



Slutrapport – Signaturmodellering 2008 - 2010

JONAS RAHM, MAGNUS HERBERTHSON, MAGNUS GUSTAFSSON,
ERIK ZDANSKY, ANDERS ÖRBOM, ANNICA HJELM, JAN FAGERSTRÖM,
NILS KARLSSON, ANDREAS PERSSON, STEFAN BJÖRKERT OCH ROLAND LINDELL

FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1000 anställda varav ungefär 800 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömning av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot och hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
Informationssystem
Box 1165
581 11 Linköping

Tel: 013-37 80 00
Fax: 013-37 81 00

www.foi.se

FOI-R--3117--SE Användarrapport
ISSN 1650-1942 December 2010

Informationssystem

Jonas Rahm, Magnus Herberthson, Magnus
Gustafsson, Erik Zdansky, Anders Örbom, Annica
Hjelm, Jan Fagerström, Nils Karlsson, Andreas
Persson, Stefan Björkert och Roland Lindell

Slutrapport – Signaturmodellering 2008 - 2010

Titel	Slutrapport – Signaturmodellering 2008 - 2010
Title	Final report – Signature modelling 2008 - 2010

Rapportnr/Report no	FOI-R--3117--SE
Rapporttyp Report Type	Användarrapport
Sidor/Pages	32 p
Månad/Month	December
Utgivningsår/Year	2010
ISSN	ISSN 1650-1942
Kund/Customer	FM
Projektnr/Project no	E3094
Godkänd av/Approved by	Magnus Jändel

FOI, Totalförsvarets Forskningsinstitut	FOI, Swedish Defence Research Agency
Avdelningen för Informationssystem	Information Systems
Box 1165	Box 1165
581 11 Linköping	SE-581 11 Linköping

Sammanfattning

Denna slutrapport av *"Signaturmodelleringsprojektet"* redovisar projektets syfte, mål, nytta genomförda verksamheter och de resultat som framkommit under de tre år som projektet har pågått. Projektet har innefattat verksamheter inom både radar- och IR-området.

Det långsiktiga målet med verksamheten är att skapa goda förutsättningar för att beräkna och ta fram radar- och IR-signatordata för godtyckliga objekt (t ex markfordon eller fartyg) i realistiska bakgrunder. I det 3-åriga perspektivet (inom projekttiden) har målet varit att ta fram och utveckla beräkningsverktyg som beaktar bakgrundens inverkan på ett objekts signatur.

En ny metod, 'Potentialmetoden', för att beräkna radarmålarean hos ett objekt med metallyta har tagits fram och vidareutvecklats. Förtjänsterna med metoden är att man har möjlighet att angripa större beräkningsproblem, alternativt utföra beräkningar på givna mål snabbare än liknande mer vedertagna metoder, som t ex momentmetoden (MoM). Metoden har presenterats på ett antal konferenser.

Vidareutveckling av beräkningsmetoden iterativ fysikalisk optik (IPO) har utförts. De påstådda förtjänsterna med metoden är att den är relativt snabb i förhållande till mer "exakta" metoder.

För att på ett korrekt sätt kunna beräkna radarreturen från en farkost, exempelvis en stridsvagn i terräng, krävs att hänsyn tas till radarvågens växelverkan mellan omgivning och objektet. En metod som visat sig lämplig för detta, är den så kallade integralekvations-metoden för skrovliga ytor, IEM. Vi har i detta projekt vidareutvecklat och validerat metoden, samt inkluderat den vid beräkning av växelverkansbidrag. I samband med denna utveckling har ny mätmetodik varit tvungen att utvecklas. Valideringsarbetet av IEM har varit en huvudpunkt i ett bilateralt samarbete med Frankrike.

Projektet har även studerat möjligheten att använda modeller som används för animering och visualisering av sjöytor för sjöklotterberäkningar inom radarområdet.

Inom IR-modelleringsverksamheten har olika koder validerats mot ett enkelt generiskt objekt, kallad CUBI, som vi har tillverkat och utfört mätningar mot under olika väderförhållanden. Arbetet har även innefattat olika typer av mätningar mot CUBI-färgens optiska reflektansegenskaper. Syftet med valideringsarbetet har varit att få kännedom om de olika beräkningsprogrammets begränsningar, giltighets- och tillämpningsområden samt deras för- och nackdelar.

Nyckelord: Radarmålarea, RCS, radarsignatur, IR-signatur, reflektans, modellering

Summary

This final report for the "*Signature modeling project*" presents the purpose, goal, benefit, activities carried out and results achieved during the project three years.

The project has included activities concerning radar as well as infrared signatures. The long-term goal of these activities is to create the ability to calculate or otherwise produce radar and infrared signature data for arbitrary objects (e.g. ships or ground vehicles) in realistic settings/conditions/backgrounds/environments/theatres. During this three year period of the project the goal has been to develop or find tools for the calculation of target-background interactions.

A new method, "The Potential Method", for the calculation of objects with metallic surfaces has been derived and developed further. The virtue of this method is that it has the potential to tackle larger problems or do faster calculations than similar established methods, like the method of moments (MoM). The method has been presented at a number of conferences.

The calculation method iterative physical optics (IPO) has been developed further. The benefits claimed for this method is that it is fast compared to more "exact" methods, while modelling internal multipath contributions more accurately than PO-GO.

In order to correctly calculate the radar return from a craft, e.g. a battle tank in terrain, the interaction of the object with its environment needs to be taken into account. For this the bistatic reflectivity of rough surfaces (the terrain) is needed. The integral equation method is a fast method for calculating the average reflectivity of rough model surfaces, which we have evaluated and developed further. The work includes bistatic measurements on rough surfaces and for this purpose new measurement and calibration procedures have been developed. Validation of IEM has been a major task in the Swedish-French bilateral cooperation.

The project has also studied if visualisation/animation sea surface models can be modified for calculation of radar sea clutter.

In the infrared modelling activity area different thermal modelling program codes have been evaluated against measurements done under varying weather conditions on a simple generic object, called CUBI. The work also includes characterisation of the optical reflectance properties of the paint use on CUBI. The purpose of the validation work has been to gain know-how on the capabilities, limitations, advantages and disadvantages and best areas of application for the different thermal modelling programs.

Keywords: Radar cross section, RCS, radarsignature, IR-signatur, reflectance, modelling.

Innehållsförteckning

1	Projektbeskrivning	7
1.1	Motiv.....	7
1.2	Mål och kundnytta.....	7
1.3	Genomförande	8
1.3.1	Ambition	8
1.3.2	Utfall	9
1.4	Publikationslista	9
2	Radarsignaturmodellering	11
2.1	Potentialmetoden	11
2.1.1	Sammanfattning.....	11
2.1.2	Beskrivning av potentialmetoden.....	11
2.1.3	Resultat.....	12
2.1.4	Slutsatser	12
2.2	Iterativ fysikalisk optik (IPO).....	12
2.2.1	Sammanfattning.....	12
2.2.2	Beskrivning av IPO	13
2.2.3	Resultat.....	13
2.2.4	Slutsatser	13
2.3	Integralekvationsmetoden (IEM)	13
2.3.1	Sammanfattning.....	13
2.3.2	Beskrivning av IEM	14
2.3.3	Resultat.....	14
2.3.4	Slutsatser	14
2.4	Mätmetodutveckling och mätningar	14
2.4.1	Mätningar	14
2.4.2	Mätmetodutveckling	17
2.4.3	Mätresultat	18
2.5	Sjöstillståndsmodellering	20
2.5.1	Bakgrund.....	20
2.5.2	Modellbeskrivning	20
2.5.3	Slutsatser	21
3	IR-signaturmodellering	22
3.1	CUBI-arbetet	22
3.1.1	Beskrivning av beräkningar	22
3.1.2	Mätningar	25
3.1.3	Analys- och konverteringsverktyg.....	27
3.1.4	Resultat.....	28
3.1.5	Slutsatser	30
4	Referenser	31

1 Projektbeskrivning

1.1 Motiv

Sveriges ökande engagemang inom internationella uppdrag har bland annat aktualiserat frågeställningen om de befintliga system som Sverige deltar med är utrustade med tillräckligt bra skyddssystem för de olika miljöer och hot som de svenska trupperna kommer att möta. För att ha möjlighet att kunna utföra optimering av olika skydds- och sensorsystem krävs dels verkliga tester på materielen och dels simuleringar av olika hotsituationer. Verkliga tester är tids- och resurskrävande verksamheter som i sig ger god uppfattning om skydds- och/eller sensorsystemets prestanda för en viss händelse. För att täcka in fler olika händelser eller kanske fler varianter av samma händelse så är simuleringar ett mycket bra och kompletterande angreppssätt, dels för att ha möjlighet att optimera ett specifikt skyddssystem och dels för att optimera våra egna truppers olika sensorsystem.

De senaste åren har efterfrågan på tillförlitliga signaturdata (både inom radar- och IR-området) ökat markant. För bedömning av skydds- och sensorprestanda har framförallt efterfrågan av tillförlitliga signaturdata ökat på objekt/system som används, eller är planerade att användas, vid internationella uppdrag, men också på objekt/system som de svenska trupperna kan tänkas möta. Det finns därmed ett uppdymt behov att ta fram tillförlitliga signaturdata för att uppfylla dessa områdens behov.

1.2 Mål och kundnytta

Det långsiktiga målet med verksamheten är att skapa goda förutsättningar för att beräkna och ta fram radar- och IR-signaturdata för godtyckliga objekt (t ex markfordon eller fartyg) i realistiska bakgrunder. I det 3-åriga perspektivet (inom projekttiden) har målet varit att ta fram och utveckla beräkningsverktyg som beaktar bakgrundens inverkan på ett objekts signatur. Nyttan för försvaret är att den kompetensuppbyggnad och de metoder och verktyg som utvecklas inom uppdraget direkt kan tillämpas för att ta fram underlagsdata för sensorvärderingsstudier, duellsimuleringar, målidentifieringsstudier och/eller för att signaturanpassa objekt. Effekterna är att vi ur ett nationellt perspektiv skapar goda förutsättningar för att utföra dessa typer av verksamheter på ett tillförlitligt och kostnadseffektivt sätt.

Man bör här tillägga att under projekttiden har flera uppdragsgivare (t ex FMTKSE, FMV och industri) lagt beställningar på oss för att utföra signaturberäkningar eller mätningar inom radar och IR-området. Det har främst handlat om signaturberäkningar eller mätningar på nu operativa farkoster eller system. Resultaten har sedermera används för att dels optimera skyddsprestandan på våra farkoster och dels för sensoroptimering.

1.3 Genomförande

Inför projektperioden 2008 - 2010 fusionerades de tidigare Radar- och IR-signaturprojekten till det nuvarande Signaturmodelleringsprojektet. Verksamheterna inom signaturmodelleringsuppdraget har varit indelad i tre verksamhetsgrenar, nämligen

- Modellering och beräkning
- Mätningar och mätmetodutveckling
- Validering och utvärdering

Det krävs god förmåga inom alla de ovan nämnda verksamheterna för att man skall lyckas nå det långsiktiga uppsatta målet. Utmaningen har därför varit att balansera dessa verksamheter och ge dem ungefär lika tyngd vid planering och utförande. I sammanhanget bör nämnas att vi 2007 hade ett relativt stort kompetenstapp inom IR-modelleringsverksamheten på grund av oplanerade personalavgångar. Vi har därför under projektperioden delvis fått fokusera verksamheten inom IR-modelleringsområdet på kompetensuppbyggnad.

Verksamheterna inom radarområdet har delvis styrts av det samarbete vi har med Frankrike (Onera och DGA Celar). Samarbetsprojektet syftar till att gemensamt utveckla bakgrundsmodeller inom radarområdet. Ett Technical Arrangement-avtal (TA) skrevs på av respektive part den 26 september 2007 [1]. Projektet startade 1 januari 2008 och kommer att löpa under en 3-års period. Projekttiteln är: "New models for radar targets and environment". Arbetspunkterna inom detta samarbetsprojekt är:

1. Framtagande av dokument med detaljerat arbetsprogram och arbetsfördelning ett sk Work Breakdown Structure (WBS) dokument. Fastläggande av mätmetodik, testfall, beräkningsmetod, mät- och beräkningsparametrar, mm (RCS, klotter, mål-bakgrund-interaktion).
2. Utföra monostatiska och bistatiska mätningar på några olika typer av generiska markbakgrunder (t ex referens-, gräs- och/eller jordyta). Mätningarna kom att utföras med bland annat FOI:s bistatiska mätbåge.
3. Utföra beräkningar på de markytor som mätningar har utförts på (se punkt ovan) samt utvärdera beräkningsmetodernas för- och nackdelar.
4. Utveckla och validera en kod som kan beräkna den bistatiska spridningen från en typisk markyta. Denna kod eller resultaten från denna kod skall tillsammans med befintliga RCS-koder kunna användas för att få fram exempelvis mål-bakgrundsbidraget till målarean för t ex ett markfordon.

1.3.1 Ambition

Ambitionen har varit att uppfylla de mål som sattes upp inom projektet, se mål och nytta, och samtidigt ge goda förutsättningar för att kunna svara på frågeställningar som t ex

- Kan man med relativt enkla medel signaturanpassa objekt som befinner sig i en viss bakgrund?

- Kommer en specifik radar eller IR-sensor kunna detektera och/eller identifiera ett specifikt objekt som befinner sig i en viss bakgrund?

Dessutom har ambitionen varit att skapa en balanserad modellerings-, mät- och utvärderingsförmåga inom området.

1.3.2 Utfall

Med en blick i backspegeln så ser man att mätverksamheten inom radarområdet har krävt större insatser än planerat. Framför allt har utveckling av ny mätmetodik inom radarområdet behövt tas fram för att erhålla användbara resultat för validering av beräkningsmodellerna. Arbetet har dock gett vunna kunskaper och erfarenheter vad gäller avancerade radarmätningar. Beräkningsmodellutvecklingen inom radarområdet har dock flutit på enligt plan och flera bidrag har skrivits och presenterats på olika konferenser, se referenserna [2-6].

På IR-modelleringsidan har stora ansträngningar gjorts för att bygga upp kunskaper och erfarenheter för de nya medarbetarna. Detta har gjorts dels genom att berörda har gått kurser inom ämnet och dels genom det valideringsarbete vi utfört inom projektet.

Det sammantagna utfallet under perioden 2008 – 2010 är att vi inom projektet har ökat vår förmåga att ta fram signaturunderlag för relativt stora scenarier samt inom andra applikationer, t ex ”se-igenom-radar”. Dessutom har vår verktygslåda utökats genom egenutvecklade koder såväl som nya införskaffade program. I sammanhanget är det viktigt att tillägga att våra kunskaper och erfarenheter, som byggts upp inom området, efterfrågas kontinuerligt av andra myndigheter eller industrier.

1.4 Publikationslista

Under perioden 2008 – 2010 har 20 stycken publikationer utgivits i projektets regi. Sex av dessa är konferensbidrag, sju är FOI-rapporter och sju är FOI-Memo, se lista nedan

1. Olivier Outtier, ”Simulating water waves for radar calculations”, FOI-R--2593--SE, 2008.
2. Magnus Herberthson, ” Utveckling av alternativ metod (potentialformulering) för radarmålareaberäkningar”, FOI Memo 2601, 2008.
3. Magnus Herberthson, ” EM scattering calculations using potentials”, FOI-S--2968--SE, SCEE 2008, Scientific computing in electrical engineering, p. 171-172, 2008.
4. Jan Fagerström, Annica Hjelm, Nils Karlsson, ” Modellering av IR-signaturer med CAMEOSIM”, FOI Memo 2535, 2008.
5. Jonas Rahm, ” Årsrapportering av signaturmodelleringsprojektet”, FOI Memo 2626, 2008.

6. Claes Nelsson, "MR304SC FTIR spectrometer. A system description and user guide", FOI-D--0336--SE, 2009.
7. Jonas Rahm, "Lägesrapportering av det Svensk-Franska samarbetet radarsignaturmodelleringsområdet", FOI Memo 2854, 2009.
8. Magnus Herberthson, Jonas Rahm, "Scattering calculations using the potential method" Milstolpe kv 4 2009 inom Signaturmodellering", FOI Memo 3001, 2009.
9. Jan Fagerström, Tomas Hallberg, Annica Hjelm, Nils Kalrsson, Roland Lindell, Andreas Persson, "IR-analys av ett generiskt markobjekt CUBI", FOI-R--2888--SE 2009.
10. Erik Zdansky, Jonas Rahm, Anders Örbom, "Bistatic RCS measurement on different background surfaces", FOI-R--2785--SE 2009.
11. Magnus Herberthson, "Scattering calculations using the potential method" (Waves 2009), (p. 402-403), FOI-S--3169--SE, 2009.
12. Magnus Herberthson, "EM Scattering calculations using potentials", FOI-S--3499--SE, (SCEE 2008), (p. 375-382), 2010.
13. Magnus Herberthson, "Redovisning av milstolpe kv 4 2010 för projekt Signaturmodellering", FOI Memo 3341 2010.
14. Jonas Rahm, "Lägesrapportering av det Svensk-Franska samarbetet inom radarsignaturmodelleringsområdet", FOI Memo 3139 2010.
15. Erik Zdansky, Anders Örbom, Jonas Rahm, "Object-free calibration and procedures for bistatic wide-angle ISAR measurements of clutter reflectivity at hte Lilla Gåra (Sweden) test range", FOI-S--3533--SE, (AMTA 2010), (p. 270-275), 2010.
16. Magnus Herberthson, "Application of the potential method to the magnetic field integral equation", (FOI-S--3404--SE), (26th Annual Review of progress in applied computational electromagnetics, in conjunction with RFIDay 2010), (p. 120-123), 2010.
17. Jonas Rahm, Erik Zdansky, Anders Örbom, "Bistatic RCS measurement on rough metallic background surface", FOI-R--2964--SE, 2010.
18. Magnus Herberthson, "Application of the potential method to the combined field integral equation", FOI-S--3498--SE, (SCEE 2010, Sceintific Computing in Electrical Engineering), (p. 103-104), 2010.
19. Jonas Rahm, Magnus Gustafsson, Magnus Herberthson, Stefan Nilsson, Anders Örbom and Erik Zdansky, "Comparison between measured and calculated bistatic RCS data on a rough metallic background surface", FOI-R--3102--SE, 2010.
20. JonasRahm, Magnus Herberthson, Erik Zdansky, Magnus Gustafsson, Anders Örbom, Annica Hjelm, Jan Fagerstöm, Nils Karlsson, Andreas Persson, Stefan Björkert och Roland Lindell, "Slutrapport – Signaturmodellering 2008 – 2010", FOI-R--3117--SE, 2010.

2 Radarsignaturmodellering

2.1 Potentialmetoden

2.1.1 Sammanfattning

En ny metod, 'Potentialmetoden', för att beräkna radarmålarean hos ett objekt med metallyta har tagits fram och vidareutvecklats. Ofta beräknas radarmålarean för en viss belysningsvinkel genom att man löser en integralekvation som härleds ur Maxwells ekvationer. Problemet med denna ekvation är att den ofta resulterar i orimligt stora ekvationssystem, vilket sätter en gräns för vilka objekt man kan studera. Genom att använda den föreslagna potentialmetoden kan storleken på ekvationssystemen minskas. Man kan därför beräkna radarmålarean för fler/större objekt, alternativt göra befintliga kalkyler mer effektiva. Metoden är generell och klarar även bistatiska beräkningar.

2.1.2 Beskrivning av potentialmetoden

Problemet med att för en kropp med metallyta beräkna radarmålarean kan angripas genom att man ur Maxwells ekvationer härleder en integralekvation som man sedan försöker lösa. Bland annat kan man härleda en ekvation som, för en viss frekvens, utnyttjar det infallande elektriska fältet, och den resulterande ekvationen kallas EFIE (Electric Field Integral Equation). Man kan också ställa upp en ekvation som bygger på jämförelse med det infallande magnetiska fältet; den resulterande ekvationen betecknas MFIE, där M står för "Magnetic". Slutligen kan också dessa ekvationer kombineras till CFIE (C för "Combined"). För ett givet objekt innebär beräkningar vid högre frekvenser att det infallande fältet, och som en följd därav även den inducerade ytströmmen, får en allt snabbare rumslig variation, vilket i sin tur kräver en allt tätare sampling av densamma. Som ett resultat av detta ökar antalet obekanta i ekvationen, och vid alltför hög frekvens blir det resulterande ekvationssystemet orimligt stort.

Potentialmetoden kombinerar två omskrivningar:

- dels ersätts den inducerade ytströmmen med en fiktiv ström, där man redan analytiskt har modellerat den snabba rumsliga variation som det infallande fältet har. Det motsvarar en sorts nedsampling av problemet, men jämförelsen med nedsampling haltar ändå eftersom objektets geometri gör att fundamentalt andra rumsliga svängningar kan uppstå. Ett exempel kan vara resonanser i kaviteter eller invändiga hörn. Överlag kan dock den fiktiva strömmen samplas glesare än den verkliga inducerade ytströmmen, och detta gör att det numeriska problem man ställs inför blir mindre.
- dels utnyttjas ett matematiskt faktum som säger att ytströmmen (inducerad eller fiktiv), som är vektorvärd, kan beskrivas med hjälp av två skalärvärda funktioner. Detta leder till ytterligare förenklingar.

2.1.3 Resultat

Under projektet har potentialmetoden implementerats i allt mer kompetenta program. En inledande implementering av EFIE i programspråket Matlab har skrivits, och demonstrerats. Vidare har även en implementering av såväl MFIE som CFIE gjorts, och körning med dessa koder har presenterats vid vetenskapliga konferenser. Programmen har avsedd generalitet, men det återstår också kända funktionaliteter som väntar på att bli infogade. Bland annat har valet av programspråk begränsat storleken på de problem man kunnat angripa. Vidare har belysningsriktningen varit förvald, vilket inte är en sträng begränsning, men ändå givit onödigt merarbete när man vill utvärdera vissa bistatiska konfigurationer.

Till detta har en inledande implementering också gjorts i Fortran. Eftersom Fortran har en betydligt bättre och transparentare minneshantering än Matlab, har större problem kunnat angripas. Här pågår arbetet att lägga in all existerande funktionalitet. I befintlig kod har demonstrerats hur problem som traditionellt kräver ca 10^6 obekanta kan angripas med tillfredställande resultat genom potentialmetoden som då endast nyttjade 40000 obekanta. Denna mindre mängd innebär förutom en hanterlig datamängd, att tiden för att lösa ekvationssystemet minskar med typiskt mer en faktor 10^3 . Detta kan vara skillnaden mellan att kunna utföra beräkningen eller ej.

För mer detaljerade resultat hänvisas till de konferensbidrag som presenterats under projektiden: [2-6]

2.1.4 Slutsatser

Principerna bakom potentialmetoden har validerats i existerande körbar kod. Dels finns kod skriven i Matlab, och dels finns vissa delar av koden implementerad i Fortran. Genom att fortsätta implementeringen kommer Fortrankoden inte endast att kunna användas i validerings- och demonstrations-syfte, utan den kan också användas för beräkningar av objekt som annars knappast låter sig hanteras. Som exempel ligger det nära till hand att stötta utvärderingen av spridning från skrovliga ytor. Även beräkningar på vissa kaviteter torde vara lämpliga att göra.

2.2 Iterativ fysikalisk optik (IPO)

2.2.1 Sammanfattning

Vidareutveckling av beräkningsmetoden iterativ fysikalisk optik (IPO) har utförts. De påstådda förtjänsterna med metoden är att den är relativt snabb i förhållande till mer "exakta" metoder som t ex momentmetoden (MoM) och finita-element-metoden (FEM). IPO har kunnat snabbas upp väsentligt på bekostnad av minnesåtgången. Tack vara utvecklingen inom datorområdet kan man dock numera ha tillgång till mycket stora RAM-minnesvolymmer. Metoden har implementerats i ett Matlab-program och beräkningar har utförts på några olika typer av objekt som ofta förekommer vid valideringar av beräkningskoder. Resultaten visar på god överensstämmelse med mätdata, som här får betraktas som referensdata, och beräkningstiderna är ej orimligt långa.

2.2.2 Beskrivning av IPO

Generellt kan sägas att IPO bygger på att iterativt finna en approximativ lösning till den magnetiska fältintegralsekvationen (MFIE, Magnetic Field Integral Equation) för perfekt ledande ytor. Metoden har presenterats i relativt många rapporter och artiklar, se t ex [7-9]. Lösningen till MFIE kan fås fram genom att följa ett iterationsschema, se referens [10]. För att öka konvergensen införs också ett skuggvillkor i iterationsschemat. Det är dessa skuggvillkor som gör att metoden bär namnet IPO. Utan införande av villkor kan metoden betraktas som en generell metod som löser Maxwells ekvationer på ett iterativt sätt och därav inte innehåller några approximationer. Det finns många olika sätt att implementera skuggvillkor. Ett sätt kan vara att utföra en skuggberäkning för alla punkter/facetter på (mot) alla andra punkter/facetter på objektet. Detta skulle bilda en $N \times N$ stor matris, där N är antalet punkter/facetter, med information om punkterna/facetterna "ser" eller "inte ser" varandra på objektet. Ofta är en sådan beräkning i sig mycket omfattande och man väljer därför ofta relativt enkla skuggvillkor som inte på något sätt är fysikaliskt fullständiga men som är enkla att införa i koden.

2.2.3 Resultat

Se figurerna 5 och 6 i mätresultat-kapitlet.

2.2.4 Slutsatser

Man kan konstatera att IPO ger god överensstämmelse med mätresultat. Beräkningstiderna är inte orimligt långa räknat per fasett, vinkel (och/eller frekvens) och iteration. På grund av skuggvillkorets ofullständighet måste man vara extra noga med CAD- och mesh-geometrierna. Dubbelytor och/eller ytor som är "instuckna" i objektet måste tas bort. Med tanke på att metoden är relativt enkel att implementera samt att implementeringen som är utförd här (i Matlab) inte på något sätt är optimerad, bedömer vi att det finns stora möjligheter till att accelerera beräkningarna.

2.3 Integralekvationsmetoden (IEM)

2.3.1 Sammanfattning

För att på ett korrekt sätt kunna beräkna radarreturen från en farkost, exempelvis en stridsvagn i terräng, krävs att hänsyn tas till radarvågens växelverkan mellan omgivning och objektet. Tidigare har objekten beräknats i frirymd och därefter har terrängens radarbidrag adderats till den totala radarreturen. Denna idealisering kan i viss mån fungera så länge som växelverkan med terrängen är liten i förhållande till objektets frirymdsbidrag eller om man har låg upplösning. För moderna plattformar tas emellertid hänsyn till radarmålarean vid design av fordon och fartyg vilket gör att frirymdsmålarean kan vara liten i förhållande till växelverkan. Detta i kombination med att hotsystemen tenderar att bli alltmer högupplösande, eller till och med bildalstrande (SAR), gör att växelverkan måste beaktas, inte bara

vid design av farkoster, utan även vid design av hotsystem då moderna måligenkänningsalgoritmer ofta ”tränas” på beräknade data.

För att beräkna växelverkan kan i princip en CAD av markytan och farkosten göras och därefter beräknas växelverkan. Tyvärr är detta ofta inte praktiskt görbart på grund av att den enorma beräkningstid som krävs. Dessutom är man ofta intresserad av inte bara en markplätt utan ett medelvärde av ett antal markplättar, vilket gör att beräkningsbördan ökar ytterligare en faktor 100-1000. Lösningen är att betrakta markytan som en stokastisk storhet och därefter beräkna medelvärdet av växelverkan. För att kunna göra detta krävs att markens statistiska bistatiska spridningsegenskaper noggrant kan beräknas. En metod som visats sig lämplig för detta, är den så kallade integralekvationsmetoden för skrovliga ytor, IEM. Vi har i detta projekt utökat och validerat metoden, samt inkluderat den vid beräkning av växelverkansbidrag.

2.3.2 Beskrivning av IEM

IEM för skrovliga ytor, utvecklades under 1990-talet av Fung [11] och har under senare år vidareutvecklats till att hantera mer komplexa strukturer. Metoden fungerar väl för ett brett spektrum av ytskrovligheter, från nästan släta ytor till mycket grovt skrovliga ytor. IEM bygger på att ytan kan beskrivas, punktvis, av en stokastisk höjdfördelningsfunktion. Dessutom ingår, som en fundamental komponent, en korrelationsfunktion, som beskriver hur höjderna i två punkter är korrelerade. Av intresse blir därmed höjdvariansen σ_h samt korrelationslängden L som ger ett mått på ytan skrovlighet.

I detta projekt har vi utökat IEM-metoden till att fungera i närfält, något som är fundamentalt för beräkning av växelverkansbidrag. Vidare har utökningen validerats mot mätningar.

2.3.3 Resultat

Se figurerna 5 och 6 i mätresultat-kapitlet.

2.3.4 Slutsatser

En närfältskompenserad IEM som kan användas för beräkning av växelverkansbidrag mellan farkost och omgivning har utvecklats. Metoden ger mycket god överensstämmelse med mätdata för de flesta vinklar. Metoden kommer att användas för beräkning av växelverkansbidrag och valideras i detta fall mot dels enkla objekt, men även mot riktiga objekt såsom en stridsvagn.

2.4 Mätmetodutveckling och mätningar

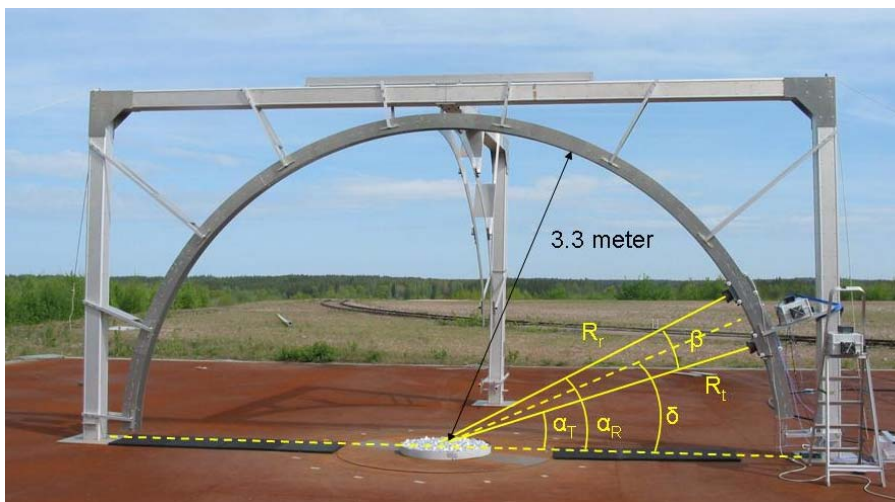
2.4.1 Mätningar

Mätningar av bistatisk reflektivitet har utförts i flera omgångar [12]. En stor del av mätningarna har gjorts på en modellyta, se figur 1, för att möjliggöra direkta jämförelser mellan mätta och beräknade värden men mätningar har också gjorts mot kort gräs.

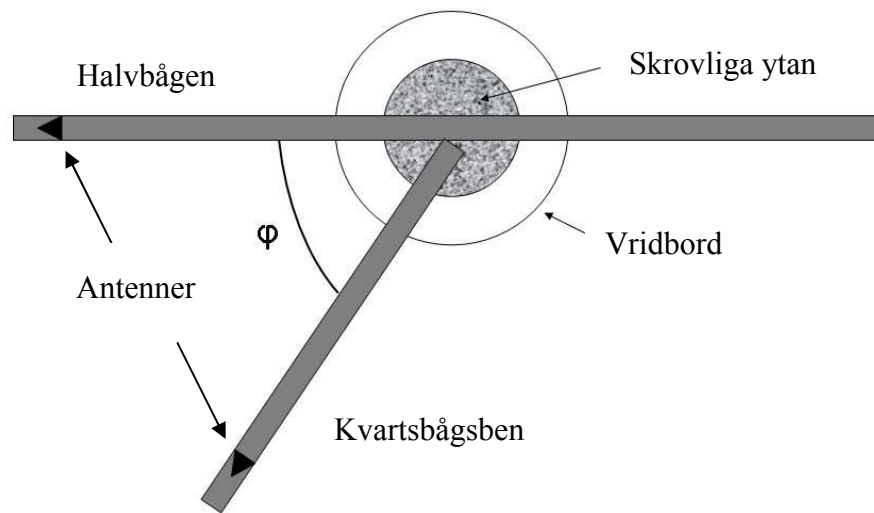


Figur 1. En bild av den skrovliga referensytan som används som objekt vid radarmätningarna. Diametern på ytan är 0.9 meter.

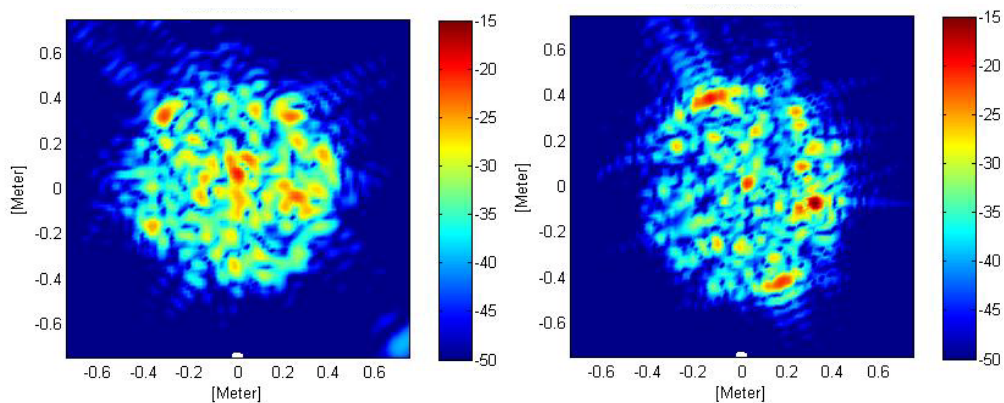
Mätningarna har utförts vid Lilla Gåra mätplats så kallade marinplan. Vid mätningarna har antennerna riktats i de önskade bistatiska vinklarna mot ett prov på vridbordet och medan vridbordet roterat ett varv har mätdata samlats in för många vinklar och frekvenser, vilket dels ger ett gott statistiskt underlag och dels medger generering av högupplösta ISAR-bilder, se mätuppställningen i figurerna 2 och 3 samt några exempel på ISAR-bilder från mätningar på den skrovliga referensytan i figur 4.



Figur 2. Den bistatiska bågen har en innerradie på 3.3 meter. Två antennvagnar som kan föras oberoende av varandra placeras i bågen.



Figur 3. En vy rakt ovanifrån bågen. ϕ definierar vinkeln mellan halv- och kvartsbågen.



Figur 4. Exempelbilder av bistatiska ISAR-avbildningar från mätningar på den skrovliga ytan.

Upplösningen, som är starkt beroende av geometrin (lägre vid stora bistatiska vinklar och höga bisektrisdepressioner), används främst för att kontrollera datakvaliten och för att separera kanteffekter, flervägsutbredning, bakgrund och andra ovidkommande bidrag från den provreflektivitet som ska mätas upp. Beroende på geometri kan dessa andra bidrag vara betydande, men det är vår uppfattning att den tillämpade metoden medger god separation.

Med de olika bidragen väl separerade i bilden filtreras de oönskade bidragen bort genom att all intensitet i bilden (eg. bilderna, beräkningar utförs för många olika vridbordsvinklar) utanför eller i kanten av provområdet sätts till noll. Sedan detta har gjorts kan bilderna räknas tillbaks till utgångsläget med spridningsamplitud (målarea) som funktion av frekvens och vinkel. De oönskade bidragen har därigenom avlägsnats men proceduren i sig medför störningar ("avbrottseffekter") som medför ofysikaliska intensitetsvariationer i resultaten för låga och höga frekvenser. Dessa tas därför inte med i den fortsatta databehandlingen som omfattar inkoherent medelvärdesbildning över

alla bilder (bildvinklar) och korrektioner för sändarens och mottagarens antenndiagram. Slutligen görs en sammanvägning över de olika frekvenserna i den centrala delen av frekvensbandet. Några av resultaten kan visas tillsammans med beräknade resultatdata i mätresultatkapitlet, dvs i figurerna 5 och 6

2.4.2 Mätmetodutveckling

Tidigare arbeten inom området bistatisk reflektivitet (bistatiskt klotter) har visat att denna typ av mätningar krävt anpassningar och modifieringar av de tillämpade mät- och kalibreringsprocedurerna. Detta har delvis sin grund i att mätningarna görs bistatiskt men framför allt på att mätavståndet är kort. Det korta mätavståndet (3.3 meter) medför att överhörning mellan antennerna inte på vanligt sätt kan elimineras genom en lämplig hårdvarumässig fördröjning av mottagartidluckan.

För att eliminera dessa problem har en metod för objektfri kalibrering implementerats [13,14]. Kalibreringen utförs i stället genom att signalstyrkan mäts med antennerna riktade mot varandra. Det ger flera fördelar utöver att problemet med parasitär överhörning i kalibreringen elimineras. Till dessa hör att osäkerheterna i kalibreringsobjektens målarea och i deras orientering elimineras samt att problem med inverkan från bakgrund och flervägsutbredning kan reduceras. Dessa fördelar gäller även vid vanlig monostatisk kalibrering, men det mindre behovet vid vanliga mätsträckor (100 m) i kombination med den större svårigheten att separera antennerna gör att objektbaserad kalibrering även fortsättningsvis har en betydelsefull roll. Metoden har presenterats vid konferensen AMTA 2010 [15] och även funnit tillämpning vid SAAB [16].

Kvintessensen av objektfri kalibrering

Den vid målareamätning mottagna effekten ges av:

$$P_{r,obj} = P_t \frac{G_t}{4\pi R_t^2} \sigma_{obj} \frac{A_r}{4\pi R_r^2} \quad \Leftrightarrow \quad \sigma_{obj} = P_{r,obj} (4\pi)^2 R_t^2 R_r^2 / P_t G_t A_r$$

P är effekt, G antennförstärkning och A antennapertur. Index t står för sändare (transmitter) och r för mottagare (receiver).

Kalibreringen kan beskrivas som bestämning av produkten $P_t G_t A_r$.

Denna produkt kan mätas om antennerna riktas direkt mot varandra. Den mottagna effekten blir då:

$$P_{r,cal} = P_t \frac{G_t}{4\pi R_d^2} A_r \quad \Leftrightarrow \quad P_t G_t A_r = P_{r,cal} 4\pi R_d^2$$

Vilket ger kalibreringsformel för målarean σ :

$$\sigma_{obj} = 4\pi \frac{R_t^2 R_r^2}{R_d^2} \frac{P_{r,obj}}{P_{r,cal}}$$

Metoden kan lätt modifieras för att i stället ge spridningsamplitud, ta hänsyn till bakgrund, dämpare, extra fasvägar etc. Kalibreringen kan följas upp genom att mäta en delsignal via shuntledning och denna signal kan i princip användas för kalibrering eller åtminstone korrektion av kalibreringen, men eftersom varje steg i kalibreringen tillför fel och störningar är det förstås bättre om shuntsignalen bara kan bekräfta att förhållandena varit stabila.

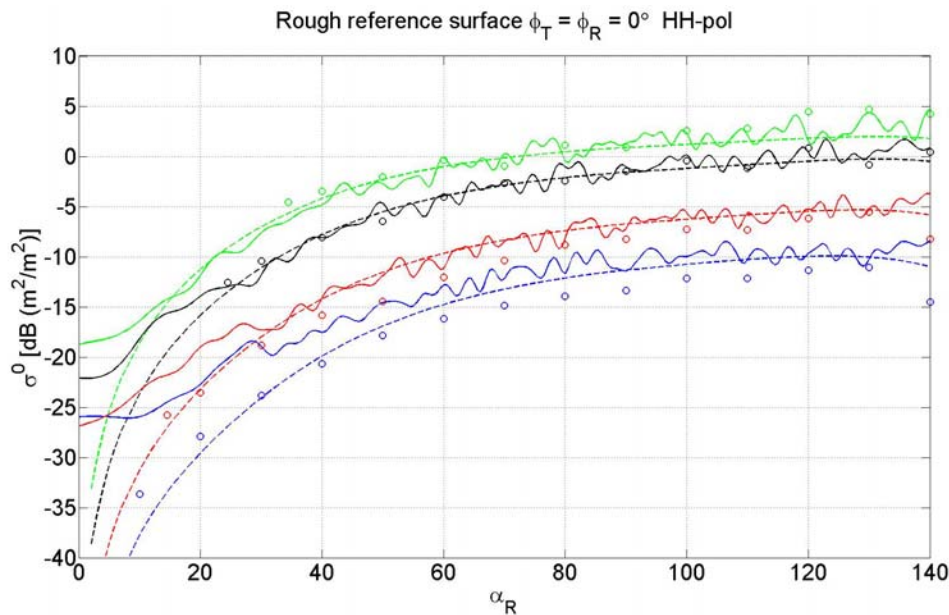
De korta mätavstånden har också medfört att osäkerheten rörande vilka punkter antennavstånden ska mätas från kan ge signifikanta felbidrag. En förenklad metod för att ur signalstyrkemätningar, i stället för de traditionella vinkelupplösta fasmätningarna, uppskatta läget av denna centrumpunkt har därför tagits fram [17]. Metoden bedöms kunna reducera felbidragen från restosäkerheten till insignifikanta nivåer. Vi har även visat att felen kan reduceras genom användning av lämpliga kombinationer av mät- och kalibreringsavstånd, dock kan detta kräva dämpare som ger extra felbidrag.

Den använda metoden utgår från att när två antenner är riktade mot varandra ska intensitetens avståndsberoende vara omvänt kvadratisk, och en analys av vilka avvikelser ett felaktigt antaget referensplan ger upphov till leder sedan fram till ett sätt att ur intensitetens avståndsberoende skatta felet ΔR .

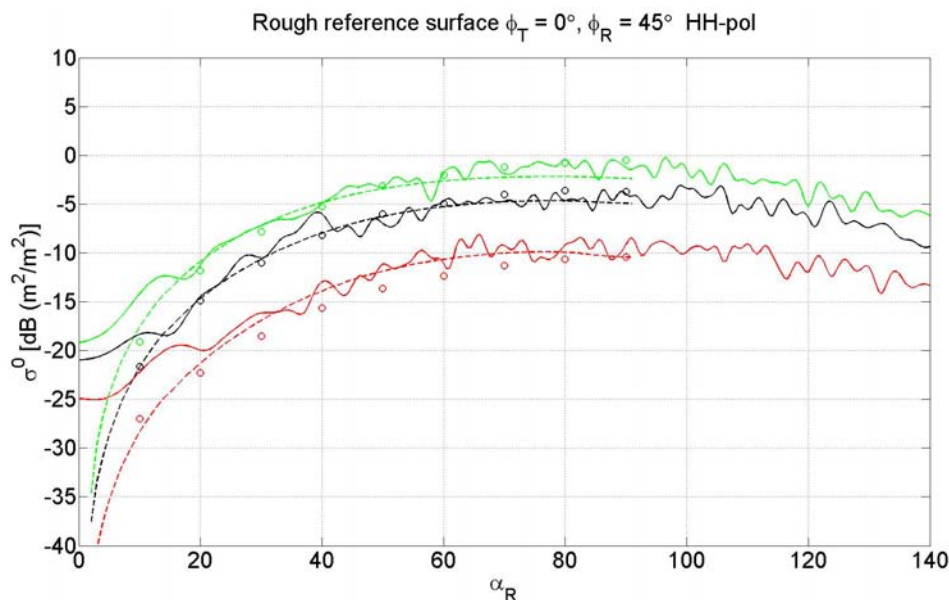
Slutligen har en metod för kalibrering av den i Lilla Gåras mätsystem ingående logaritmiska magnituddetektorn tagits fram och detektorn kalibrerats [18]. I det gamla datainsamlingssystemet fanns det visserligen funktioner för att göra en sådan korrektion, men dels använde den sig av hårdvara som fallit för åldersstreck, dels bedöms den nya metoden ha betydligt bättre förutsättningar att korrigera resultaten.

2.4.3 Mätresultat

För att inte drunkna i resultat har vi valt att endast visa två resultatplottar. För fler resultat hänvisas läsaren till referenserna [12] och [19]. Figurerna 5 och 6 visar jämförelser mellan uppmätt och beräknad normaliserad markmålarea, σ_0 , för den skrovliga referensytan.



Figur 5. Diagrammet visar normaliserad markmålararea, σ_0 , för den skrovliga referensytan för 4 st sändarantennvinklar α_T (se figur 2) som funktion av mottagarantennvinklar (α_R) då $\phi_R = \phi_T = 0^\circ$ och vid frekvensen 10 GHz och polarisationen HH. Cirklarna representerar mätdata, streckad och heldragen linje är resultat från IEM- respektive IPO-beräkningar. Färgkodningen anger sändarantennens elevationsvinkel mot ytan, dvs α_T (se figur 2). $\alpha_T = 5^\circ$ (blå), 10° (röd), 20° (svart) och 30° (grön).



Figur 6. Diagrammet visar normaliserad markmålararea, σ_0 , för den skrovliga referensytan för 4 st sändarantennvinklar α_T (se figur 2) som funktion av mottagarantennvinklar (α_R) då $\phi_R = 0^\circ$ $\phi_T = 45^\circ$ (se figur 3) och vid frekvensen 10 GHz och polarisationen HH. Cirklarna representerar mätdata, streckad och heldragen linje är resultat från IEM- respektive IPO-beräkningar. Färgkodningen anger sändarantennens elevationsvinkel mot ytan, dvs α_T (se figur 2). $\alpha_T = 5^\circ$ (blå), 10° (röd), 20° (svart) och 30° (grön).

Vi ser från figurerna att en mycket god överensstämmelse fås mellan mätningar, IEM- och IPO-beräkningar.

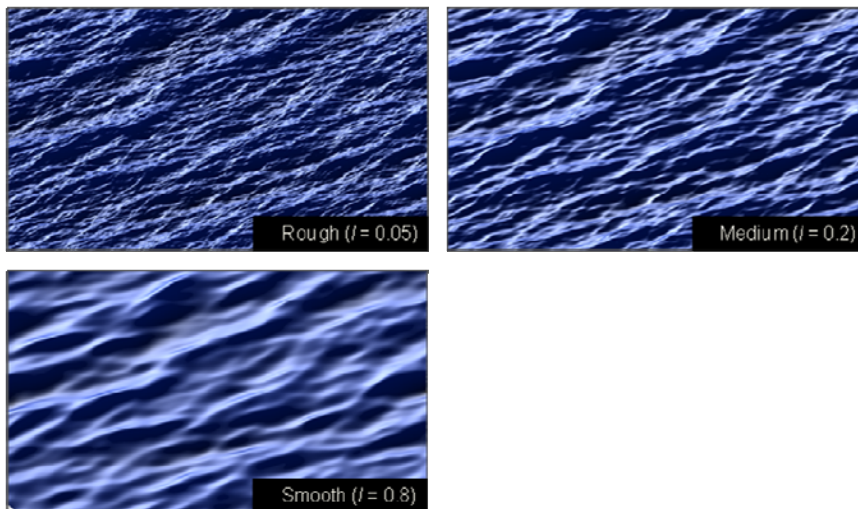
2.5 Sjötillståndsmodellering

2.5.1 Bakgrund

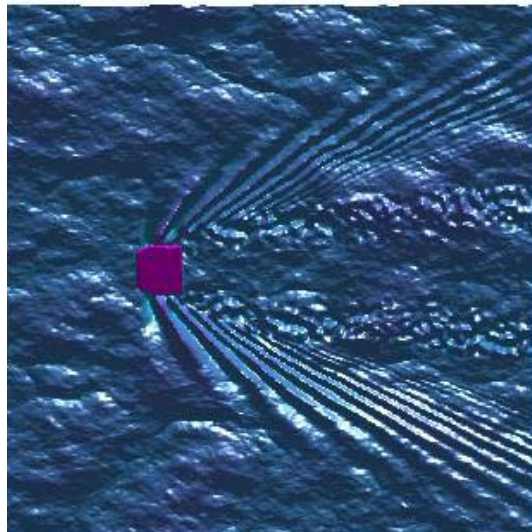
Sveriges ökade engagemang inom marina uppdrag har aktualiserat frågeställningen om våra fartyg är utrustade med tillräckligt bra egenskyddssystem. Uppdragen består i att patrullera, bevaka och skydda utsatta områden samt vid behov även bekämpa fientliga hot. För att skydda fartyg och besättning finns olika typer av skyddssystem ombord (t ex rems- och fackelkastare, stör- och bekämpningsutrustning). Genom att kombinera dessa skyddsåtgärder med taktik- och manövreringsåtgärder har man möjlighet att öka egenskyddet ytterligare. För att kunna utföra sådana optimeringar krävs kännedom om sin egen signatur i de olika våglängdsband där man bedömer att det finns ett potentiellt hot (t ex radar och IR). Dessutom vill man optimera sina egna spanings- och bekämpningssensorer. Det finns därmed ett behov av att ta fram dels signaturdata på sina egna farkoster och dels signaturdata på befintliga hotssystem eller hotfarkoster. Det är med anledning av det efterfrågade behovet av radarsignaturdata som vi inom projektet har börjat studera och utveckla en sjötillståndsmodell för att kunna använda vid radarsignaturberäkningar av fartyg i olika sjötillstånd. I referens [20] utförs en grundlig genomgång på hur sjötillståndsmodellerna är uppbyggda, studier på hur radarberäkningar kan appliceras till modellerna, känslighetsanalyser och hur man kan modellera bog- och häckvågor.

2.5.2 Modellbeskrivning

Sjötillståndsmodeller har de senaste 10-20 åren drivits fram av film- och spelindustrin. Syftet har varit och är att ta fram naturtroga våg- och vattenmodeller som kan animeras. Sjötillståndsmodellen som utvecklats på FOI utgår från dessa modeller. Modellerna måste dock anpassas för att kunna tillämpas i radarområdet vilket kräver en del utveckling och modifieringar av modellerna. För att kunna utföra radarberäkningar på ett visst sjötillstånd måste ett beräkningsnät av ytan genereras för varje ögonblick. Beräkningsnätet måste ge en representativ bild av ytan vilket gör att beräkningsnätets upplösning är beroende på vilken typ av sjötillstånd som skall studeras. Exempelvis krävs ett finare beräkningsnät då t ex kapillärvågor är inkluderade än om man endast tittar på t ex en yta som består av dyningar. Ytterligare en avvägning av beräkningsnätets upplösning är vilken radarvåglängd som är av intresse. I figur 7 ses olika sjötillstånd som modellerats med olika modellparametrar och figur 8 visar ett modellerat vågmönster (med häck- och bogvågor) från ett generiskt fartyg som färdas i västlig riktning.



Figur 7. Olika typer av sjötillstånd där parameteren l kontrollerar vattenvågornas frekvensinnehåll.



Figur 8. Ett modellerat vågmönster från ett generiskt fartyg som färdas i västlig riktning i bilden och som befinner sig i ett specifikt sjötillstånd. Modellen beskriver hur bog- och häckvågen interagerar med det övriga sjötillståndet.

2.5.3 Slutsatser

Vi har med denna studie dels visat att det är möjligt att modellera vattenytor som kan användas för radarsignaturberäkningar och dels att det är möjligt att utföra radarsignaturberäkningar mha dessa modeller. Den stora utmaningen är att anpassa beräkningsnät för sjötillstånd som innehåller småskaliga vågor (t ex kapillärvågor och krusningar) som dels beskriver ytan på ett representativt sätt och som dels inte gör att beräkningsproblemet blir orealistiskt stort i termer av minnesutrymme (RAM) och beräkningstid. En möjlig lösning kan vara att använda en kombination av CAD-geometri som beskriver de storskaliga vågorna och en statistisk beskrivning som tar hänsyn till de mer småskaliga vågorna.

3 IR-signaturmodellering

3.1 CUBI-arbetet

Det finns en uppsjö av olika verktyg för att beräkna IR-signaturer. En del verktyg är ämnade att användas för stora scener och andra är mer lämpade för att användas för enskilda objekt. För att erhålla den totala signaturen för objekt i sin miljö kan resultat från de olika verktygen kopplas/sammanfogas. FOI har tillgång till en rad olika beräkningsverktyg inom området som var och en innehåller många olika modeller och modellparametrar. Modellerna har olika för- och nackdelar samt giltighetsområden. Det är därför av stor vikt att validera programmen och de olika modellerna mot uppmätta data. Detta för att få kännedom om beräkningsmodellernas begränsningar och giltighetsområden. För detta ändamål har vi valt att tillverka ett enkelt generiskt objekt, kallad CUBI, som syftar till att användas för att validera våra beräkningskoder. CUBI är ett standardiserat objekt som används i valideringssyfte av flera olika forskargrupper i olika delar av världen. Det finns ett så kallat CUBI-forum som ger oss tillgång till data, både mätningar och beräkningar. Verksamhetsmässigt har det interna arbetet delats in i olika områden,

- Beräkningar
- Mätningar
- Utveckla analysverktyg
- Utvärdering och analys

3.1.1 Beskrivning av beräkningar

3.1.1.1 CameoSim

CameoSim (Camouflage Electro Optic Simulation) är ett kommersiellt program som är framtaget av Insys Ltd England (numera en del av Lockheed Martin UK). Programmet har använts på FOI sedan 2003. Med CameoSim kan man utföra beräkningar i våglängdsområdet 0,4-14 μm . Programmet är lämpligt för simuleringar av relativt stora scenarier, med stora terrängavsnitt där man kan placera in olika objekt. Scenarierna kan vara både statiska och dynamiska, där objektens egenskaper och position kan varieras under en simulering. I CameoSim finns fysikaliskt baserade modeller för väder, termodynamik för beräkning av ytemperatur samt renderingsalgoritmer för modellering av spridning, transmission, reflektion och absorption av ljus. En begränsning är att termofysikaliska beräkningar endast utförs i en dimension, vilket medför att värmeflödet till och från en yta endast beräknas i djupled. I de fall man önskar en mer detaljerad beräkning av objekten i en scen kan dessa utföras i RadThermIR (se kapitel nedan) och importeras till scenariot i CameoSim.

I projektet har CameoSim använts för att beräkna IR data för ett scenario med CUBI. Renderade IR-bilder av scenariot och ytemperatur hos CUBI har tagits fram för våglängdsbanden 3-5 μm och 8-12 μm . Motsvarande data har

registrerats med FOI:s Agema Thermovision System 900 och temperaturgivare (Pt-100). Man har gjort jämförelser [21] avseende beräknad och uppmätt yttemperatur på CUBI. Figur 14 visar jämförelser mellan beräknade och uppmätta temperaturer för en yta på CUBI. För de horisontella ytorna hos CUBI fås en relativt god överensstämmelse. För de vertikala ytorna fås större avvikelser och då speciellt för de tidpunkter på dygnet då dessa har varit starkt belysta av en relativt lågt stående sol. För den vertikala sida som var riktad mest åt söder är överensstämmelsen relativt god och sämst för den yta som är riktad mest åt norr. Med stöd av programleverantören, Lockheed Martin UK, har vi försökt utreda orsaken till uppkomna avvikelser. Man kom fram till att utförda atmosfärsberäkningar ej var tidsmässigt helt synkroniserade med väderdata från väderstationen. Vidare rekommenderas att atmosfären beräknas med en högre upplösning (eg i fler diskreta punkter) för att minska interpolerings och extrapoleringsosäkerheter. Nya beräkningar är gjorda där man nu uppnår en avsevärt bättre överensstämmelse än tidigare.

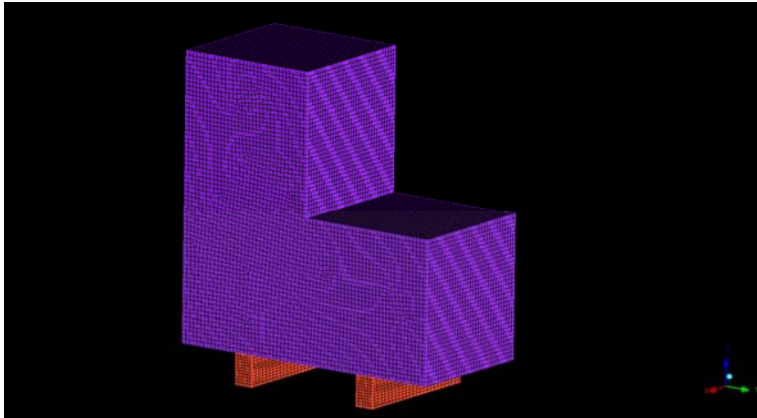
En grundläggande känslighetsanalys pekar på att små fel på parametrar i indata kan ge stora avvikelser på temperaturberäkningen av CUBI-objektets ytor. Störst inverkan har "solar absorptivity", dvs den effektivitet med vilken en yta absorberar solinstrålning, och direkt solinstrålning. En osäkerhet på 5 % hos dessa parametrar kan ge en temperaturskillnad på 2°C. Därefter kommer lufttemperatur, termofysikaliska egenskaper, materialtjocklek, himmelsstrålning, och vindhastighet. En osäkerhet på 5 % hos dessa parametrar kan ge en temperaturskillnad på 1°C.

Som lärdom av utförda beräkningar är att de kan vara mycket känsliga och man kan riskera att få relativt stora avvikelser i värdena. Vid beräkning av absoluta temperaturvärden bör man göra en känslighetsanalys för att kunna redovisa osäkerheten på ett korrekt sätt. Detta är förmodligen inte unikt för programmet CameoSim utan kan antas gälla allmänt.

3.1.1.2 RadThermIR

RadThermIR är ett kommersiellt program som är framtaget av ThermoAnalytics. Programmet utför beräkningar inom det termiska och infraröda området och baseras, till skillnad från CameoSim, på en tredimensionell värmeledningsmodell. För övrigt är CameoSim och RadThermIR relativt lika i sina modellantaganden, dvs beräkningarna baseras på strålgångsoptik, materialegenskaper, ytspridning hos objektet, termiska strålningsegenskaper, mm. Eftersom RadThermIR har en tredimensionell värmeledningsmodell, så krävs, för att kunna utföra beräkningar, att objektet beskrivs med ett tredimensionellt beräkningsnät. För detta ändamål används ett kommersiellt nätgenereringsprogram, ANSYS ICEM CFD.

Som en del i valideringsarbetet har beräkningar med RadThermIR utförts på CUBI. Figur 9 visar ett exempel på ett tredimensionellt beräkningsnät på CUBI som har använts.

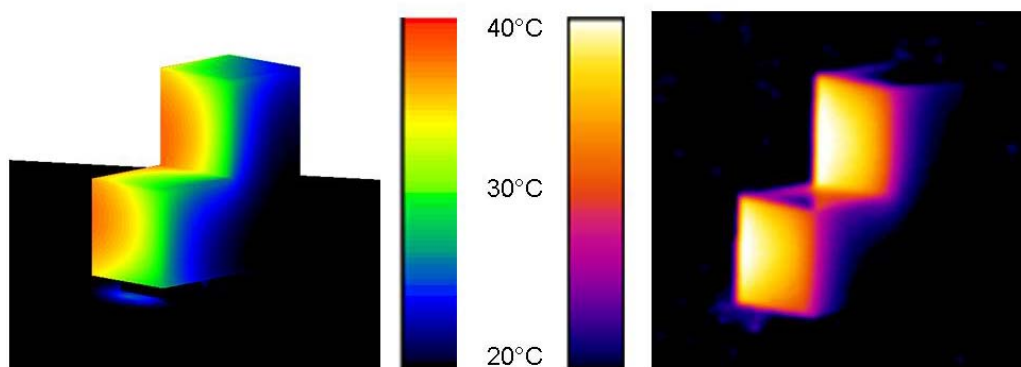


Figur 9. CUBI med ett tredimensionellt beräkningsnät bestående av ca 21 000 kuber.

Uppmätta reflektansdata från en provyta på CUBI användes som indata för att erhålla solabsorptionskoefficienter, våglängdsupplöst reflektans från ytan samt för beräkning av koefficienter för en vinkelberoende reflektansbeskrivning, en så kallad BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function).

Simuleringarna i RadThermIR har genomförts under ett dygn med en ny beräkning för varje minut, dock sparades resultaten endast för var femte minut. I figur 10 visas några enskilda uppmätta och beräknade radiansbilder för den skenbara temperaturen inom 8-12 μm . I bilderna framgår det att den tredimensionella värmetransporten som sker runt hörn är i relativt god överensstämmelse mellan uppmätta och beräknade resultat.

Man bör påpeka att den beräknade bilden inte tar hänsyn till den diffusa eller speglade reflektionen från omgivningen. Effekten av sådana reflektioner kan ses i de uppmätta bilderna där de två övre ytorna på CUBI ser kalla ut på grund av spegling av en kall himmel.



Figur 10. Bilden till vänster visar radiansbild framtagen från beräkningar medan bilden till höger är en uppmätt radiansbild. Bilderna är framtagna ca 07:00 på morgonen och skalan visar den skenbara temperaturen vid 8-12 μm .

Jämförelser av temperaturer på de enskilda ytorna har också gjorts, se figur 14 i resultatavsnittet. En faktor, förutom "solar absorptivity", som också visar sig påverka resultatet signifikant är vilken typ av konvektionsmodell som används, dvs vilken modell som används för att beskriva luftströmningens avkylande effekt på ytorna. Ett stort antal tester med olika empiriska vindkonvektionsmodeller har utförts och det samlade intrycket är att olika modellerna ger mer

eller mindre bra resultat beroende på hur plattorna är orienterade (horisontella eller vertikala). Ett alternativ till att använda dessa empiriska konvektionsmodeller är att utföra luftströmningsberäkningar, utifrån vindriktning och vindhastighet, på CUBI, där konvektionsresultaten sedan kan kopplas till temperaturberäkningarna i RadThermIR. Dessa luftströmningsberäkningar är i sig relativt omfattande och har inte legat som en del i detta projekt.

3.1.1.3 SE-RAY-IR

Under 2009 införskaffade FOI IR-beräkningsverktyget SE-RAY-IR. Programmet är utvecklat av OKTAL (Franskt bolag) och har relativt många användare på den internationella arenan. Programmet är lämpligt för simuleringar av relativt stora scenarier, med stora terrängavsnitt där man kan placera in olika objekt. I likhet med CameoSim så baseras programmet på en endimensionell värmeledningsmodell vilket gör beräkningarna snabbare än RadThermIR beräkningar men på bekostnad av noggrannheten i resultaten.

3.1.2 Mätningar

Flera typer av mätningar utfördes inom CUBI-arbetet: Färgens optiska reflektansegenskaper, många olika väderparametrar samt CUBIs temperatur och radians mättes. De olika mätresultaten användes dels som indata till simuleringarna, dels som referensdata i jämförelserna mellan mätningar och simuleringar. Resultat och metoder för mätningarna beskrivs kortfattat i följande avsnitt. En mer detaljerad beskrivning återfinns i Referens [21].

3.1.2.1 Reflektansmätningar av färg

För att kunna mäta CUBI-färgens optiska egenskaper målades en liten provyta med färgen. Färgytan karakteriserades med flera olika typer av reflektansmätningar. Ytans diffusa och totala reflektans uppmättes med "Fourier Transform Infrared" (FTIR) spektrometer (Bruker IFS55). Specifikt uppmättes, vid olika infallsvinklar i våglängdsbandet 1.7 - 25 μm , diffus och total "Directional Hemispherical Reflectance" (DHR) genom att använda en så kallad integrerande sfär.

Utöver den diffusa reflektiviteten uppmättes också den riktningsberoende reflektiviteten, "Bidirectional Reflectance Distribution Function" (BRDF) vid våglängden 3.39 μm hos färgprovet. Med denna metod karakteriseras ytans reflektivitet som funktion av både infalls- och spridningsriktning samt polarisationsberoendet.

Reflektansmätningarna (DHR och BRDF) användes sedan för att ta fram en materialmodell till simuleringarna. I CameoSim (och flera andra IR simulerings-mjukvaror) beskrivs de optiska spridningsegenskaperna hos en yta med hjälp av parametriserade modeller. Vi använde den så kallade Sandford-Robertson modellen [22] som är framtagen för att beskriva diffusa färgytor. En detaljerad beskrivning av parametriseringen av CUBI-färgen utifrån våra reflektansmätningar återfinns i [21].

3.1.2.2 Väderstationsmätningar

Radians och temperatur hos CUBI har uppmätts under två perioder: 23 juni - 1 juli 2009 samt 22 - 29 oktober 2010. Väderparametrar uppmättes med VAISALA Milos 500 väderstation. Följande parametrar uppmättes varje minut:

Vindriktning

Vindhastighet

Lufttemperatur

Luftfuktighet

Sikt

Nederbörd

Solinstrålning 305-2800 nm

Markstrålning 305-2800 nm

Himmelstrålning 3,5-50 μm

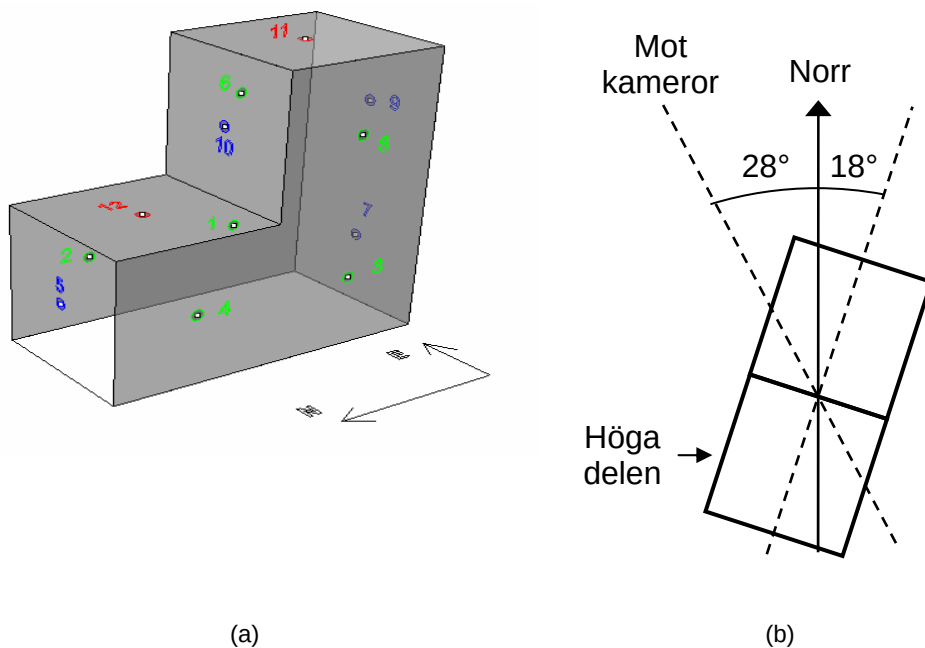
Markstrålning 3,5-50 μm

Marktemperatur

Väderparametrarna användes som indata till simuleringarna, efter viss databehandling till storheter och filformat som passar CameoSim, se avsnitt 3.1.3 nedan. Utrustningen för mätning av solinstrålning byttes ut inför mätningen 2010 eftersom den utrustning som användes 2009 inte fungerade korrekt. Mätdata av solinstrålning från 2009 har i efterhand korrigerats för ett systematiskt fel, genom att jämföra med andra, kända data.

3.1.2.3 Radians- och temperaturmätningar

Parallellt med vädermätningarna uppmättes temperaturerna på 12 positioner på ytan på CUBI, se Figur 11. Temperaturerna registrerades med hjälp av Pt100 temperaturgivare som frästs in i plåten från insidan av CUBI. Dessa temperaturer jämfördes direkt med de beräknade yttemperaturerna.



Figur 11. (a) Schematisk skiss av CUBI. Siffrorna indikerar Pt100 temperaturgivarnas placering. (b) Orienteringen av CUBI (sedd uppifrån) i förhållande till väderstreck och IR-kamerornas placering.

Förutom temperaturerna på ytan av CUBI uppmättes radiansen med hjälp av två skannande värmekameror (se Figur 12a), Agema 900SW (2.8 - 5.0 μm) och Agema 900LW (7.5 - 14 μm), och en datainsamlingsenhet Agema 900 system controller. Kamerorna var placerade ca 45 meter från CUBI på höjden 8.2 m (se Figur 12b).



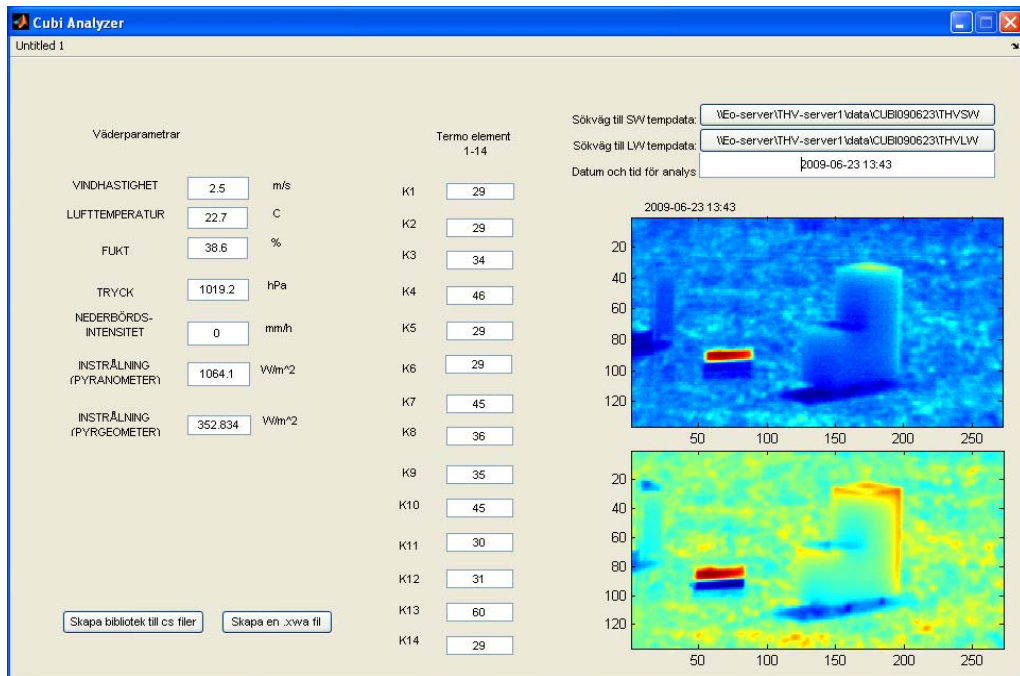
Figur 12 (a) Agema 900SW och LW värmekameror under mätning av CUBI. (b) CUBI och väderstation sedda ur kamerornas perspektiv.

3.1.3 Analys- och konverteringsverktyg

3.1.3.1 Mjukvara för visualisering och synkronisering av mätdata

Under mätningarna på CUBI inhämtades data från tre olika sensorsystem, från väderstationen, värmekameror och temperaturgivarna i CUBI. Dessa data sparades på tre separata filer. CUBI Analyser är ett grafiskt användargränssnitt som har tagits fram för att visualisera och synkronisera väder-, temperatur- och

kameradata för CUBI-objektet på ett lättöverskådligt sätt. Programmet är skrivet i Matlab och går relativt lätt att ändra till andra IR-mätningar av liknande slag. Figur 13 visar hur användargränssnittet ser ut samt hur data presenteras för en utvald tidpunkt.



Figur 13. Användargränssnittet för CUBI Analyzer.

Den övre radiansbilden är från den kortvågiga (3-5 μm) kameran medan den nedre bilden är från den långvågiga (8-12 μm) kameran. Dessutom har ett separat verktyg utvecklats för att ge användaren möjlighet plocka fram intensitetsvärdet för varje pixel i radiansbilderna.

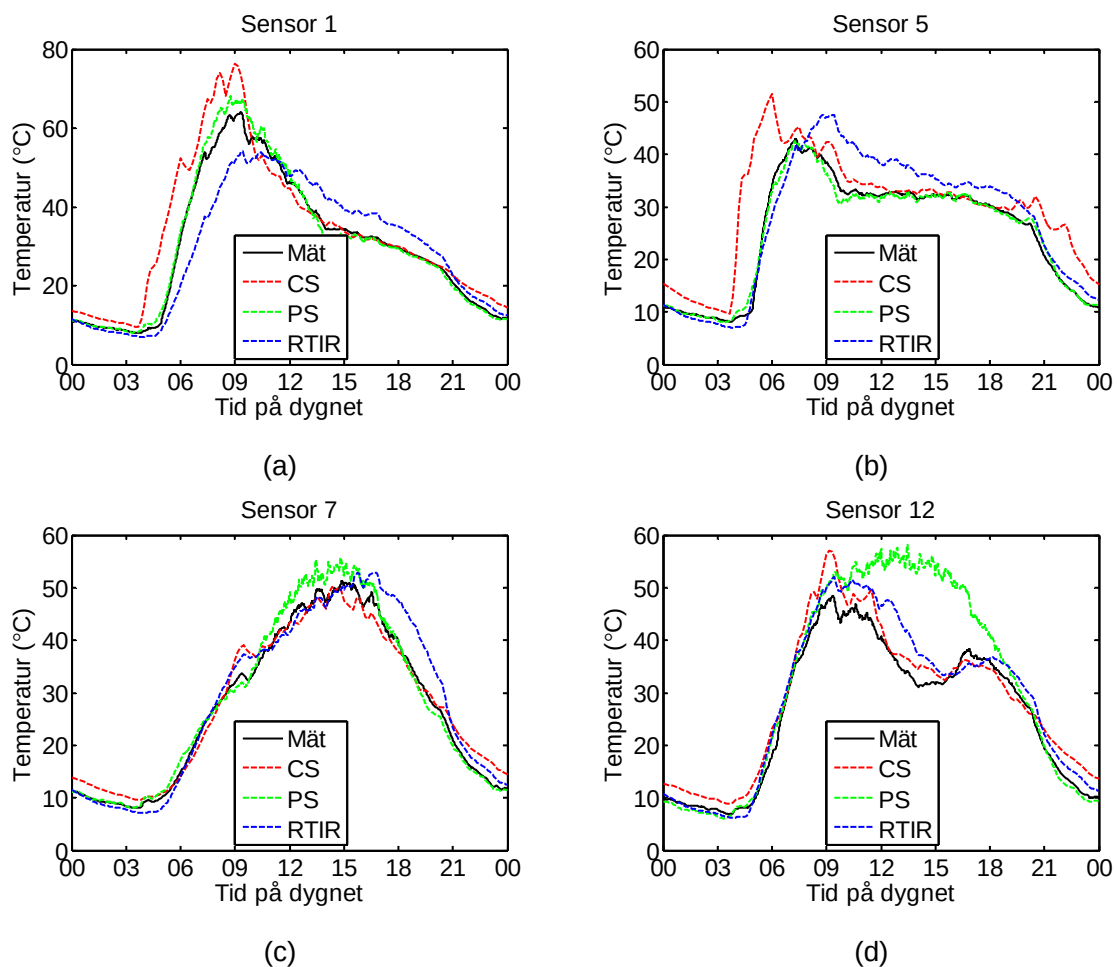
3.1.3.2 Konvertering av väderdata till beräkningar

Väderstationsdata ligger också till grund då atmosfärsegenskaperna beräknas till de olika IR-beräkningsprogrammen. Därför har ett separat konverteringsprogram utvecklats för att skapa filer med rätt indataformat till de olika atmosfärsberäkningarna som utförs i de olika IR-beräkningsprogrammen. För närvarande finns konverteringsmöjligheter från väderstationsdata till CameoSim-, RadThermIR- och SE-RAY-IR format. Dock finns vissa begränsningar för hur korta tidsintervall man kan lägga in i de olika programmen.

3.1.4 Resultat

Mätningarna på CUBI har analyserats med hjälp av simuleringar. De mjukvaror som använts är CameoSim [23], RadThermIR [24] samt ett numeriskt beräkningsprogram PolSig [25], baserat på finita differensmetoden, som är utvecklat av FOI för att analysera värmespridning i material. Några exempel på resultat visas i figur 14. CameoSim-simuleringarna som presenteras i referens [21] avviker oacceptabelt mycket från uppmätta temperaturer. Orsaken till avvikelserna har undersökts under 2010, och flera

felkällor har identifierats, bland annat kvaliteten på de beräknade atmosfärsförmågerna samt beskrivningen av ytornas optiska absorptionsegenskaper. Figur 14 visar resultat från de förbättrade CameoSim -simuleringarna. Parallellt med att förbättra CameoSim -simuleringarna har beräkningar på CUBI utförts med RadThermIR samt PolSig. Detta arbete kommer att fortsätta under 2011, med särskilt fokus på de senaste CUBI-mätningarna.



Figur 14. Jämförelse av uppmätta och beräknade temperaturer på några av CUBI-ytorna under dygnet 2009-06-29. Ytorna (sensorerna) är numrerade enligt figur 11 a. "Mät" indikerar uppmätta temperaturer, "CS" indikerar temperaturer beräknade med CameoSim, "PS" indikerar temperaturer beräknade med PolSig och "RTIR" indikerar temperaturer beräknade med RadThermIR.

De beräknade resultaten i figur 14 avviker från mätningarna vid flera tidpunkter. Alla orsaker till avvikelserna är inte utredda än. Det gäller exempelvis tidsförskjutningen mellan uppmätta temperaturer och temperaturer som är beräknade med CameoSim vid sensorerna 1 och 5, och nivåskillnaderna under vissa tidsintervall mellan mätdata och data som är beräknade med CameoSim och RadThermIR. De beräknade temperaturprofilerna vid sensor 12 (Figur 14d) har olika principiellt utseende. Mätningarna och resultaten från CameoSim och RadThermIR visar att temperaturen sjunker kl 12 - 18, medan

PolSig-resultaten inte uppvisar denna sänkning under dagen. Orsaken är att sensor 12, som är placerad på toppytan av den låga delen på CUBI (se Figur 11) hamnar i skugga under dessa timmar. PolSig använder inte några skuggningseffekter för att ta hänsyn till detta, medan CameoSim och RadThermIR hanterar skuggning med hjälp av strålgångsoptik.

Under 2010 har vi även börjat förbereda simuleringar av CUBI med hjälp av mjukvaran SE-RAY-IR. I förberedelserna ingår till exempel att ta fram atmosfärdata, ta fram beskrivningar av CUBI-färgens optiska egenskaper, samt att konvertera väderdata till SE-RAY-IR.

3.1.5 Slutsatser

Det övergripande målet 2010 inom området simuleringar av IR-signatur har varit uppbyggnad av kunskap och erfarenhet om beräkningsmodeller och flera olika beräkningsmjukvaror. Arbetet har varit fokuserat på CUBI. Dels har nya mätningar på CUBI genomförts, och dels har ett stort antal simuleringar för analys av CUBI-mätningarna från 2009 utförts. Flera olika beräkningsmodeller har använts och jämförts. Under arbetet har flera tidigare problem upptäckts och rättats till. Det gäller till exempel mätningarna av solinstrålning, och inparametrar till simuleringsprogrammet CameoSim.

Vi planerar att under 2011 utveckla arbetet med IR-simuleringar genom att analysera de nya CUBI-mätningarna, samt även modellera mer komplicerade objekt i realistiska bakgrunder. Arbetet är omfattande och innehåller många delar, till exempel beskrivning av geometrier och material, framtagning av atmosfärdata, framtagning av väderdata, framtagning av metoder och rutiner för att konvertera mellan olika dataformat, och att anpassa mätdata till parametriserade modeller. Vi planerar också att studera IR-modellering av plymer och flammor.

4 Referenser

- [1] Technical Arrangement No. 4.4 'New models for radar targets and environment' FOI Diarie nr. 08-H184:2
- [2] Magnus Herberthson, "EM Scattering calculations using potentials", FOI-S--3499--SE, SCEE 2008, p. 375-382
- [3] Magnus Herberthson, "Application of the potential method to the magnetic field integral equation", FOI-S--3404--SE, 26th Annual Review of progress in applied computational electromagnetics, in conjunction with RFIDay 2010, p. 120-123
- [4] Magnus Herberthson, "Application of the potential method to the combined field integral equation", FOI-S--3498--SE, SCEE 2010, Scientific Computing in Electrical Engineering, p. 103-104
- [5] Magnus Herberthson, "Scattering calculations using the potential method", FOI-S--3169--SE, Waves 2009, p. 402-403
- [6] Magnus Herberthson, "EM scattering calculations using potentials", FOI-S--2968--SE, SCEE 2008, Scientific computing in electrical engineering, p. 171-172
- [7] Fernando Obelleiro-Basteiro, Jose Luis Rodriguez and Robert J. Burkholder, "An Iterative Physical Optics Approach for Analyzing the Electromagnetic Scattering by Large Open-Ended Cavities", *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, Vol. 43, No. 4, pp. 356-361, April 1995.
- [8] Robert J. Burkholder, "A Fast and Rapidly Convergent Iterative Physical Optics Algorithm for Computing the RCS of Open-Ended Cavities", *ACES Journal*, Vol. 16, No. 1, March 2001.
- [9] Robert J. Burkholder and Tomas Lundin, "Forward-Backward Iterative Physical Optics Algorithm for Computing the RCS of Open-Ended Cavities", *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, Vol. 53, No. 2, pp. 793-799, February 2005.
- [10] Jonas Rahm och Magnus Gustafsson, "Iterativ fysikalisk optik (IPO) – En studie", FOI-R--2416--SE, December 2007.
- [11] A. K. Fung, "Microwave Scattering and Emission Models and Their Application". Boston: Artech House, 1994.
- [12] Erik Zdansky, Jonas Rahm and Anders Örbom, "Bistatic RCS measurement on different background surfaces", FOI-R--2785--SE Linköping 2009.
- [13] Erik Zdansky, "Kalibrering av radarmålära, särskilt objektfri kalibrering", FOI-R--2442--SE Linköping 2007.
- [14] Erik Zdansky och Anders Örbom, "Prov med objektfri kalibrering av radarmålära", FOI-R--2443--SE Linköping 2007.

- [15] Erik Zdansky, Anders Örbom and Jonas Rahm, "Object-free calibration and procedures for bistatic wide-angle ISAR measurements of clutter reflectivity at the Lilla Gåra (Sweden) test range", FOI-S--3533--SE, AMTA 2010.
- [16] Privat korrespondens
- [17] Erik Zdansky and Anders Örbom, "Measurement of magnitude offset", Manuscript.
- [18] Erik Zdansky och Anders Örbom, "Kalibrering av logaritmisk magnituddetektor", FOI-R--2441--SE Linköping 2007.
- [19] J. Rahm *et. al.* "Comparison between measured and calculated bistatic RCS data on a rough metallic background surface" Manuscript.
- [20] Olivier Outtier, "Simulating Water Waves for Radar Calculations", FOI-R--2593--SE, October 2008.
- [21] J. Fagerström, T. Hallberg, A. Hjelm, N. Karlsson, R. Lindell och A. Persson, "IR-analys av ett generiskt markobjekt CUBI", FOI--R--2888-SE, November 2009.
- [22] B. Sandford and D. Robertson, "Infrared Reflectance Properties of Aircraft Paints", IRIS Targets, Backgrounds and Discrimination (1985)
- [23] CAMEOSIM – CAMouflage Electro-Optic SIMulation, version 5.9, Mjukvara utvecklad av Lockheed Martin UK INSYS Ltd, Storbritannien. Se t.ex. CAMEOSIM-manuals (version 5.9).
- [24] "MuSES Technical Documentation (Updated through version 8.0)", ThermoAnalytics, Inc., <http://www.thermoanalytics.com/> (Användarmanual för RadThermIR).
- [25] Stefan Björkert, Manuskript om mjukvaran "PolSig" under beredning.