

Stefan Nilsson, Jonas Rahm,
Magnus Gustafsson, Nils Gustafsson,
Johan Rasmusson, Erik Zdansky

Slutrapport

Radarsignaturprojektet

2001-2003



TOTALFÖRSVARETS FORSKNING SINSTITUT

Sensorteknik

Box 1165

581 11 Linköping

FOI-R--1012--SE

December 2003

ISSN 1650-1942

Användarrapport

Stefan Nilsson, Jonas Rahm,
Magnus Gustafsson, Nils Gustafsson,
Johan Rasmusson, Erik Zdansky

Slutrapport
Radarsignaturprojektet
2001-2003

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Sensorteknik Box 1165 581 11 Linköping	Rapportnummer, ISRN FOI-R--1012--SE	Klassificering Användarrapport
	Forskningsområde 6. Telekrig	
	Månad, år December 2003	Projektnummer E 3015
	Verksamhetsgren 5. Uppdragsfinansierad verksamhet	
	Delområde 62. Signaturanpassning	
Författare/redaktör Stefan Nilsson Jonas Rahm Magnus Gustafsson Nils Gustafsson Johan Rasmusson Erik Zdansky	Projektledare Jonas Rahm	
	Godkänd av Svante Ödman	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning Försvarsmakten	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig Jonas Rahm	
Rapportens titel Slutrapport Radarsignaturprojektet 2001-2003		
Sammanfattning (högst 200 ord) <p>Denna rapport är en kortfattad redovisning av den verksamhet och de avtappningar m.m. som gjorts inom ramen för radarsignaturprojektet under åren 2001-03. För mer detaljerad information om projektets arbeten hänvisas till de olika rapporter och memo som utgivits.</p> <p>Huvudmålet för projektet har varit att utveckla nya och förbättrade modelleringsmetoder för beräkning av radarmålarea. Arbetet har stöttats av experimentella mätningar, vid bl.a. FOIs mätplats Lilla Gåra. Ett viktigt fokus för projektet har varit att ta fram modelleringsmetoder som beaktar radarvågornas interaktion mellan mark och objekt. Denna växelverkan kan ge signifikanta bidrag till den totala radarmålarean för ett markobjekt. För att kunna modellera detta bidrag krävs kunskap om hur olika marktyper sprider radarvågen, och man måste således bestämma den s.k. bistatiska spridningsmatrisen. För att validera modelleringsmetoderna krävs noggranna kontrollerade mätningar. Projektet har därför under 2003 tagit fram underlag till en ny mätfacilitet - den s.k. "bistatiska mätbågen" - som FOIs verkstad konstruerat. Den finns nu vid Lilla Gåra där inledande bistatiska mätningar redan genomförts.</p> <p>Under 2003 startades ett 3-årigt CEPA-projekt (Sve, Spa, Eng, Tys, Ita) där medlemmar från radarsignaturprojektet medverkar. Sverige är ordförande för CEPA-projektet som leds av Jonas Rahm. Det 3-åriga projektet syftar till grundläggande förståelse av mål-bakgrundsinteraktionen.</p>		
Nyckelord RCS, radarmålarea, radarreflektivitet, markmålarea, bistatisk, radarmätning, mätmetodik, markspridning, mark-mål-växelverkan, diffus spridning, bistatisk spridningsmatris		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 21 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--1012--SE	Report type User Report
	Research area code 6. Electronic warfare	
	Month year December 2003	Project no. E 3015
	Customers code 5. Commissioned research	
	Sub area code 62. Stealth Technology	
Author/s (editor/s) Stefan Nilsson Jonas Rahm Magnus Gustafsson Nils Gustafsson Johan Rasmusson Erik Zdansky	Project manager Jonas Rahm	
	Approved by Svante Ödman	
	Sponsoring agency Swedish Armed Forces	
	Scientifically and technically responsible Jonas Rahm	
Report title (In translation) Final report Radar Signature Project 2001-2003		
Abstract (not more than 200 words) <p>This report is a short account of the activities, outputs etc, of the radar signature project in the years 2001-2003. For more detailed information about the activities we refer to the various issued reports and memos.</p> <p>The main goal of the project has been to develop new and improved modelling methods for radar cross section calculations. The work has been supported with measurements at the FOI site at Lilla Gåra. An important focus for the project has been to develop modelling methods which take into account the interaction of the radar waves with the ground and targets. This interaction can give a significant contribution to the total radar cross section of a ground object. To be able to model this contribution, knowledge is needed of how different ground types scatter the radar wave in different directions and at different frequencies – one thus has to determine the so-called bistatic scattering matrix. In order to validate the modelling methods, carefully controlled measurements are needed. The project has therefore in 2003 produced the basis for a new measurement facility – the so-called “bistatic measurement arch” – which has been designed and manufactured in the FOI workshop. It is now to be found at Lilla Gåra and preliminary bistatic measurements have already been carried out.</p> <p>In 2003 a three-year CEPA-project was initiated (Swe, Spa, Eng, Ger, Ita) where members of the radar signature project are taking part. Sweden chairs the project, with Jonas Rahm as chairman. The project aims at a basic understanding of the target-background interaction.</p>		
Keywords RCS, radar cross section, radar reflectivity, ground cross section, bistatic, radar measurement, measurement methodology, ground scattering, ground-target interaction, diffuse scattering, bistatic scattering matrix		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 21 p.	
	Price acc. to pricelist	

Innehåll

Inledning.....	5
Bakgrund	5
Forskningsinriktning och måluppfyllnad	5
Korta fakta om projektet.....	6
Redovisning av deluppgifter	7
Utveckling av Columbus	7
Radarmålareaoptimering av en UAV	8
Algoritm för beräkning av radarmålyta med NURBS-ytor	9
Resultatjämförelse mellan olika PO-koder.....	10
Användning av fysikalisk optik vid multipelreflektion för beräkning av radarmålarea.....	11
Plasma som radarabsorbent	12
Utveckling av modelleringsmetoder för markbakgrund.....	13
Jämförelse mellan beräkningar och mätningar av radarmålarea för plan platta i markbakgrund....	14
Mätmetoder för bistatisk markmålarea - en förstudie	15
Modelleringsmetoder för bistatisk markspridning	16
Bistatisk mätning.....	17
CEPA-projektet JP 1.18	18
Slutsatser och framåtblickar	19
Publikationslista	20

Inledning

Denna slutrapport redovisar en sammanfattning av den verksamhet och de resultat som genererats inom Radarsignaturprojektet under åren 2001-2003. Inledningsvis ges en bakgrund till syftet med forskningen inom radarsignaturområdet. Därefter redovisas projektets inriktning, mål, ekonomi och personal. Sedan följer en kortfattad redovisning av genomförda forskningsarbeten och de resultat som genererats. För mer specifik och detaljerad information hänvisas till de rapporter och memo som projektet utgivit. En publikationslista över redovisade prestationer återfinns i slutet av denna rapport.

Bakgrund

Signaturanpassning innebär taktiska fördelar och ett informationsöverläge som leder till ökad överlevnadsförmåga. Signaturanpassningsteknik (SAT) är ett prioriterat utvecklingsområde inom försvaret och anses som en viktig del vid såväl nykonstruktion som modifiering av olika plattformar. Välkända amerikanska SAT-projekt är flygplanen F-117 och B2 där formgivning och materialval kombinerats för att försvåra upptäckt. Generellt kan sägas att SAT-området har haft sin tyngdpunkt på flygfallet. De beräkningsverktyg som utvecklats för att beräkna och optimera radarmålarean har därför avsett objekt i frirymd.

På senare år har SAT även applicerats på sjö- och markbundna plattformar, t ex fartyg och stridsfordon. När det gäller markbundna objekt tillkommer ytterligare problem- och frågeställningar, som hur mark modelleras och hur radarsignaturen påverkas av växelverkan mellan mark och objekt, m.m. På grund av svårigheten att modellera mark har också markplattformar utformats ur ett frirymdsperspektiv och frirymdskrav har satts på objektens radarmålarea. Detta innebär att kraven varken varit särskilt relevanta eller realistiska för dessa plattformar. Dock har det funnits en medvetenhet om problemet och det har därför gjorts en del försök att uppskatta markens bidrag till den totala signaturen. När det gäller verifierande mätningar blir förhållandet omvänt. Frirymdsmätningar på fullskaleobjekt är nämligen generellt svårare att utföra än motsvarande markmätningar. Det är därför mycket viktigt att man redan från början av utvecklingsarbetet med, och kravsättningen av, nya markbundna plattformar tar hänsyn till olika marktypers spridande egenskaper.

Forskningsinriktning och måluppfyllnad

Med ledning av ovanstående har Radarsignaturprojektet fokuserat sin forskningsverksamhet mot tre behovsområden, som på sikt ger försvarsmakten god förmåga att utföra tillförlitliga signaturanpassningsåtgärder för objekt i bakgrund:

- Utveckla, implementera och validera olika beräkningsprogram för radarmålareaberäkningar. Projektet har koncentrerat arbetet mot högfrequensmetoder. Nya metoder har utvecklats och implementerats [2, 8, 18]. Jämförelse mellan olika program har visat på betydande inbördes resultatskillnader [11, 12], och vi bedömer att det finns ett fortsatt stort behov av att förbättra dessa verktyg. Projekt har lagt ned kraft mot att etablera en nationell samverkan inom området.
- Erhålla förmåga att ta fram relevanta och realistiska markmodeller för att kunna bestämma radarsignaturen, med hänsyn till radarvägens växelverkan mellan objekt och mark. Förstudiefasen [9, 16] är i princip avslutad och några intressanta beräkningsmodeller har redan implementerats. Därmed har delmålet för projektet uppfyllts. Den långsiktiga målsättningen är att ta

fram generella modeller som klarar av att modellera flertalet marktyper. Forskningsområdet är mycket aktuellt sett i ett europeiskt perspektiv [17,19].

- Validering av beräkningsverktyg och modeller via mätningar. Mätningar och beräkningar behöver gå hand i hand så att de kan verifiera varandra och ge ett beslutsunderlag av hög kvalitet. Detta kräver såväl mätmetodutveckling som modifiering av befintliga mätsystem. En förstudie avseende bistatiska markmätningar har genomförts [7] och med ledning härav har en bistatisk mätbåge konstruerats. Inledande bistatiska mätningar har genomförts [10] och målsättningen har därmed uppfyllts.

Huvudmålet för projektet har varit att utveckla nya och förbättrade modelleringsmetoder för beräkning av radarmålarea. Arbetet har stöttats av experimentella mätningar, vid bl. a. FOIs mätplats Lilla Gåra. Ett viktigt fokus för projektet har varit att ta fram modelleringsmetoder som beaktar radarvågornas interaktion mellan mark och objekt. Denna växelverkan kan ge signifikanta bidrag till den totala radarmålarean för ett markobjekt. För att kunna modellera detta bidrag krävs kunskap om hur olika marktyper sprider radarvågen i olika riktningar och för olika frekvenser - man måste således bestämma den bistatiska spridningsmatrisen. För att sedan kunna validera modelleringsmetoderna krävs noggranna kontrollerade mätningar. Projektet har därför under 2003 tagit fram underlag till en ny mätfacilitet - den s.k. "bistatiska mätbågen" - som FOIs verkstad sedan har konstruerat. Denna finns nu vid Lilla Gåra där inledande bistatiska mätningar redan har genomförts.

Under 2003 startades ett 3-årigt CEPA-projekt (Sve, Spa, Eng, Tys, Ita) som leds av PL radarsignaturer och som syftar till grundläggande förståelse av mål-bakgrundsinteraktionen.

Korta fakta om projektet

Projektbudget

År	Budget (kkr)
2001	5346
2002	5400
2003	5200

Projektmedarbetare

Namn	Arbetsområde	År
Jonas Rahm	PL, modellering, analys	2001-2003
Magnus Gustafsson	Modellering, teori, analys	2001-2003
Nils Gustafsson	Mätning, analys	2001-2003
Stefan Nilsson	bitr PL, teori, analys	2001-2003
Johan Rasmusson	Mätning, analys	okt 2001-2003
Erik Zdansky	Modellering, teori, analys	2001-2003

Samtliga projektmedarbetare tillhör Institutionen för Radarsensorer.

Redovisning av deluppgifter

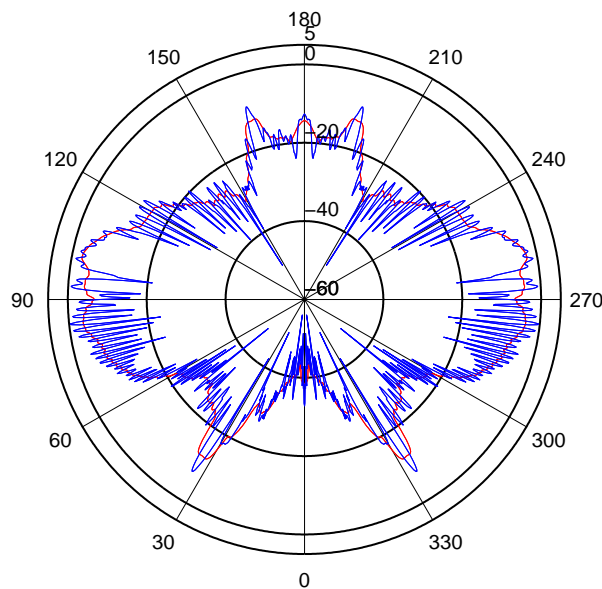
I följande avsnitt redovisas en sammanfattning av genomförda forskningsarbeten och deras resultat. Arbetena har helt eller delvis finansierats inom radarsignaturprojektet under åren 2001-03. För mer ingående information hänvisas läsaren till de rapporter och memo som projektet utgivit (se publikationslista i slutet av denna rapport).

Utveckling av Columbus

Columbus är ett egenutvecklat MATLAB-baserat analysverktyg för radarmålarea. Programmet utvecklades främst för att göra det enklare och snabbare för användaren att analysera stora datamängder från mätningar eller teoretiska beräkningar av radarmålarea. Columbus ger användaren en bättre överblick över data.

I april 2000 släpptes den nuvarande versionen av Columbus. Programmet distribuerades till FMV och försvarsindustrin i Sverige.

Med huvudfinansiering från FMV-Flyg gav FOI i uppdrag åt Saab Avionics (Christer Larsson) att åtgärda en del smärre "buggar" i Columbus, införa en del andra förbättringar såsom polärplottar (fig 1) samt att undersöka möjligheten att implementera s.k. noll-dopplerfiltrering och antennlobskompensering i programmet. Vid ungefär samma tidpunkt som arbetet inom uppdraget startade, lanserades en ny programversion av MATLAB - version 6.1. Med denna nya version framkom en rad nya buggar och skönhetsfel i Columbus. Även dessa åtgärdades inom ramen för uppdraget.



Figur 1. Exempel på en polärplott utförd med Columbus som illustrerar radarmålarean och dess medelvärde för ett objekt vid 11 GHz.

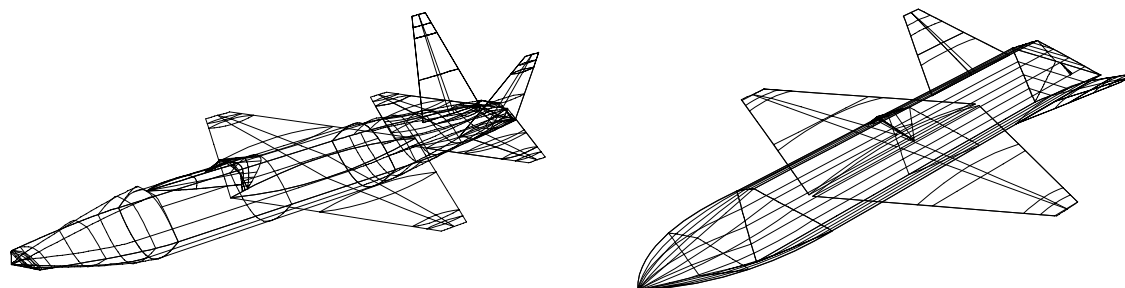
Radarmålareaoptimering av en UAV

Detta arbete [1] handlade om att optimera radarmålarean för en befintlig UAV (Unmanned aerial vehicle), genom att anpassa formgivningen. Syftet var att erhålla insikt i vilka slags geometrier som är fördelaktiga ur radarmålareasympunkt, samt att implementera dessa på en UAV. Det använda UAV-konceptet utformades enligt fyra grundkrav:

- jetdriven • bärare av elektrooptisk sensor (10 kg) • räckvidd 60 mil • storlek ca 2x2 m.

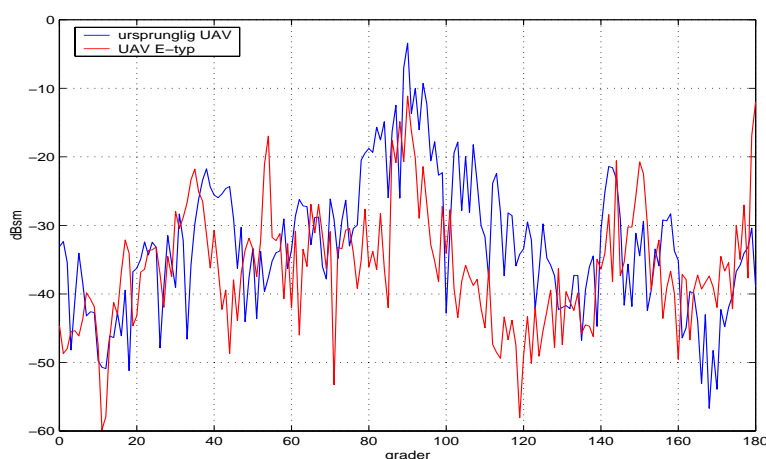
Ett prioriterat krav var att dess yttre mått skulle vara relativt oförändrade. I optimeringsarbetet beaktades farkostens aerodynamiska egenskaper i mindre grad.

Vid beräkningen av radarmålarean för UAVn användes programmet Radbase, som bygger på fysikalisk optik (PO). Programmet arbetar inom det s k högfrekventa området, med vilket menas att våglängden är liten i förhållande till objektet. Den ursprungliga UAVns radarmålarea analyserades och optimerades medelst kunskap om olika geometriers radarmålarea, samt med hjälp av beräkningsprogrammet Radbase och ISAR-programmet Columbus (fig 2).



Figur 2. Ursprunglig UAV till vänster och radarmålareaoptimerad UAV till höger.

De uppnådda resultaten visade på en genomsnittlig minskning av radarmålarean i horisontalplanet på ca 15 dBsm. En betydande reduktion av radarmålarean erhöles i det ur signatursynpunkt viktiga asimutvinkelintervallet $-20^\circ \leq \varphi \leq 20^\circ$. Vidare reducerades den breda loben vid $\varphi = 90$ grader till en smal spik. En kraftig reducering på ca 20 dBsm erhöles vidare i intervallet $90^\circ \leq \varphi \leq 140^\circ$ (fig 3). För att ytterligare minska radarmålarean, kan storvingarna modifieras.

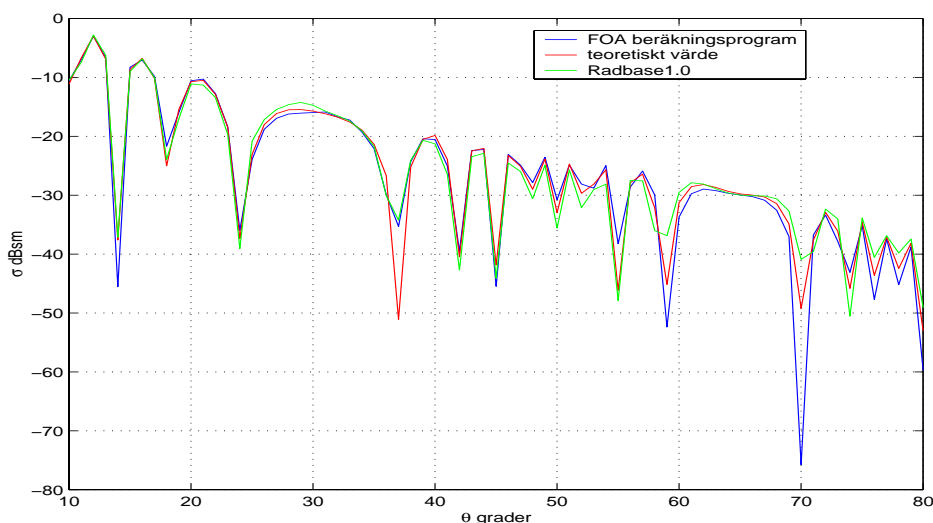


Figur 3. Radarmålarean för de båda UAVerna beräknad för VV-polarisation vid elevationsvinkeln 95° och frekvensen 10 GHz.

Algorithm för beräkning av radarmålyta med NURBS-ylor

NURBS (Non Uniform Rational B-Spline) är ett kraftfullt och relativt vanligt sätt att matematiskt beskriva allmänna kurvor, ytor och kroppar. Genom att använda NURBS-ylor kan en noggrann beskrivning av ytan behållas i ett sent skede av beräkningarna och den fasettindelning som behövs för beräkningen kan lättare justeras efter behov.

I ett arbete [2] implementerades NURBS-ylor för beräkning av radarmålyta med fysikalisk optik (PO) i MATLAB. Programmet utvärderades mot analytiska uttryck och ett kommersiellt PO-program. En studie av konvergens då en cirkel approximeras med en allt mer månghörnig polygon gjordes också. Förutsättningar för ett effektivt beräkningsverktyg finns här. Tills vidare saknar koden dock skuggningsalgoritmer eftersom den är skriven för en preliminär utvärdering av NURBS. Detta leder till inskränkningar i tillåten modellgeometri.



Figur 4. Illustrerar beräknad radarmålyta för en plan cirkulär disk med radien 1 m, frekvensen 10GHz och asimutvinkeln 0° . Teoretiskt värde avser ett analytiskt PO-uttryck.

Resultaten (fig 4) visade på god noggrannhet för de beräkningsfall som programmet är avsett att klara, och såväl felmarginer som beräkningstid kan minskas genom att lämplig fasettering väljs. En NURBS-beskrivning av objektet ger god kontroll över fasetteringen. För en plan yta bör randen ges en fin indelning, medan en indelning av ytan i övrigt inte spelar någon roll för resultatet. För en tredimensionell yta gäller dock andra villkor.

Problemet att avgöra vilka fasetter som är skuggade har inte lösts. En framtida programversion bör kunna läsa in NURBS-parametrar från ett CAD-program, t.ex. Rhinoceros, och sedan beräkna radarmålytan för objektet.

Fördelar med att utveckla ett eget beräkningsprogram är tillgången till källkod, kontroll över beräkningsalgoritmerna, men också möjlighet att vidareutveckla programmet. För att kunna beräkna radarmålytan för ett godtyckligt objekt i rummet, bör ett sådant program innehålla skuggningsalgoritmer, multipelreflektion och PTD (Physical Theory of Diffraction).

Resultatjämförelse mellan olika PO-program

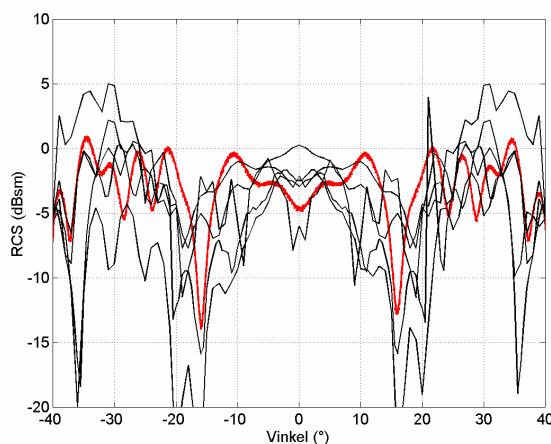
Inom användargruppen EMB (elektromagnetiska beräkningar) genomfördes under 2001 en resultatjämförelse [11] mellan olika inom Sverige använda elektromagnetiska beräkningsprogram applicerade på elva väldefinierade problemställningar. Ett av dessa ”benchmark”-problem handlade om att med befintliga högfrekvensprogram beräkna den monostatiska radarmålarean för en perfekt elektriskt ledande dihedral. Beräkningar utfördes på två olika dihedraler med öppningsvinklarna 80 resp 100°. Dihedralerna hade kvadratiska sidoväggar med kantlängden 0,2 m, medan tjockleken antogs vara försumbar. Frekvensen var 10 GHz och polarisationen HH, där den horisontella riktningen definieras som riktningen vinkelrät mot dihedralens axel. Följande beräkningskoder användes:

Program	Beräkningsmetod
OPTISCAT	PO+RT
OPTISCAT	PO+RT+PTD
FOPOL	PO+RT
RadBase	PO+RT
Greco	PO+RT

PO – fysikalisk optik, RT – stråloptik, PTD – fysikalisk diffraktionsteori

Inom radarsignaturgruppen utfördes beräkningar med programmen RadBase och FOPOL och gruppen tog också fram en högfrekvent referenslösning till dihedralproblemet som behandlar enkel-, dubbel- och trippelstuds. Radarsignaturgruppen ansvarade dessutom för själva resultatjämförelsen. Tillsammans med resultaten från PO-programmen redovisas, förutom referenslösningen, också resultat från experimentella mätningar på verkliga dihedraler utförda vid FOIs utomhusmätplats Lilla Gåra samt resultat från momentmetodberäkningar.

När det gäller jämförelsen mellan PO/RT-referenslösningen och mätdata (fig 5) är överensstämmelsen mindre god för de flesta vinklar, för båda polarisationsriktningarna och för båda dihedralerna. För vissa vinklar skiljer det ända upp till 10 dB. Jämförelsen mellan lösningarna för de sex olika PO-programmen uppvisar fem olika resultat. Det är endast PO/RT-referens- och RadBase-lösningen som ger samma resultat. I enskilda punkter kan det skilja upp till 25 dB mellan lösningarna. Tre av programmen ger dessutom osymmetriska resultat. En statistisk utvärdering av skillnaderna mellan koderna har senare utförts [12].



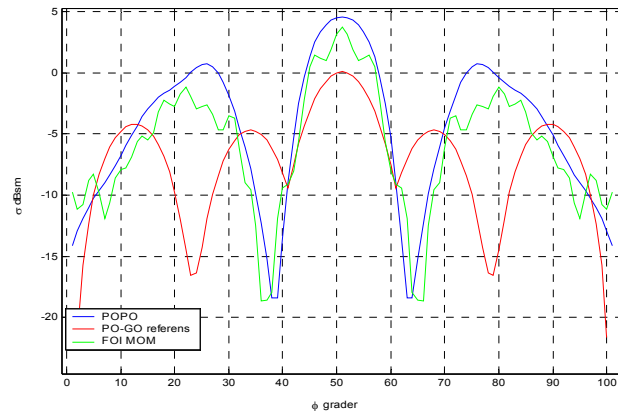
Figur 5. Radarmålarearesultat från de olika PO-programmen (svarta kurvor) för en dihedral med öppningsvinkeln 80°. Den röda kurvan visar mätresultat för en dylik dihedral. Frekvensen är 10 GHz och polarisationen är HH.

Användning av fysikalisk optik vid multipelreflektion för beräkning av radarmålarea

Beräkningsprogram för radarmålarea som vid behandling av multipelreflexion använder en kombination av fysikalisk optik (PO) och geometrisk optik (GO), genererar inte tillförlitliga resultat. Detta visades i en tidigare genomförd studie [11]. En ny metod baserad på PO-PO har därför utvecklats [8] för att korrigera för de fel som uppkommer med PO-GO-metoder vid beräkning av multipelreflektioner.

De flesta program för beräkning av radarmålarea med högfrekvensmetoder kräver att beräkningsobjektet har förprocesserats i något CAD-verktyg. Vanligast är att objektet beskrivs av triangulära fasetter. Programmen använder vanligtvis PO för beräkning av direktbidraget. Vid beräkning av multipelbidrag används i regel GO för att beräkna riktningen för den reflekterande vågen. Om en fasett träffas av den reflekterande vågen och inte sprider den vidare till annan fasett, beräknas fältet med PO, annars görs iterationen om.

Två samverkande fasetter bildar s.k. dihedraller. Tidigare studier [11] visar att radarmålarean från dylika dihedraller där dubbelbidraget beräknats med hjälp av GO uppvisar stora avvikelser jämfört med momentmetodberäkningar som mätningar. För att korrigera för dessa avvikelser infördes, i ett arbete från 2003 [8], en mer noggrann approximation, där båda plattorna betraktas som två aperturer och fältet från den ena plattan till den andra beräknades med ytintegralformuleringen. Då fältet väl bestämts beräknades dihedralens radarmålarea. I det aktuella arbetet beräknades radarmålarean för en dihedral med 100 graders öppningsvinkel (fig 6) och problemet begränsas till att infall och reflektion sker i normalplanet till ytans fasetter.



Figur 6. Illustrerar dubbelbidragets radarmålarea vid 10 GHz och VV-polarisation för en dihedral med öppningsvinkeln 100 grader.

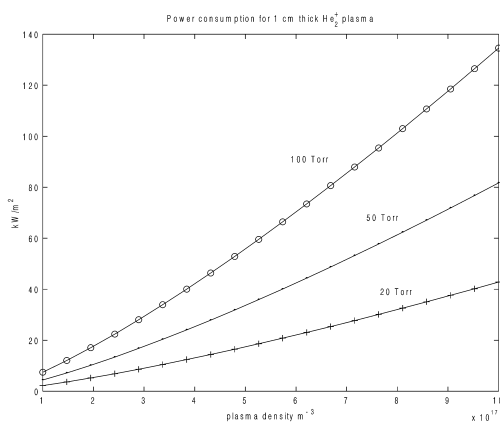
Den beräkningsmetod som togs fram korrigerade väsentligen för de fel som PO-GO-metoden genererade för VV-polarisation. Sämre blev däremot korrektionen för HH-polarisation. Slutsatsen blev därför att PO inte kan användas på alltför små objekt för att beskriva de ytströmmar som uppkommer av det direkt infallande fältet vid H-polarisation, men att detta går bra då det infallande fältet har V-polarisation. Redan få beräkningspunkter ger konvergens, vilket gör metoden snabb, och metoden skulle eventuellt kunna användas för att beräkna större objekt. Metoden skulle också möjligen kunna användas som en hybridmetod till både PO-GO och momentmetod.

Plasma som radarabsorbent

Under de senaste åren har det i media rapporterats om en ny metod använd av det ryska flygvapnet där flygplanskroppen omges av ett plasmaskikt för att reducera flygplanens radarmålarea. Enligt flera artiklar skulle metoden ha utvecklats vid Keldysh forskningscentrum, och att endast ett tiotal kilowatt skulle krävas för att avsevärt reducera ett flygplans radartvårsnitt. Ett dylikt plasmaskikt skulle enligt vissa källor också kunna reducera luftmotståndet. Metoden finns inte redovisad i några vetenskapliga publikationer, och stor osäkerhet råder om dess existens, men dess möjligheter är så pass intressanta att den bör utredas närmare.

Inom ramen för radarsignaturprojektets verksamhet gavs år 2000 i uppdrag åt Anders Bondeson, professor vid Institutionen för Elektromagnetik vid Chalmers tekniska högskola, att närmare utreda i vilken utsträckning plasma kan reducera ett flygplans radarmålarea. Elektromagnetiska beräkningar [3] visade att en reduktion av radarmålarean är möjligt förutsatt att plasmaskiktet är tillräckligt tjockt och har tillräcklig täthet av fria elektroner och bakgrundsgas. Exempelvis ger ett 2 cm tjockt plasmaskikt med elektrontätheten 10^{18} m^{-3} och en bakgrund av ädelgas vid atmosfärtryck åtminstone 10 dB reduktion inom frekvensområdet 4 till 15 GHz. Beräkningarna visar att det är möjligt att generera plasma direkt i den omgivande luften, men effektförbrukningen blir hög, och att det sannolikt är omöjligt att uppnå tillräcklig skiktjocklek.

I en fördjupad studie [5] (finansierad av FMV-Flyg och FOI) utförd vid Institutionen för Elteknik och Institutionen för Elektromagnetik vid Chalmers tekniska högskola, visade Y. Serdyuk, A. Bondesson och S. Gubanski på möjliga sätt att generera plasma med tillräckligt hög elektrontäthet och gastryck för effektiv absorption av radarvågor. Dessa studeras med hjälp av numeriskt lösta flödesekvationer och analytiska estimat, baserade på tillgängliga jonisations- och rekombinationskoefficienter. Det visar sig att helium, eller en blandning av helium och argon, är den mest lämpliga gasen. Den tvådimensionella datamodellen visar att stabila urladdningar kan genereras med dielektriskt belagda elektroder vid drivfrekvenser i 1 MHz-området. Utförda endimensionella beräkningar gav tätheter i närheten av behövliga värden. Ett plasmalager på minst 1 cm, en elektrontäthet på 10^{12} cm^{-3} och ett heliumtryck på minst 50 Torr, ger signifikant reduktion av radarmålarea. Ett problem är att det krävs hög effekt för att generera ett tillräckligt tätt plasma. Såväl de numeriska simuleringarna som de teoretiska estimaten indikerar att erforderlig effektförbrukning (fig 7) för ett 1 cm tjockt lager av plasma hamnar i storleksordningen av flera tiotals kW/m^2 . För att slutgiltigt stärka de framkomna resultaten krävs experimentella försök.

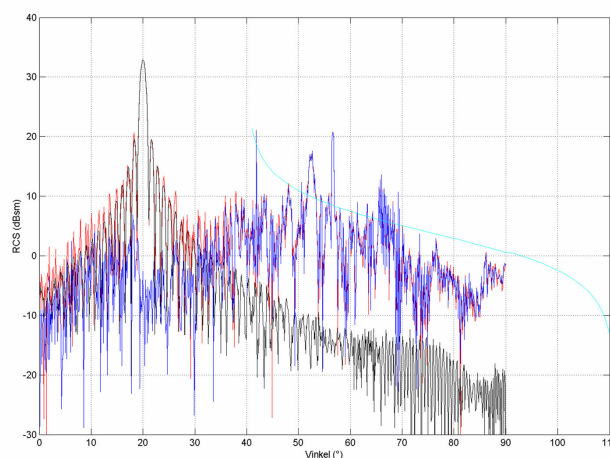


Figur 7. Estimering av effektförbrukning

Utveckling av modelleringsmetoder för markbakgrund

Detta arbete [4] syftade till att utveckla modelleringsmetoder för interaktionen mellan målobjekt och markbakgrund. Härvid studerades radarmålytan för ett typfall som utgjordes av en godtyckligt lutande plan rektangulär platta vars ena sida vilade mot en skrovlig markyta. Beräkningarna utfördes dels med en inkoherent modell som baseras på geometrisk optik och där markens ytojämnheter beskrevs statistiskt, och dels med en koherent modell där marken var statistiskt modellerad. Den statistiska inkoherenta modellen bygger på medelvärdesmodellering som utifrån vissa antaganden beräknar hur den effektiva målarean i genomsnitt ändras p g a växelverkan. Den koherenta modelleringen åstadkoms genom att radarmålarea-beräkningar görs för statistiskt modellerade terrängavsnitt. Bidragen från enskilda spridare kommer då att modelleras konsekvent för olika infallsriktningar vilket ger koherens. Nackdelen är att den komplexa beräkningen av radarmålarea för kombinationen objekt och mark behövde göras för ett stort antal fall.

Figur 8. Radarmålarea beräknad för platta 20° med mark. Beräkningen har gjorts med fysikalisk optik (PO) och multipelreflexion t o m trippelstuds. Frekvensen är 10 GHz och polarisationen HH. Vinkeln är radar-depressionen d v s vinkeln mellan horisontalplanet och hotriktningen. Röd kurva visar effektiv målarea, dvs summan av frirymdsmålarea (svart kurva) och växelverkan med marken (blå kurva). Den ljusblå jämna kurvan är en analytisk uppskattning av medelvärdet för växelverkan (endast dubbelstuds)



Beräkningen (fig 8) utfördes med en korrigerad version av beräkningprogrammet FOPOL. Vid multipelreflexionsberäkningar använder programmet fysikalisk optik (PO) kombinerad med geometrisk optik (GO). FOPOL ger separata utdata för olika multipelreflexionsbidrag. Såväl den plana plattan som marken antas vara av perfekt ledande metall eftersom programmet ej kan hantera dielektriska material.

De två metoderna jämfördes för tre olika lutningsfall. Simulering av högupplösta radarsignaturer kräver att de statistiska variationerna modelleras koherent, medan icke-koherenta metoder kan ge möjlighet att snabbare uppskatta betydelsen av växelverkan i förhållande till objektets frirymdssignatur. Det utförda arbetet visade på ett behov av en samlad beräkningsplattform som bl. a. kan hantera och lösa följande önskemål:

- Möjlighet att separera bidragen från olika delar av CAD-modellen
- Analytisk behandling (i motsats till fasetter) av markytan utanför det avstånd där infallet blir så strykande att marken uppträder speglade.
- Möjlighet att ta hänsyn till markens dielektriska egenskaper med hjälp av externa lookuptabeller. En utvidgning kan vara att ta med speklaritet och bistatiska spridningsfunktioner.
- Andra spridarmodeller än fasetter, t ex punktspridare eller grupper av sådana. Dessa kanske måste associeras med fasetter för att lösa skuggningsproblem och liknande. Det är särskilt angeläget att hitta spridningsmodeller som är lämpade att beskriva vegeterad mark och markens fraktala natur.
- Möjlighet att använda fysikalisk ist f geometrisk optik (PO-PO ist f GO-PO) vid strålföljning för multipelreflexion samt möjlighet att studera vilka delar av omgivningen som bidrar till multipelreflexion.

Jämförelse mellan beräkningar och mätningar av radarmålarea för plan platta i markbakgrund

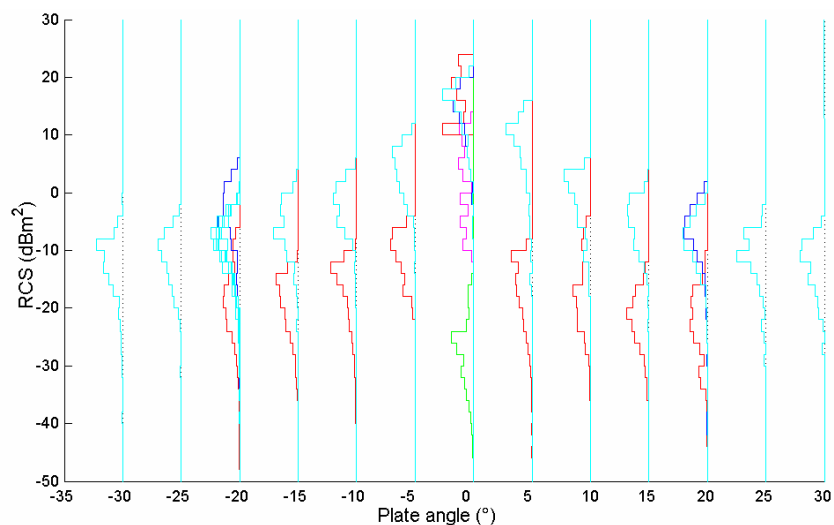
I ett arbete [6, 15] från 2001 redovisas en jämförelse mellan beräknade och uppmätta RCS-data för en plan metallisk platta som placerats på en grusplan. Syftet är att utveckla metoder för beräkning av mål-markväxelverkan för framtida signaturberäkningar och stöd vid krav-sättning. I ett tidigare arbete [4] har en en koherent, deterministisk, markmodell byggts upp av ett stort antal triangulära fasetter. Fresnelkoefficienter har beräknats ur en semiempirisk litteraturmodell för jord. Beräkningarna gjordes denna gång med programmet RadBase2, istället för som tidigare med FOPOL. RadBase2 kan via look-up-tabeller utföra beräkningar, inte bara för metalliska (PEC) ytor utan också för dielektriska ytor. Beräkningsdata har separerats i direkt-, dubbelstuds- och trippelstudsbidrag.

RCS-mätningar på en plan rektangulär platta utfördes under senhösten 2001 på en jämn yta av vått fint grus [13]. Mätningarna utfördes i X-bandet (8-12 GHz) med CW-teknik. Avstånds-upplösning erhöles genom Fouriertransformering och mjukvarugrindning. Antennhöjd och antennavstånd varierades liksom plattans lutning (-20 till +20°).

Beräkningarna visade att multipelreflexion via marken väsentligt höjer signaturen för negativa plattlutningar. Vid positiva plattlutningar för depressionsvinklar upp till dubbla plattlutningen dominerar direktbidraget, alltså dess frirymdssignatur. Alla beräkningar gjordes dock för infallsriktningar i plattans vertikala sidlobplan, vilket starkt höjer direktbidraget. Trippelstudsbidrag börjar göra sig gällande vid höga depressionsvinklar för lutningar mellan -10° och -20°. Modellering av markens dielektriska egenskaper leder till att växelverkan minskar jämfört med fallet metallisk mark, men det är bara för vertikal polarisation som sänkningen är betydelsefull. Detta är i överensstämmelse med Fresnels formler. Signifikanta frekvensberoenden observerades vid 0° plattlutning och i övrigt främst vid höga depressionsvinklar. Vanligen ger lägre frekvenser högre växelverkan men även det omvända förekommer. En förståelse av dessa frekvensberoenden kräver en mer ingående analys och tolkning.

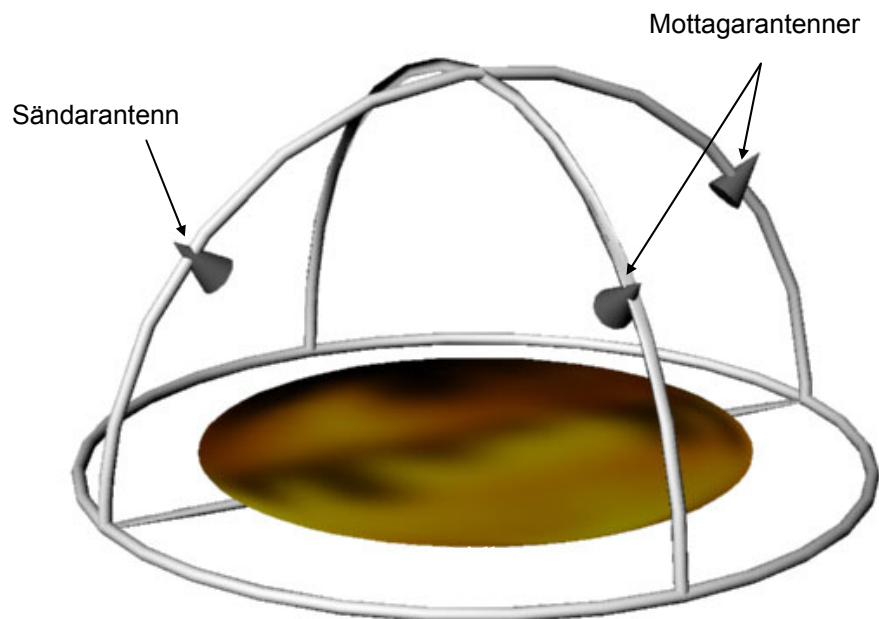
Både mätresultat och beräkningar visade tydligt att det ur signatursynpunkt är gynnsamt att undvika reflektorer som är vinkelräta mot marken och reflektor-markvinkeln helst bör göras trubbig. Skillnaden i resultat mellan uppmätta och beräknade värden (fig 9) visar att fortsatt utveckling av såväl mätmetodik som modelleringsmetoder och beräkningsprogram är nödvändig.

Figur 9. Fördelnings-histogram för uppmätta och beräknade radarmålareor. Jämförelse mellan mätserie E30, depression 1,96° (röd, purpur) och beräknade värden (ljusblå dielektrisk mark, mörkblå metallisk mark).



Mätmetoder för bistatisk markmålararea - en förstudie

I en förstudie [7] studerades olika mätmetoder för bistatisk markmålararea, och då särskilt mätning av den diffusa spridningen, för vilken tillgången på bistatiska data ännu är mycket begränsad. Mätning av markspridningsegenskaperna erbjuder delvis andra problemställningar än vanlig målareamätning, t ex är ju geometrin bistatisk och marken har i princip oändlig utbredning. Detta medför att belyst area måste korrigeras för tapering och att mätardarn måste flyttas mellan olika aspektvinklar. Nämnade problem kan delvis kringgås om hjälpreflektor används. Utgående från relevanta markspridningsgeometrier inriktar sig studien på att identifiera vilka särskilda krav mätningarna ställer och att finna möjliga lösningar. Slutligen analyseras för- och nackdelar med några tänkbara mätuppställningar.



Figur 10. Schematisk skiss på en möjlig bistatisk mätuppställning med vridbord i centrum.

Figur 10 visar schematiskt hur en bistatisk mätuppställning med vridbord skulle kunna utformas. Markprov i form av t ex utrullningsbar färdig gräsmatta placeras på vridbordet. Antennerna skall kunna flyttas oberoende av varandra och styras och positioneras, helst automatiskt. En av cirkelbågarna ska kunna roteras kring vridbordets rotationsaxel. Med rätt utformning kommer antennerna hela tiden att vara riktade mot vridbordets centrum, men en peklaser eller ett sikte kan gärna användas för kontroll.

De väsentliga fördelarna med uppställningen är att man kan processa SAR/ISAR-avbildningar av sina resultat och därmed få en uppfattning om klottrets finstruktur och footprintberoende, samt att mycket av den utrustning som krävs, dvs antenner, vridbord, generatorer, datainsamling och analysprogram, redan finns. Nackdelarna med uppställningen är att avstånden är korta vilket medför begränsningar vid studie av mark med storskaliga ojämnheter. Den aktuella förstudien utgjorde grunden vid framtagandet av den bistatiska mätbågen som konstruerades under 2003.

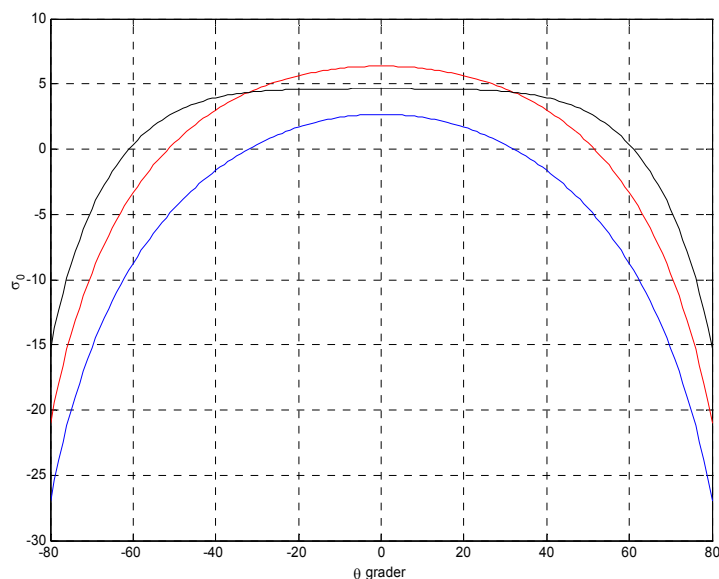
Modelleringsmetoder för bistatisk markspridning

En omfattande litteraturstudie [9] rörande bistatiska markmodelleringsmetoder presenterades i mars 2003. Arbetet bygger på en tidigare genomförd litteratursökning [16] inom området. Syftet med studien var att identifiera och kommentera existerande modelleringsmetoder för bistatisk markspridning, möjliga att implementera i framtida arbeten rörande växelverkan mellan objekt och mark.

Studien visade på stora svårigheter att modellera strykande infall. Modellernas tillförlitlighet är ofta begränsad till infallande elevationsvinklar på $<70^\circ$. Detta beror på bl.a. skuggningsfenomen och resonansfenomen som ytvågor tenderar att öka vid strykande infall. Generella metoder som klarar att modellera alla typer av markjämnheter och infallsvinklar är föremål för forskning. Genom införandet av mer noggranna skuggnings- och multipelspridningsalgoritmer förväntas i framtiden alltmer strykande infall kunna beräknas. Den idag mest intressanta (approximativa) metoden för att klara ett bredare spektrum av markskrovlighet är IEM – Integral Equation Method. Metoden är intressant att tillämpa på problemet mål-mark interaktion. Ett beräkningsexempel med IEM visas i figur 11.

Den samlade litteraturstudien hittade få jämförelser mellan modeller och mätningar. Framförallt är IEM-metoden och SSA-metoden (Small-Slope Approximation) eftersatta vad gäller jämförande mätningar och beräkningar. För att mer noggrant kunna utvärdera de metoder som presenterades i [9], bör dessa implementeras och sedan jämföras inbördes. En möjlig väg är att de jämförs mot någon av de exakta numeriska metoderna. För att få en bättre uppfattning om metodernas giltighet och begränsningar, bör en utvärdering göras mot experimentella bistatiska mätningar.

Samtliga metoder finns tillämpade på mark med Gaussisk höjdfördelning. Det var dock svårt att finna arbeten som behandlar andra typer av höjdfördelningar. Ingen av metoderna förutsätter Gaussisk höjdfördelning, vilket möjliggör en framtida utveckling av metoderna till att omfatta också andra typer av markfördelningar.

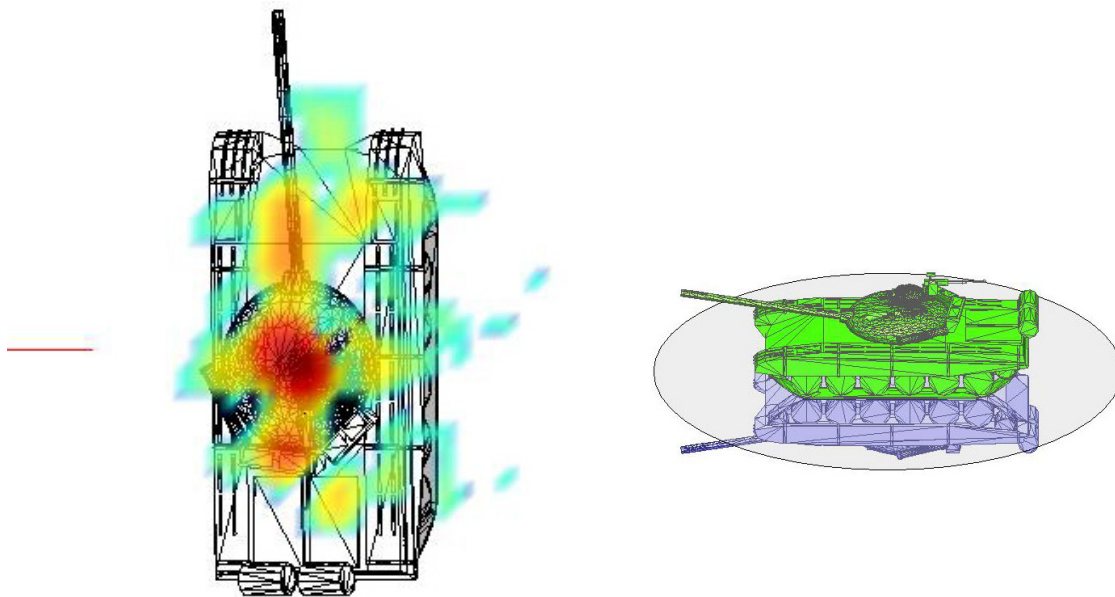


Figur 11. Illustrerar den monostatiska markmålarean för en perfekt ledande yta med gaussisk korrelationsfunktion beräknad med IEM-metoden då $kL = 3$ och $k\sigma = 0,25$ (blå kurva) resp $0,5$ (röd kurva) samt $1,0$ (svart kurva).

Bistatiska mätningar

Kunskap om markens (havsyttans) bistatiska spridningsegenskaper krävs för att den effektiva signaturen för ett signaturanpassat objekt ska kunna uppskattas. Radarsignaturgruppen har härvid tidigare genomfört en förstudie rörande bistatiska markmätningar [7], och nu även låtit bygga en särskild mätbåge för ändamålet (se bild på framsidan). I rapporten "Bistatisk mätning" [10] behandlas den bistatiska bågen och framtagandet av denna samt resultat av preliminära försök med monostatiska och bistatiska skalmodellmätningar m.h.a. bågen. Vissa resultat föreligger också för mätningar på en grusyta, men innan verkliga markmätningar kan genomföras återstår arbete med bl.a. aperturkontroll, d.v.s. kontroll och kalibrering av belyst område. Användning av bågen medför också behov av vidareutveckling och nyutveckling av metoder och programvara för insamling, analys och presentation av data. Detta arbete har tagit sin början. Bl.a. ISAR-processningen måste analyseras och ev. revideras m.a.p. nya geometrier, och metoder för aperturkontroll måste implementeras. Figur 12 visar ett resultat från en bistatisk mätning mot en skalmodell av T-72. ISAR-bilden är sannolikt något hoptryckt i båda led och tolkningar måste göras med försiktighet p.g.a. den i förhållande till modellen relativt stora våglängden. En rimlig tolkning är dock att det i ISAR-bilden mest framträdande röda området orsakas av det välvda tornet eller någon struktur på detta.

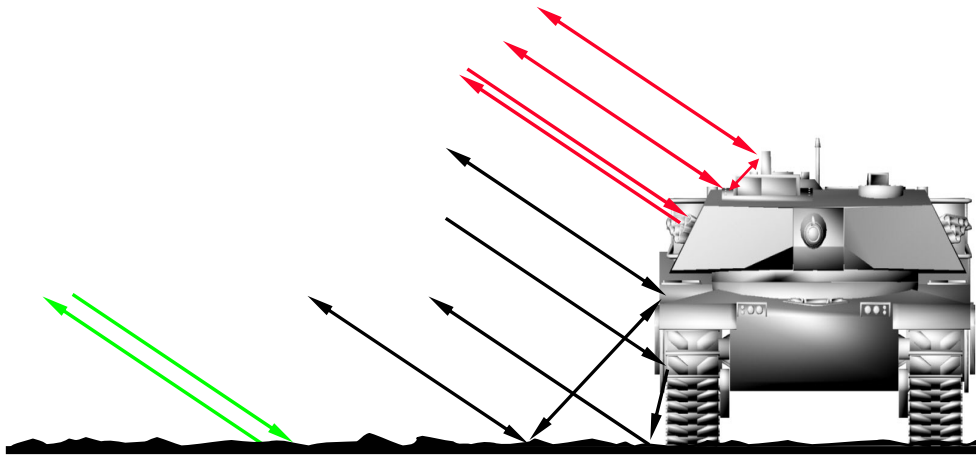
En mer grundläggande utvärdering av mätbågen kommer att utföras 2004 då det också är tänkt att utföra bistatiska markmätningar i syfte att validera våra markmodeller.



Figur 12. ISAR-resultat från bistatisk mätning vid 6-16 GHz, HH-polarisation på metalliserad modell i skala 1:48. Detta motsvarar fullskalafrekvenser 125-333 MHz. Antenndepressioner 25° och 54°, radarns centerrikning från vänster som röda strecket visar. Till höger visas en CAD-modell av fordonet som det skulle se ut för en betraktare vid den lägre antennens position. Bilden visar också fordonets spegelbild i markplanet. Denna mätning är dock gjord med modellen stående på absorber för att minimera speglingsbidragen.

CEPA-projektet JP 1.18: Target and Target Background Modelling and Validation for High Resolution Radar

Syftet med verksamheten är att skaffa sig en grundläggande förståelse för hur mycket och vilka faktorer som ger upphov till signifikanta mål-bakgrundsbidrag (fig 13). Vilka mark-egenskaper (topografisk struktur, fuktighetsgrad, porositet, mineralsammansättning, vegetation, mm) är kritiska ur radarsignatursynpunkt för olika frekvensband, polarisationer, vinklar och objekt? Målet är att skaffa sig förmågan att modellera olika bakgrunder (mark/sjö) och utifrån dessa kunna prediktera radarsignaturen för objekt i dessa bakgrunder. Det krävs därför en betydande insats, inte bara på utveckling av bakgrundsmodeller som tar hänsyn till mål- markinteraktionen, utan även på utveckling av beräkningsverktyg som klarar av att beräkna radarmålarean med tillräcklig god precision och noggrannhet för stora objekt. Dessutom krävs det relativt stora insatser vad gäller utveckling av mätupställningar och mätmetodik. Mätningar och beräkningar behöver gå hand i hand så att de kan bekräfta varandra och ge ett stabilt beslutsunderlag för vidare utveckling.



Figur 13. Schematisk skiss över strålgångsvägar som kan bidra till radarmålarean. Röda pilar anger objektets frirymdssignaturen. Svarta pilar visar mål-bakgrundsinteraktionen. Gröna pilar illustrerar bakgrundsklottret.

Eftersom mål-markmodellering är ett nytt forskningsområde, nationellt sätt, har radarsignaturgruppen valt att finna internationell samverkan inom detta område via Central European Priorities Areas (CEPA) [17, 19].

I början av år 2000, skissade FOI på projektförslaget rörande mål- och mål-bakgrundsmodellering för radarsignaturfallet. Projektförslaget togs emot mycket positivt av CEPA1-gruppen. Man beslutade om att tillsätta en beredningsgrupp (Interim Management Group) med uppgift att ta fram en "Outline Description (OD)" för projektet. Dessutom, beslutades att Sverige skulle inneha ordförandeposten i beredningsgruppen samt vara "Leading Nation" för projektet. IMG gruppen fick till uppgift att utarbeta en mer detaljerad plan (supplement) beträffande arbetsuppgifter, milstolpar, sekretessnivå, ekonomi, etc. Efter det att samtliga nationer - Sverige, Tyskland, England, Spanien och Italien - signerat "Supplement" upprättades en "Work Breakdown Structure" (WBS). Denna innehåller en mycket detaljerad arbets- och tidsplan för de uppgifter som skall göras inom projektet. Startdatum för projektet är 1 Maj 2003. Projektet löper under en 3-årsperiod och den totala ekonomiska insatsen är beräknad till 700 kEUR ~ 2.1 Mkr/år.

Slutsatser och framåtblickar

Som tidigare nämnts har radarsignaturverksamheten haft ett starkt fokus mot att skaffa sig kunskap och förmåga att prediktera radarsignaturen för objekt i markbakgrund. Som ett första steg i detta arbete gjordes en utvärdering av de beräkningsverktyg som finns inom landet idag och som bygger på högfrequensmetoder (HF, fysikalisk optik i detta fall), se referens [11]. Denna studie gjordes tillsammans med FMV, FOI och industrin. Slutsatserna man kan dra från denna studie var att valideringsarbeten av HF-programmen är en mycket eftersatt verksamhet inom landet. Flertalet av de använda programmen som användes inom denna studie har använts, och kommer att användas, dels för att ge stöd för signaturanpassning av försvarsmateriel men också som radarmålareunderlag till duellsimuleringar. I båda fallen är det av ytterst stor vikt att vi inom landet har god kontroll på programmens begränsningar, tillämpbarhet och möjligheter samt att de räknar "rätt" inom de angivna approximationerna. En annan slutsats av studien är att det finns relativt många HF koder inom landet men också relativt många användare, t ex. FOI, Aerotech Telub, Kockums, Alvis Hägglund, EMW och Bofors Defence. Frågan som väckts är om detta är en ideal situation i ett nationellt perspektiv.

De allra flesta beräkningsverktyg som finns idag har inte möjlighet att ta hänsyn till någon mark-/sjöbakgrund vilket har påpekats i ett flertal studier inom SAT-Mark arbetet. I flertalet studier [4,6,7,9,10,13,15,16] har vi på FOI studerat möjligheterna att skaffa oss denna förmåga. I och med att området är mycket brett samt att mycket lite finns publicerat inom delar av området, har vi utfört ett relativt omfattande förstudiearbete för att kunna bedöma möjligheterna till att kunna ta hänsyn till markbakgrunder. Det är också av dessa anledningar som vi har sökt internationellt samarbete inom detta område [17,19]. Slutsatserna av dessa studier är dels att vi finner det möjligt att utveckla modeller och verktyg som tar hänsyn till ett antal relativt "enkla" typbakgrunder. Vi har också funnit det möjligt att använda befintliga mätsystem, dock med några modifieringar [10], för att utröna gränserna för våra modeller, samt validera dessa. En mycket viktig del i modellutvecklingen är att kontinuerligt validera modellerna med mätningar. Detta ger goda förutsättningar att erhålla bra beslutsunderlag för fortsatt inriktning och arbete.

Ser man framåt, kommer radarsignaturgruppen att ha ett fortsatt fokus mot att studera och utveckla verktyg för att prediktera radarmålarean för objekt i olika markbakgrunder. I förlängningen ser vi också möjligheter att kunna applicera våra modeller till fallet strid i bebyggelse (SiB). Det internationella CEPA-arbetet kommer att löpa under en 3-årsperiod där startdatum var 1 maj 2003. Parallellt med denna verksamhet kommer projektet att arbeta mot att skapa goda förutsättningar för att kunna utföra validerande mätningar med hög noggrannhet och precision.

Publikationslista

Publikationerna indelas i kategorierna: FOI-Rapporter, FOI-Memo samt Konferensbidrag. Inom varje kategori redovisas publikationerna i kronologisk följd.

FOI-Rapporter

- [1] M. Gustafsson, "Radarmålareaoptimering av en UAV", Linköping, Vetenskaplig rapport FOI-R--0023--SE, Januari 2001
- [2] M. Gustafsson, S. Nilsson, J. Rahm, E. Zdansky, "Implementering av algoritm för beräkning av radarmålyta med NURBS-ytor", Linköping, Vetenskaplig rapport FOI-R--0026--SE, Januari 2001
- [3] A. Bondeson, "Plasma som radarabsorbent", Linköping, Vetenskaplig rapport FOI-R--0027--SE, Januari 2001
- [4] E. Zdansky, M. Gustafsson, J. Fagerström, S. Nilsson och J. Rahm, "Redovisning av utveckling av bakgrundsmodellering", Linköping, Metodrapport FOI-R--0187--SE, December 2001
- [5] Y. Serdyuk, A. Bondeson och S. Gubanski, "High-pressure plasmas for radar wave absorption", Linköping, Vetenskaplig rapport FOI-R--0482--SE, Maj 2002
- [6] E. Zdansky, J. Rasmusson, M. Gustafsson, N. Gustafsson, S. Nilsson, och J. Rahm, "Jämförelse mellan beräkningar och mätningar av radarmålarea för plan platta i markbakgrund", Linköping, Vetenskaplig rapport FOI-R--0522--SE, Juni 2002
- [7] E. Zdansky, M. Gustafsson, N. Gustafsson, S. Nilsson, J. Rahm, och J. Rasmusson, "Mätmetoder för bistatisk markmålarea - en förstudie", Linköping, Metodrapport FOI-R--0575--SE, September 2002
- [8] M. Gustafsson, "Användning av fysikalisk optik vid multipelreflektion för beräkning av radarmålarea", Linköping, Vetenskaplig rapport FOI-R--0737--SE, Januari 2003
- [9] M. Gustafsson, S. Nilsson, J. Rahm och E. Zdansky, "Modelleringsmetoder för bistatisk markspridning - Litteraturstudie", Linköping, Vetenskaplig rapport FOI -R--0825--SE, Februari 2003
- [10] E. Zdansky, N. Gustafsson och J. Rahm, "Mono- och bistatisk radarmätning med FOIs nya mätbåge", Linköping, Metodrapport, FOI-R--1011--SE, December 2003

FOI Memo

- [11] T. Martin et al, "EMB användargrupp - sammanställning av beräkningsresultat", Linköping, FOI Memo 01-2947, Augusti 2001
- [12] E. Zdansky och J.Rahm, "Sammanfattande statistiska mått för monostatisk radarmålarea för PEC dihedraler", FOI Memo 01-3942, December 2001
- [13] J. Rasmusson, S. Nilsson, N. Gustafsson och J. Rahm, " Lägesrapport 2002-03-31 Radarmätningar platta-mark för bakgrundsmodellering ", Linköping, FOI Memo 02-0724, Mars 2002
- [14] J. Rahm och C. Larsson, "Utveckling av Columbus", Linköping, FOI Memo 02-1129, April 2002
- [15] E. Zdansky, J. Rasmusson, M. Gustafsson, N. Gustafsson, S. Nilsson och J. Rahm, "Jämförelse mellan beräkningar och mätningar av radarmålarea för plan platta i markbakgrund", Linköping, FOI Memo 02-1742, Juni 2002
- [16] M. Gustafsson, S. Nilsson och E. Zdansky, "Litteraturlösningsökning inom området bistatisk markspridning", Linköping, FOI Memo 02-2332, September 2002
- [17] J. Rahm, "Delrapportering av CEPA projektet JP 1.18 *Target and Target Background Modelling and Validation for High Resolution Radar*", Linköping, FOI Memo 02-2932, November 2002
- [18] M. Gustafsson och M. Herberthson, "Fjärrfältsamplitud för spridning mot plan polygon beräknad med fysikalisk optik", Linköping, FOI Memo 03-1192, Maj 2003
- [19] J. Rahm, "Lägesrapportering av CEPA projektet JP 1.18 *Target and Target Background Modelling and Validation for High Resolution Radar*", Linköping, FOI Memo 03-H251, September 2003

Konferensbidrag

- [20] J. Rasmusson, N. Gustafsson och J. Rahm, "Outdoor broadband RCS measurements of model-scale aircraft", konferensbidrag, FOI-S--0698--SE, AMTA 3-8 Nov, Cleveland, U.S.