar till skillnad från den ursprungliga PTD-teorin av Ufimtsevs finita kanter och därmed diffraktion utanför Keller-konen. Det finns idag inget känt sätt att behandla diffraktion från dielektriska kanter varför SPECRAY EM endast behandlar metalliska kanter. I SPECRAY EM kan ILDC användas för såväl närfält som fjärrfältsberäkningar, förutsatt att man befinner sig inom den s.k. Fraunhoferzonen. Beräkningsalgoritmen för ILDC är uppbyggd på samma sätt som för PO vilket medför att diffraktion från studsar beaktas.

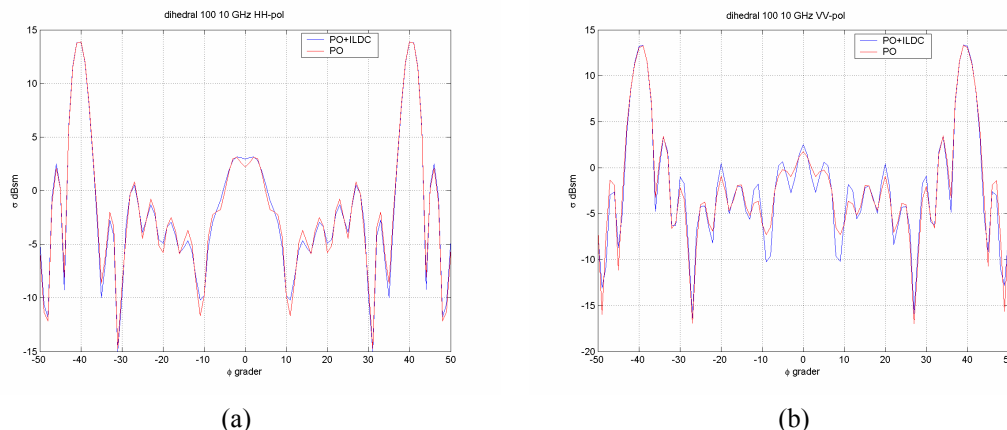
För att göra en ILDC-beräkning med SPECRAY EM krävs att de kanter som bidrar till diffraktionen definieras i bdd-filen. Detta måste göras för hand, då ett program framtaget av ONERA för kantdefinition för närvarande inte finns att tillgå p.g.a. oklara ägandeförhållanden. Avsaknaden av ett sådant program gör det i princip omöjligt att använda sig av ILDC för beräkning av komplicerade objekt där ett stort antal kanter kan tänkas ingå.

Beräkningar har gjorts på en kvadratisk platta med sidorna 0,1 m vid 35 GHz och HH-polarisation, och på en dihedral med öppningsvinkel 100 grader med kvadratiske skänklar med sidorna 0,2 m, vid 10 GHz och för HH- och VV-polarisation. Beräkningarna jämförs med och utan ILDC och presenteras i Figur 4-7 (a) och (b) samt i Figur 4-8 (a) och (b).



Figur 4-7 (a)-(b): Illustrerar radarmålarean för en kvadratisk platta med sidorna 0,2 m. Figur (a) visar radarmållytan då $\varphi=0^\circ$ och elevationsvinkeln är $-90^\circ < \theta < 90^\circ$. Figuren visar radarmållytan vid ett koniskt snitt med elevationsvinkel $\theta < 45^\circ$. Beräkningarna har skett vid 35 GHz och HH-polarisation. Blå kurvor visar PO+ILDC bidraget och röda PO-bidraget.

Från Figur 4-7 (a) och (b) konstateras att resultaten ser rimliga ut och diffraktionseffekterna är små. I båda figurerna syns höjningar av radarmålareorna. I Figur 4-7 (a), då man befinner sig på Keller-konen, fås vid höga elevationsvinklar stora relativa skillnader mellan PO och ILDC. Man bör dock betänka att skalan är logaritmisk och effekterna därför kan betraktas som små. Vid smyganpassning kan detta dock vara av stor betydelse.



Figur 4-8 (a)-(b): Illustrerar radarmålarean för en dihedral med öppningsvinkel 100 grader och kvadratiska skänklar med sidorna 0,2 m. Figur (a) visar resultaten för HH-polarisation och figur (b) för VV. Beräkningarna är gjorda vid 10 GHz. Blå kurvor visar PO+ILDC bidraget och röda PO-bidraget.

Även för dihedralen fås väldigt små diffraktionsbidrag. Dessa blir dock större för VV-polarisation då detta är en följd av att skänklarnas kanter löper parallellt med VV-polarisationen. Även om diffraktion från den inre kanten är beaktad i beräkningen bör man vara medveten om att ytvågor inte beaktas och det är därför tänkbart att en ökning av skillnaderna skulle fås för främst HH-polarisation.

4.4 Beräkningstidsstudie

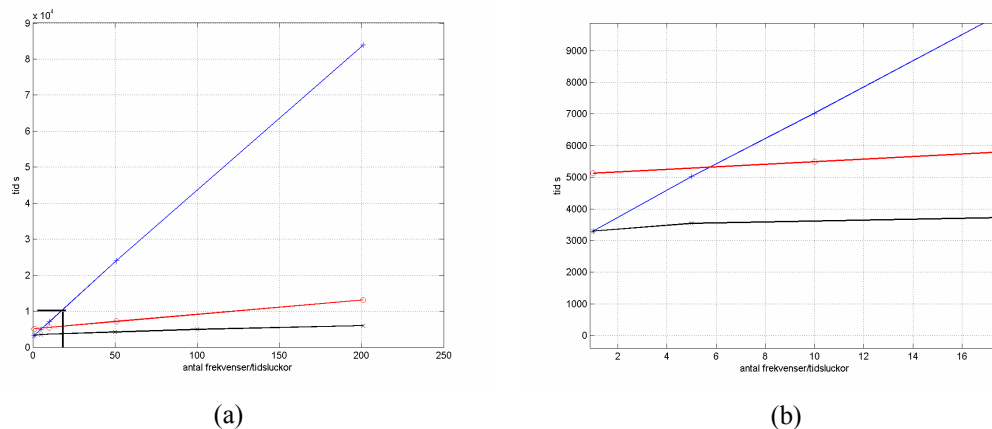
SPECRAY EM är tänkt att kunna användas för elektromagnetiska beräkningar i stora scener bestående av en mängd komplicerade objekt med ett stort antal fasetter. Det är också tänkt att kunna användas vid ISAR-beräkningar där ett stort antal vinklar och frekvenser kan krävas för hög upplösning och stora entydighetsavstånd. För att kunna generera data inom rimlig tidsram krävs hög prestanda av programmet. Detta avsnitt syftar till att undersöka SPECRAY EMs snabbhet beroende på olika parametrar.

I SPECRAY EM kan en mängd parametrar ställas, och eftersom programmets snabbhet beror av exempelvis initial upplösning, hur många vinklar som skall beräknas, hur objektet ser ut, antal frekvenser, vilken anti-aliasning nivå som skall väljas, eller hur många studsar som skall beaktas etc. är det svårt att göra någon direkt jämförelse av snabbhet med något annat program. Genom att välja dessa parametrar beroende på scenens geometri kan programmets snabbhet ökas. I detta avsnitt kommer ändå SPECRAY EMs snabbhet att jämföras med FOPOL som är ett snabbt beräkningsprogram. Då jämförelse sker mellan programmen kommer SPECRAY EMs parametrar att ställas så att noggrannheten blir likvärdig med FOPOLs. Eftersom FOPOL och SPECRAY EM körs på olika system, FOPOL på en "Sun Blade 2000 (1,015 GHz)" Unix-maskin, och SPECRAY EM på en PC "Precision WorkStation 530 (2,0 GHz Xeon)" är det viktigt att dessa maskiner relateras till varandra. Kvoten mellan CPU

Base fås från [13] och är $798/682 \approx 1,17$. För att jämföra algoritmsnabbheten bör därför FOPOLs tid divideras med denna faktor.

Vid generering av data för ISAR-beräkningar används ofta ett stort antal frekvenser och ett stort antal vinklar för att få hög upplösning och stort entydighetsavstånd. Det går också att generera ISAR-bilder genom att använda avståndsluckor, vilket innebär att tidsluckor läggs över objektet. Radarreturen från respektive tidslucka beräknas och sorteras med stigande tidsordning för att på så sätt få en avståndsprofil av objektet. Metoden att använda sig av avståndsluckor finns implementerad i SPECRAY EM i den monostatiska beräkningsmoden.

En jämförelse av beräkningstid har gjorts mellan FOPOL och SPECRAY EM på en T72 stridsvagn bestående av 34600 fasetter. Beräkningen har gjorts över 181 vinklar och med olika antal frekvenser. För SPECRAY EM har beräkningen även gjorts med avståndsluckor. Resultaten av jämförelsen illustreras i Figur 4-9 (a) och (b).



Figur 4-9 (a)-(b): Illustrerar beräkningstid för 181 vinklar som funktion av antalet frekvenser/avståndslucka på en T72 stridsvagn bestående av 34600 fasetter. Blå kurva visar multifrekvensberäkning med SPECRAY EM och röd kurva med FOPOL. Svart kurva visar beräkning av avståndsluckor med SPECRAY EM.

Från Figur 4-9 (b) fås att både multifrekvensberäkningen och range-gate-beräkningen för 1 frekvens resp. avståndslucka i medeltal tar ca. 17,6 s, vilket är ca. 56% snabbare än FOPOL. Detta visar på att SPECRAY EM har en betydligt mer optimerad strålföljningsalgoritm än FOPOL trots att den är mer avancerad. Man noterar dock att multifrekvensberäkningen i SPECRAY EM (blå kurva) har en betydligt större riktningskoefficient än FOPOL (röd kurva) varför en multifrekvensberäkning med fler än 6 frekvenser blir snabbare med FOPOL än med SPECRAY EM. Ett kvalitativt mått på hur pass optimerad programmen är med avseende på frekvensstegning är

$$\frac{\text{beräkningstid}}{(\text{antal frekvenser}) * (\text{beräkningstid för en frekvens})}$$

För FOPOL blir denna ca 1,2% och för SPECRAY EM ca 12%. Man bör dock betänka att FOPOL endast hanterar perfekta ledare vilket medför att ingen geometri behövs räknas om vid frekvensstegning vilket förklarar det

hög prestandavärde. Ett betydligt snabbare och mer effektivt sätt än frekvensstegning är att använda sig av avståndsluckor i SPECRAY EM. Beräkningstiden för en avståndslucka är densamma som för en frekvens, men tidsförlusten vid en ökning av antalet avståndsluckor är mycket liten. Vid beräkning av avståndsluckor blir storheten

$$\frac{\text{beräkningstid}}{(\text{antal avståndsluckor}) * (\text{beräkningstid för en avståndslucka})}$$

ca. 0,9%. Genom att använda sig av avståndsluckor istället för frekvensstegning vid generering av ISAR-bilder eller avståndsp profiler, reduceras beräkningstiden avsevärt. Man bör naturligtvis betänka att detta endast blir analogt med frekvensstegning vid generering av ISAR-bilder då objektet inte har dielektriska material som varierar inom det aktuella frekvensbandet.

5 Simulering av radarsensorer

I denna utvärdering har fokus legat på validering av mjukvarans korrekthet, varför radarmålyteberäkningar fått mest utrymme. Programvaran kan även användas till simulering av radarsystem i markscenarier. För detta ändamål finns en markklottermodell implementerad i programvaran. I den utvärderade versionen är klottermodellen endast monostatisk och tar inte hänsyn till objekt-markinteraktion. Skuggfenomen behandlas dock och en speckelmodell är också inlagd, vilket ger realistiska SAR-bilder. Eftersom markmodellen är monostatisk är det den monostatiska beräkningsmoden som används för dessa simuleringar.

Följande funktioner är endast tillgängliga för den monostatiska moden:

- Doppler
- Radarskanning
- Speckel
- Volumetriskt klotter
- Avståndsluckor och autokorrelationsfunktion (tvetydighetsfunktion)
- Beräkning av fält utan att definiera mottagarpunkter

Följande funktioner finns bara i den multistatiska moden:

- Multifrekvens
- Multipla mottagarpunkter
- Multipla sändare
- Definition av dipolantenn
- Beräkning av antenndiagram
- H-fält beräkning

Antenndiagram och lobvidd, sändareffekt, polarisation etc. kan konfigureras i båda moderna. Verktyg för att definiera antenndiagram finns att tillgå, men har inte varit med i den uppsättning program som utvärderats här.

Parametrarna, inklusive skanningsmönster och flygtrajektorier, definieras i konfigureringsfiler innan simuleringen startas. Detta fungerar väl för små och kontrollerade scenarier, men är begränsande vid mer avancerade studier. En del extra arbete krävs dock för att realisera simuleringar av återkopplade system, där flygtrajektorier och sensorinriktningar inte på förhand är definierade. För varje iteration måste konfigureringsfilerna då uppdateras och beräkningsprogrammet återstartas. Detta kan dock automatiseras, men varje omstart av simuleringen tar tid eftersom terrängmodeller etc. på nytt måste läsas in från disk.

För att underlätta hanteringen och förbättra prestanda bör mjukvaran förses med ett programmeringsinterface där extern programvara kan kontrollera simuleringens huvudloop och hantera sensorinställningar, objektpositioner etc.

5.1 Mark och klottermodell

För att få en verklighetstrogen simulering av objekt i markbakgrund, måste en klottermodell som tar hänsyn till olika material, växtlighetstyper etc. införas i simuleringsverktyget. Det finns idag inga bra deterministiska modeller för detta ändamål, utan de som används är baserade på statistiska beskrivningar av radarreturens beteende vid markinteraktion. För varje typ av terräng eller material är de huvudsakliga parametrarna i dessa modeller:

- Infallsvinkel mot ytan (monostatiska fallet)
- Materialets statistiska fördelning om man förflyttar sig över ytan (spatial statistisk fördelning)
- Fasens statistiska fördelning, spatialt och temporalt (sempel till sampel)
- Medelnivån för radarreturen

Det som försvårar implementeringen av dessa statistiska modeller är att de är upplösningens beroende, dvs. de förändras om sensorns upplösning på marken förändras. Det innebär att man måste anpassa klottermodellen efter upplösningen på den tänkta sensorn, vilket kan vara svårt att göra på ett korrekt sätt om klottermodellen inte är tillräckligt flexibel.

Det är viktigt att påpeka att de modeller som finns tillgängliga modellerar monostatisk tillbakaspridning. Det innebär att endast direktbidrag från marken hanteras, dvs. ingen interaktion mellan objekt och mark beaktas. Om man vill modellera interaktionen måste bistatiska klottermodeller användas. Forskning pågår kring dessa typer av modeller, men arbete kvarstår innan de kan införas i verktyg av detta slag.

SPECRAY EM hanterar markklotter genom att [7], för varje polarisations-term (σ_{HH} , σ_{HV} , σ_{VH} , σ_{VV}), dela upp den variationen hos radarmålytan i ett nominellt värde, en spatial del, en vinkelberoende del och en fastterm. Dessa sätts sedan samman för att bilda en radarmålyta för varje stråle - markinteraktion med varierande fas. De olika delarna är dock deterministiska, dvs. ingen temporal variation modelleras.

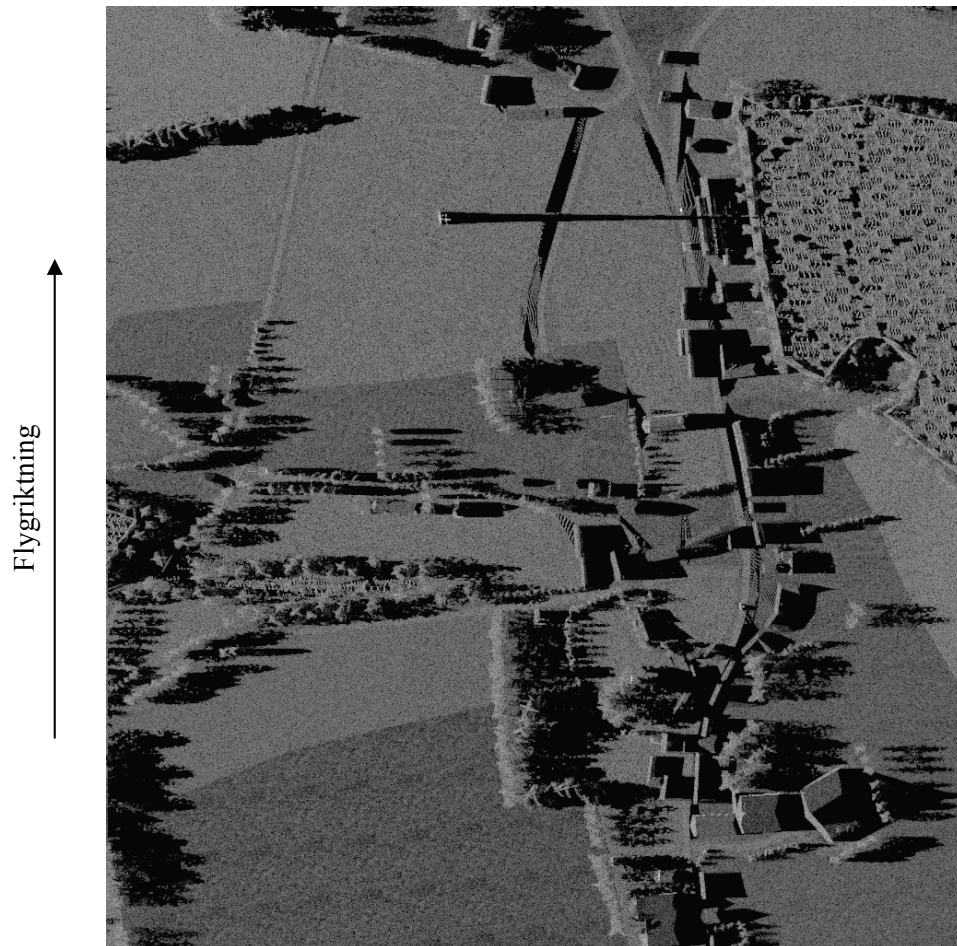
I de material som vi undersökt modelleras vinkelberoendet med en endimensionell textur, där de olika datapunkterna motsvarar en avvikelse från det nominella värdet för en viss infallsvinkel räknat från ytnormalen. Att endast använda en vinkel medför att man antar att ytan reflekterar lika oberoende av infallsriktningens asimutvinkel kring ytnormalen. För de flesta typer av terräng är detta ett rimligt antagande, men för t.ex. plöjd åkermark är det tveksamt om det ger ett bra resultat. Det finns dock, enligt

tillverkaren, inget som hindrar att man definierar egna material med tvådimensionella texturer, där även asinutvinkeln påverkar returen.

De spatiala variationerna hos radarmålytan, liksom fasvariationerna, modelleras med en tvådimensionell textur. För dessa texturer anges den fysiska utbredning de är definierade för och varje pixel i texturen anger en avvikelse från den nominella radarmålytan. Genom att slumpa dessa värden från en lämplig statistisk fördelning fås ett material vars beteende efterliknar den terrängtyp man vill efterlikna.

5.2 Realapertur och SAR

Som beskrivits ovan är det i den monostatiska moden som det finns möjlighet att använda material med statistiskt fördelat klotter och speckel.



Figur 5-1: En SAR-bild simulerad från terrängmodellen över Gelven i Frankrike, som levereras tillsammans med programvaran. Terrängmodellen är relativt lågupplöst vad gäller geometri och materialtextur. Upplösningen på SAR-bilden är ca 1x1 m. Man kan också lägga märke till specklet som fås med i bilden, vilket härrör från de materialegenskaper som markmodellen använder. Ett visst periodiskt mönster från den begränsade modulationstexturen kan skönjas.

Det finns flera sätt att generera SAR-bilder med SPECRAY EM. Det enklaste sättet är att approximera SAR-systemet genom att använda en real-apertursimulering. Man "skannar" då upp en SAR-bild över området man vill avbilda genom att flyga längs en rakbana och samla på sig bild-information "rad för rad", se Figur 5-1. Denna metod ger enkelt SAR-liknande bilder, men det saknas en del sensoreffekter som kan vara av intresse att simulera.

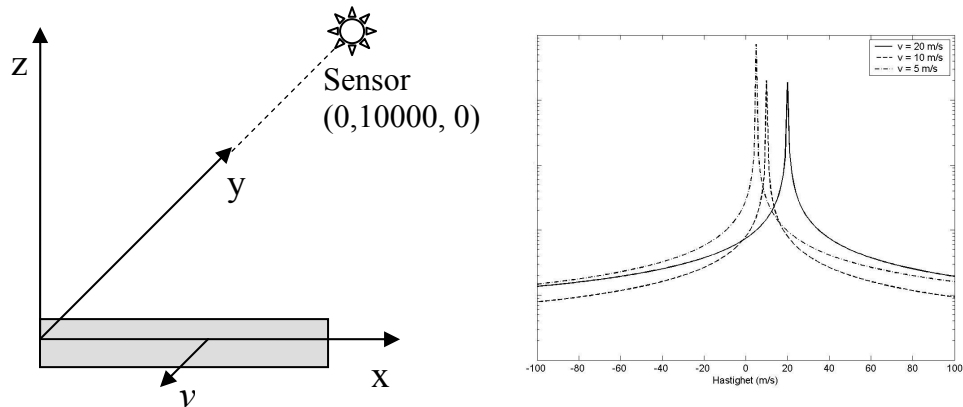
För mer avancerade SAR-simuleringar kan man dock använda en real-apertur med korrekt vidd och sedan använda SAR-algoritmer på vanligt vis. Dock fås avståndsluckor direkt vid varje sampelposition längs flygsträckan, vilket innebär att man direkt hamnar i s.k. "parabel"-bilder vid SAR-simuleringen. Detta innebär att bilderna är högupplösta i avståndsled, men lågupplösta i vinkelled. En nackdel med detta är att man inte kan ta hänsyn till frekvensberoende materialparametrar hos terräng eller mål. Å andra sidan fås en prestandaförbättring, eftersom det är mer beräkningskrävande att simulera varje frekvens i signalen.

5.3 Doppler

Det är möjligt att utföra doppler-simuleringar med programvaran, dock endast i det monostatiska fallet. För att bestämma ett objekts hastighet krävs allmänt att det studeras under en viss tid. Vid doppler-mätningar integreras därför ett antal pulser under ett tidsintervall. Hur många pulser som ska användas vid doppler-simulering i SPECRAY EM anges i konfigureringsfilen för sensorn tillsammans med integrationstiden. Simuleringarna resulterar i ett antal utdata-filer (SPR-filer) som innehåller amplitud och fas för varje puls och varje avståndslucka. Dessa data erhålls för vertikal respektive horisontell polarisation. En enskild SPR-fil innehåller data som motsvarar ett sampel i scenariot. Utifrån dessa data kan doppler-spektrum tas fram. Vid utvärderingen har ett par olika doppler-simuleringar utförts och dessa beskrivs nedan.

5.3.1 Platta som rör sig linjärt

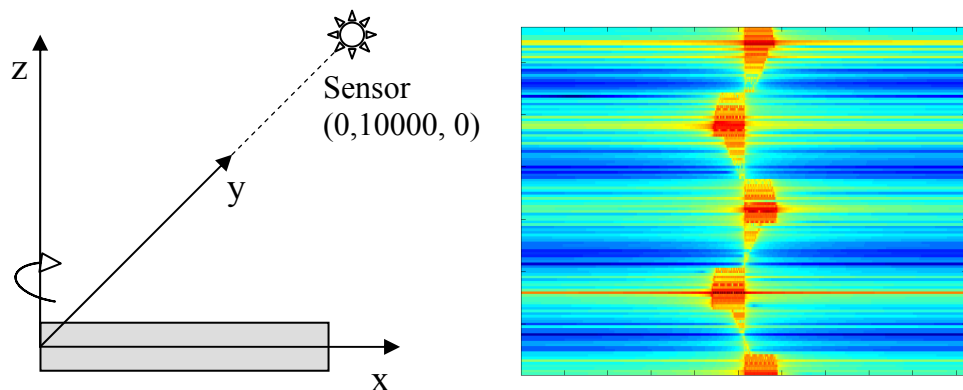
Simuleringar har utförts med en platta som är 6x1 m och rör sig rakt bort ifrån sensorn. Sensorn befinner sig vid simuleringens början 10 km från plattan. Beräkningarna utförs med tre olika hastigheter för plattan: 5, 10 och 20 m/s. Figur 5-2 visar resultatet. Som figuren visar ger simuleringen en korrekt uppskattning av den konstanta hastigheten för de tre fallen.



Figur 5-2: Till vänster illustreras plattans rörelse i förhållande till sensorn och till höger visas formen av det resulterande doppler-spektrumet för $v = 5, 10$ och 20 m/s.

5.3.2 Roterande platta

Simuleringar har även utförts med en roterande platta av samma storlek. Plattan roterar kring z-axeln och sensorn befinner sig även vid dessa beräkningar 10 km ifrån plattan. Figur 5-3 visar plattans rörelse i förhållande till sensorn och den resulterande tid/frekvens-analysen. Principutseendet i resultatbilden är korrekt. Hastigheten är vid startögonblicket positiv och när plattan har roterat 180° är hastigheten lika stor men negativ. Hastigheten pendlar sedan mellan dessa värden under rörelsen. En närmare studie av resultatbilden visar dock att antalet perioder för rörelsen är felaktigt. Tid/frekvens-analysen ska egentligen motsvara $2\frac{2}{3}$ varv för plattan, men resultatbilden visar bara drygt två perioder. Detta beror på ett fel i trajektoriehanteringen. OKTAL har informerats om problemet och det kommer att åtgärdas.



Figur 5-3: Illustration av plattans rörelse till vänster och tid/frekvens-analysen av den framsimulerade signalen till höger.

6 Geometri och materialhantering

6.1 Geometri- och terrängdatabaskonvertering

Geometri och databaskonvertering är en viktig del i ett programpaket av det här slaget. FOI arbetar med ett flertal olika verktyg för att ta fram och modifiera syntetiska omgivningar och målobjekt. Dessa verktyg kan bara spara data till vissa typer av filer. Dessutom köper vi in målobjekt från tredje part och kan i flera fall då inte direkt styra i vilket filformat modellerna levereras. Det finns verktyg för att konvertera mellan vanliga filformat, men eftersom OKTAL SE använder ett eget format måste ett konverteringsprogram för översättning mellan deras format och något eller några andra "standardformat" användas.

FFT är benämningen på en uppsättning program för att hantera detta. OKTAL SEs interna format kallas SDM och lagras i filer med extensionen ".bdd". De format som hanteras av FFT-programmen är OpenFlight version 14.2.4 till 15.6 och OpenInventor VRML (version 1 och 2 i Windows, medan endast version 1 hanteras på SGI-plattform). För FOI är det främst OpenFlight som har varit av intresse att utvärdera, eftersom detta filformat hittills varit intern FOI-"standard" och flera syntetiska omgivningar och målobjekt är lagrade i detta format.

Verktygen är kommandoradsorienterade och har få optioner. Detta gör handhavandet enkelt, men medger liten anpassning av konverteringen. Man anger indatafil och utdatafil plus eventuellt om externrefererade objekt automatiskt skall konverteras och inkluderas i utdatafilen.

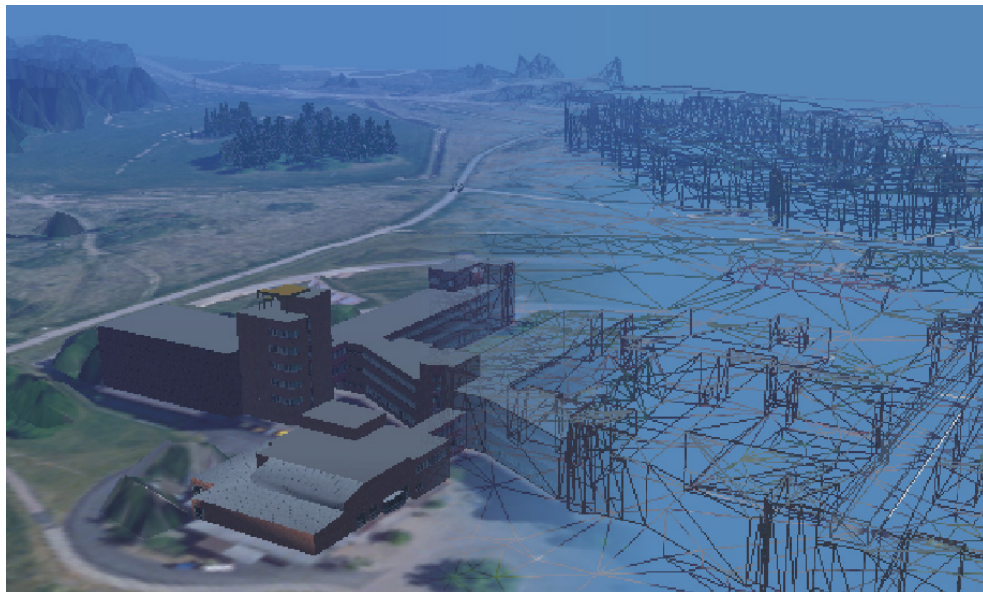
FFT konverterar modellerna vi provat ganska väl. En del problem uppkom dock då modellen hade fler detaljnivåer (level of details, LOD), vilket dock kan hanteras genom att förbehandla modellerna. Verktuget som hittills använts för generering av terrängmodellerna har dock en begränsning på att minst två detaljnivåer finns hos de skapade filerna.

Vid konvertering av terrängdatabaser som redan texturerats och preparerats med materialklassning, uppstår också en del problem. Verktuget konverterar geometrin och textureringen på ett korrekt sätt, men det finns ingen möjlighet att i detta steg ta med materialklassningsinformation. Detta medför att man sedan manuellt måste återapplicera material på geometrin.

6.2 Materialhantering och klassificering

För att kunna beräkna radarsignatur för ett objekt eller terräng måste den vara materialklassificerad och fysikaliska materialdata, avsnitt 5.1, måste vara associerade till de olika materialen. Materialidentiteten kodas i form av texturer (mönster/fotografier) som draperas på geometrins polygoner, se Figur 6-1, och fysikalisk materialinformation kopplas sedan till denna materialidentitet.

För att få en klassificerad materialtextur måste man först identifiera områden i texturen med samma material och därefter kan man klassificera dessa, dvs. tillföra fysikaliska materialdata. För identifieringen används Photoshop¹ och för klassificeringen används verktyget PTT2.



Figur 6-1: Geometrin i en syntetisk omgivning består av polygoner som "draperas" med texturer för att höja detaljrikedomen i modellen. Dessa texturer utgör grunden för materialklassningen.

Vid identifieringen görs en visuell identifiering av de olika områdena från en komplex visuell textur (skog, väg, fält etc.). Efter identifieringen görs en klassificering då man associerar de olika områdena som är separerade i olika lager med grundläggande fysikaliska material.

När detta är gjort kan man öppna geometridatabasen med GAIA IR. Med GAIA IR fås en tydlig visualisering av databasen och dess hierarki. För att med hänsyn till geometriska faktorer kunna associera en eller flera polygoner med ett material använder man polygon texturering.

I GAIA IR kan man även ändra materialegenskaperna som RGB data för visuell representation och de optroniska egenskaperna. För de elektromagnetiska egenskaperna finns det flera parametrar som kan varieras, t.ex. amplitud och fasvärden för reflektionskomponenterna H och V för varje våglängd, amplitud och fasvärden för bakåtspridningskomponenterna HH, HV, VH och VV för varje våglängd. Nya materialegenskaper kan erhållas

¹ Photoshop är en bildbehandlingsprogramvara från Adobe, www.adobe.com

genom att sätta samman olika material i en följd av lager. Man måste då bestämma tjocklek och vilket material som ska associeras till varje lager.

Ett objekt eller fasett associeras till ett antal olika material genom en materialfil (.mat). I materialfilen kan ett antal material ingå och här finns även referenser till varje enskilt materials texturfil (.cmt). Denna fil innehåller definitioner av vilka vinkel- och frekvensberoende texturer (.ips) som används i materialfilen.

För att skapa dessa ips-filer kan programmet EM2MPS som körs från kommandoprompten användas. Ett material kan då bestå av flera lager med olika tjocklek som i sin tur består av olika material. Vill man definiera ett helt nytt material, eller ett nytt frekvensområde för ett redan känt material måste de elektriska och magnetiska parametrarna definieras för varje ingående frekvens. Egenskaperna för den lägsta frekvens som definieras, kommer att användas för alla frekvenser under denna.

Vid beräkning av exempelvis anisotropa material måste ips-filen genereras på annat sätt, exempelvis genom uppmätta data, som sedan tabelleras och skrivs till ips-filen.

7 Dokumentation

Med programmet följer ett stort antal pdf-filer för dokumentation. Dessa är uppdelade i tre kataloger: format, fysikaliska modeller och användarhandledning. Totalt omfattar de ca 30 filer. Dokumenten är i flera fall av ”engelsk version 1.0”, vilket medför att en del språkliga felaktigheter förekommer. Innehållet i dokumentationen varierar med avseende på utförlighet och det kan i vissa fall vara svårt att förstå vad som menas.

De filer som beskriver filformat är dock ganska detaljerade och utförliga, men de kan uppfattas som något röriga och en del ytterligare förklaring kan på vissa ställen vara önskvärda.

Dokumenterna rörande de fysikaliska modellerna är mycket utförliga, lättöverskådliga och kan närmast liknas med formelsamlingar rörande elektromagnetisk spridning. Dokumenten beskriver i detalj de modeller som ingår och ger en mycket bra bild av programvarans kapacitet.

Användarhandledningarna är relativt utförliga men innehåller en del sakfel. Oftast beror nog dessa på att dokumenten har översatts under stor tidspress från franska till engelska. Det borde också finnas fler belysande exempel på hur programvaran används.

7.1 Support

Oktal har varit mycket tillmötesgående och hjälpsamma under utvärderingens gång. Det har varit relativt lätt att få svar på frågor via e-post och flertalet av de felaktigheter hos programvaran som framkommit under utvärderingen har snabbt åtgärdats.

Inledningsvis fick vi även en introduktionsutbildning som hjälpte oss att komma igång med programmet. Denna utbildning var värdefull eftersom programvaran är komplex att sätta sig in i på egen hand.

8 Slutsatser och kommentarer

Det övergripande intrycket av SPECRAY EM är att programvaran är mycket kvalificerad och har god funktionalitet och hög potential. En del brister finns dock och några ”buggar” upptäcktes under utvärderingen. De flesta ”buggarna” rättades dock snabbt till av OKTAL SE. Det kvarstående intrycket av SPECRAY EM är dock att det är en bra produkt som svarar mot flertalet av våra behov.

Speciellt vill vi påpeka kvalitén på den beräkningsmodell, inklusive hantering av dielektriska material, som utgör fysikalisk grund för beräkningarna. Av stort intresse är också att en elementär markspredningsmodell finns integrerad i simuleringsmodellen, tillsammans med en speckelmodell. Vi vill också uppmärksamma den goda flexibiliteten och funktionen hos den raytracer som är kärnan i programmet och som möjliggör en adaptiv hantering av alias-fenomen i beräkningarna.

Ytterligare några generella kommentarer som är värda att notera är:

- Programvaran finns till olika plattformar, såsom Linux och Windows. Även en version anpassad till klusterberäkningar finns.
- Verktyget kan hantera stora objekt med många facetter. I huvudsak är det minnet som begränsar storleken på objekten och inte några inbyggda begränsningar.
- Programvaran arbetar främst med konfigurationsfiler i textformat. Detta medger stor kontroll på enskilda beräkningar men kräver noggrant specificerade scenarion. Inledningsvis medför det också en ganska hög tröskel att komma över innan man kan använda programvaran optimalt.
- De grafiska verktygen som finns är användbara, men här finns utrymme för förbättringar. GAIA IR är dock värd att uppmärksamma, eftersom det innehåller flera bra funktioner för t.ex. texturhantering av modeller.
- Från början är programmet skrivet på franska och processen att översätta alla delar till engelska pågår. I den version vi har utvärderat har man dock inte nått ända fram, utan i flera konfigurationsfiler är kontrollord etc. på franska. Man ska dock inte överdriva problematiken med detta, men det underlättar naturligtvis under inlärningsfasen om språket är korrekt. När man väl insett betydelsen av orden är programmet dock fullt hanterbart.
- Programmet är designat för att köras i ”batchar”, vilket är bra för de flesta av våra syften. Möjlighet att kontrollera simuleringens tidsloop finns också i form av ett programmeringsinterface.

- Kommandofilsstrukturen för konfiguration, etc. lämpar sig väl för att göra egna anpassade verktyg för att förenkla handhavandet vid t.ex. RCS-beräkningar.

8.1 Validering av radarmålyteberäkningar

SPECRAY EM har utvärderats för en mängd testfall varav endast en delmängd har presenterats här. OKTAL SE har dessutom genomfört en hel del valideringsarbete som FOI kunnat ta del av. Resultaten från kapitel 4 kan sammanfattas i följande punkter:

- SPECRAY EM har gett samma resultat som valideringskoderna vid både monostatisk och bistatisk beräkning.
- Beräkningar på dielektriska material har gett samma resultat som valideringskoderna i det monostatiska fallet. Eftersom transmitterade fält inte beaktas krävs i det bistatiska fallet att materialen inte är transparenta. Om så är fallet ger SPECRAY EM samma resultat som valideringskoderna.
- SPECRAY EMs diffraktionsalgoritm bygger på ILDC vilket gör att det går att beräkna bidrag utanför Keller-konen. Det är i nuläget inte användbart för mycket komplicerade objekt, eftersom man för närvarande är tvungen att definiera de kanter där ILDC skall användas för hand.
- SPECRAY EM har en mycket snabb och optimerad ray-tracing-algoritm. Tidsförlusten vid multifrekvensberäkningar är dock något stor. För generering av ISAR-bilder kan istället avståndsluckor användas. Tidsberoendet som funktion av antal avståndsluckor är väldigt litet.

Den fysikaliska modell som utgör grunden för SPECRAY EM bygger på fysikalisk optik, vilket medför en del begränsningar på modellens giltighet och användningsområden. Några av dessa är

- Resonansfenomen, såsom yt- och krypvågsfenomen beaktas inte
- Krökta ytor och detaljer med krökningsradier mindre än våglängdsstorlek kan beräknas felaktigt
- Kaviteter hanteras inte väl av dessa metoder

8.2 Simulering av radarsystem i syntetiska miljöer

För att använda denna typ av programvara för att utvärdera radarsystem med hjälp av simuleringar i naturtrogna syntetiska omgivningar, ställs något andra krav än vid radarmålyteberäkningar. Man bör därför påpeka att

programvaran i första hand inte är avsedd för detta syfte, men att ambitionen hos OKTAL SE är att även kunna hantera simuleringar av detta slag med denna programvara.

Med en liten insats bedöms att den version av programvaran som vi har utvärderat kommer att kunna användas för simulering av radarsensorer i enklare scenarion. Exempel på sådana scenarion är anflygningsförlopp mot markmål eller simulering av SAR-sensorer för spaning mot markmål.

Här följer några kommentarer rörande användningen av SPECRAY EM för dessa ändamål.

- Den markmodell som finns implementerad i nuläget hanterar inte mål – markinteraktion. Å andra sidan hanterar de alternativa verktyg vi har tillgång till inte material i någon form och saknar helt markmodell.
- Markmodellen är relativt enkel att bygga ut med olika speckelmodeller och material. Det finns dock inga verktyg för detta, men eftersom filformatet för materialen i huvudsak är textbaserat, kan man med ganska liten insats göra egna verktyg.
- Modellhanteringen, och då främst formatkonverteringen av terrängdatabaser, behöver förbättras. I nuläget kan geometrier med visuell textur konverteras. Eventuell materialklassning går förlorad och måste göras om. För mindre områden (ca 200x200 meter) medför detta ett marginellt merarbete, men för större modeller är detta ett problem.
- API för integrering mot andra system eller simulatorer finns delvis. En del funktioner för t.ex. dynamisk kontroll av sensorinställningar behöver dock kompletteras. Med de tillgängliga funktionerna kan man dock skapa en grundläggande simuleringsmedlem.
- Det finns även en nerskalad version av programvaran som är mer realtidsanpassad. Vi har dock inte haft möjlighet att utvärdera denna, och har därför inte mer att säga om den än att den existerar.

9 Referenser

- [1] C. Chappet och L. Rasoanaivo, "VISUPS User Manual", OKTAL SE, VisuSPS/31-00.075/B – v 1.3, 2004
- [2] C. Marmelo och S. Kaladgew, "PTT 2", OKTAL SE, 159-02.59/A – v 1.4, 2004
- [3] S. Kaladgew, "FFT User Manual", OKTAL SE, MT / 186-04.107/A-v 1.0, 2004
- [4] C. Marmelo, et.al., "GAIA User Manual", OKTAL SE, GaiaIR/87-01.70/A-v 7.1, 2004
- [5] P. Pitot och P. Nguyen, "SPECRAY EM user guide", OKTAL SE, FERM/028 2003.17/A - v 1.7, 2003.
- [6] T. Martin, "EMB användargrupp - sammanställning av beräkningsresultat", FOI Memo 01-2947, 2001.
- [7] P. Nguyen, "EM Physical Model", OKTAL SE, FERM/235 - 02.154/A - v2.3, 2003.
- [8] J. Rahm och M. Gustafsson, "RCS calculations of 80, 90 and 100 dihedrals with fopol", FOI MEMO 825, 2003.
- [9] J. Löthegård, et.al., "Interlaboratory comparisons between the RCS ranges at FOA Defence Research Establishment and SAAB Dynamics", presented at AMTA 99, Monterey USA, 1999.
- [10] R. Eriksson och C. Larsson, "FOPOL - en handledning", FOA-R--98-00850-615--SE, 1998.
- [11] H. O. Berlin, J. Rahm och C. Larsson, "Utveckling och implementering av Columbus, ett verktyg för ISAR-analys", FOA-R--00-01491-615--SE, April 2000.
- [12] E. F. Knott, J. F. Schaeffer, och M. T. Tuley, "Radar Cross Section", 2 ed: Artech House, 1993.
- [13] Internet: www.spec.org.