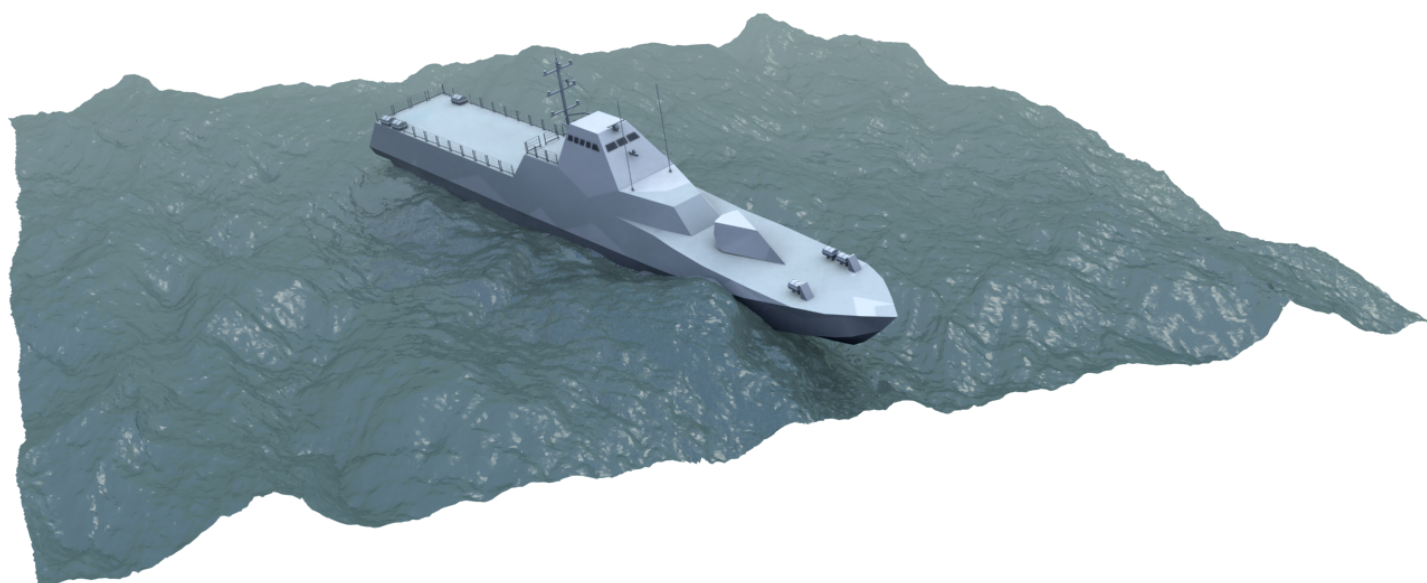


JAN FAGERSTRÖM, ÅSA ANDERSSON, STEFAN BJÖRKERT,
MAGNUS GUSTAFSSON, MAGNUS HERBERTHSON, ROLAND LINDELL,
NILS KARLSSON, NIKLAS WELLANDER, ERIK ZDANSKY, ANDERS ÖRBOM



Jan Fagerström, Åsa Andersson, Stefan Björkert,
Magnus Gustafsson, Magnus Herberthson,
Roland Lindell, Nils Karlsson, Niklas Wellander,
Erik Zdansky, Anders Örbom

Plattformssignaturer

Slutrapport 2013

Bild/Cover: Jimmy Berggren, FOI

Titel	Plattformssignaturer. Slutrapport 2013
Title	Platform Signatures. Final report 2013
Rapportnr/Report no	FOI-R--3766--SE
Månad/Month	December
Utgivningsår/Year	2013
Antal sidor/Pages	23 p
ISSN	1650-1942
Kund/Customer	FM
Forskningsområde	7. Sensorer och signaturanpassning
FoT-område	Sensorer och signaturanpassning
Projektnr/Project no	E54513
Godkänd av/Approved by	Per Johannessson
Ansvarig avdelning	Sensor- och TK-system

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk.
All form av kopiering, översättning eller bearbetning utan medgivande är förbjuden.

This work is protected under the Act on Copyright in Literary and Artistic Works (SFS 1960:729).
Any form of reproduction, translation or modification without permission is prohibited.

Sammanfattning

Rapporten ger en sammanfattande presentation av verksamheten inom projektet ”Plattformssignaturer” med fokus på 2013 års verksamhet. Uppnådda resultat sammanfattas och presenteras kortfattat. Projektet är kompetensbärande inom området modellering och analys av radar- och IR-signaturer. Sammantaget har projektet varit framgångsrikt och löpt enligt plan.

Nyckelord: Signatur, radarmålära, RCS, elektromagnetisk modellering, elektromagnetisk spridning, potentialmetoden, iterativ fysikalisk optik, IPO, sjöytemodellering, markmodellering, klotter, IR-signatur, IR-modellering, termiska modellering, RadThermIR

Summary

The present report summarizes the work accomplished in the project "Plattformssignaturer" ("Signatures of platforms") with emphasis on the year 2013. The project results are summarized and briefly presented. The project forms a competence foundation for modelling and analysis of radar and infrared signatures of platforms. Overall, the project has been successful and has been performed as planned.

Keywords: Signature, radar cross section, RCS, electromagnetic computation, electromagnetic scattering, the potential method, iterative physical optics, IPO, sea surface modelling, ground surface modelling, clutter, IR signature, IR modelling, thermal modelling, RadThermIR

Innehållsförteckning

Tack	7
1 Sammanfattande resultat	9
2 Resultat 2013	11
2.1 Potentialmetoden	11
2.2 Iterativ fysikalisk optik	12
2.3 Mål-bakgrundsinteraktion (marin)	13
2.3.1 Bakgrund.....	13
2.3.2 Metodik och modellering	13
2.3.3 Slutsatser	15
2.4 Mål-bakgrundsinteraktion (mark)	15
2.5 Mätningar med syntetisk aperturradar (SAR) på Lilla Gåra.....	16
2.6 Modellering av optiska ytegenskaper (BRDF)	17
2.7 Polarimetrisk termisk signatur modelleringskod (PolSig)	18
3 Diskussion och framåtblick	22
4 Referenser	23

Tack

Tack till Jimmy Berggren, FOI, för rendering av fartygsbild.

1 Sammanfattande resultat

Projektet ”Plattformssignaturer” har under åren 2012–2013 utvecklat metodik och tekniker för beräkning, mätning och analys av signaturer i radar- och infraröd (IR-) områdena. Föreliggande rapport ger en översikt och summering av arbetet i projektet, med särskilt fokus på år 2013. Referens [1] ger kompletterande information och beskriver statusen i projektet vid slutet av år 2012.

Behovet av signaturdata är stort, till exempel för att kunna värdera och analysera signaturer för olika plattformar, signaturanpassningsåtgärder, sensorprestanda, taktiskt uppträdande, sannolikhet för överlevnad, och för utveckling av algoritmer för måligenkänning och följning. Signaturarbetet i projektet ”Plattformssignaturer” har till största delen varit inriktat på modellering och beräkning. Detta för att möta behovet av signaturdata för objekt eller situationer som inte är tillgängliga för mätning, eller då mätningar blir alltför omfattande. Några exempel är signaturen för fientliga plattformar, system under utveckling eller existerande system som ska användas i nya miljöer och bakgrunder (till exempel vid internationella uppdrag). Som stöd för modellering och beräkning har projektet också arbetat med mätningar för validering av beräkningsmodeller, samt viss utveckling av mätmetoder. Några typiska frågeställningar som projektet arbetat med är:

- Vilka begränsningar, för- och nackdelar har olika beräkningsmetoder och beräkningsverktyg?
- Hur kan man på ett effektivt sätt ta hänsyn till bakgrunden vid signaturberäkningar?
- Vilka beräkningsmetoder/beräkningsverktyg är lämpliga att använda för olika typer av tillämpningar (t ex flyg-, mark- eller sjöfallet)?

Projektet har varit uppdelat i många olika arbetspaket, alla inriktade på att bygga upp och vidmakthålla kompetensen att analysera radar- och IR-signaturer. Flera beräkningskoder, baserade på olika metoder, utvecklas inom projektet: Potentialmetoden för noggranna RCS-beräkningar på medelstora objekt (se sektion 2.1), Iterativ fysikalisk optik (IPO) för approximativa RCS-beräkningar på stora objekt (se sektion 2.2), PolSig för snabba och flexibla beräkningar av termiska egenskaper samt IR-signaturer (se sektion 2.7), samt kod för modellering av sjöytor (se sektion 2.3). Alla dessa beräkningsmodeller har framgångsrikt använts för signaturberäkningar på komplicerade objekt. Eftersom koderna är utvecklade av FOI finns stora möjligheter att utveckla dem ytterligare efter behov. Många idéer till fortsatt utveckling finns vilka kommer att genomföras i följande projekt. Flera artiklar, konferensbidrag och rapporter om metoderna och olika tillämpningar av metoderna har också publicerats. Sammantaget ger beräkningskoderna oss möjlighet att beräkna radarsignatur hos många olika realistiska plattformar och objekt.

Projektet har också arbetat med det specifika problemet hur radarsignaturen hos ett objekt påverkas av växelverkan mellan objekt och bakgrund. Två fall har studerats: markmål och sjömål (se sektionerna 2.4 respektive 2.3). Markfallet har studerats under flera år och har i år resulterat i en vetenskaplig artikel som behandlar mätningar av markens bistatiska målarea. Marinfallet har studerats under ett par års tid. I år har arbetet fokuserat på flacka infall, speciellt viktigt t ex för scenarier med sjömålsrobotar. Inverkan av olika sjöstillstånd på ett fartygs radarsignatur har studerats, liksom inverkan av bogvågor och fartygets rörelse i vattnet (rullning). Att plattformarna växelverkar med mark- och sjöbakgrund har en betydande inverkan på radarmålarean. För fartyg kan växelverkan med sjöytan orsaka en mycket hög radarmålarea, i vissa fall även för smygfartyg.

Projektet Plattformssignaturer har också arbetat med en metod för mätning av SAR-bilder för objekt på mark på FOI:s mätplats Lilla Gåra (se sektion 2.5). Med en sådan metod finns möjligheten att effektivt och realistiskt utvärdera radarsignaturen hos objekt i

markbakgrund. Metoden fungerar i princip, men flera praktiska problem finns. Arbetet kommer därför fortsätta med att utvärdera olika alternativa praktiska lösningar.

Slutligen har projektet arbetat med en effektiv metod för att ta fram ytors optiska spridningsegenskaper, för vidare användning i simuleringar av IR-signatur (se sektion 2.6). Metoden bygger på förenklade reflektivitetsmätningar. Genom metoden kan många ytor karakteriseras snabbt, även i fält. Detta leder till mer realistiska modeller av IR-signaturen hos plattformar och bakgrund.

Resultat från projektet har presenterats vid olika möten och konferenser. Bland annat presenterades projektets verksamhet vid ett frukostseminarium 2013-06-04 på FMV i Stockholm. Frukostseminariet var välbesökt av deltagare från Försvarsmakten och FMV.

Sammantaget har projektet Plattformssignaturer varit framgångsrikt. Kompetensen inom radar- och IR-signaturer har utvecklats och flera olika beräkningsverktyg har tagits fram, använts och validerats. Projektets arbete leder till att signaturen hos ett stort antal militära plattformar i varierande miljö kan analyseras och värderas. I sektion 3 ges avslutningsvis en kort diskussion och framåtblick.

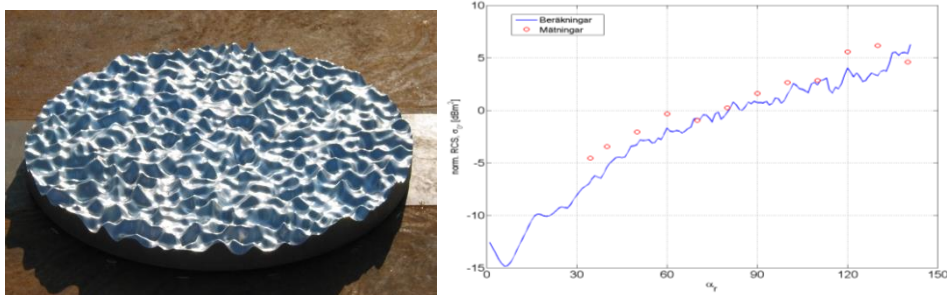
2 Resultat 2013

2.1 Potentialmetoden

Potentialmetoden är en metod för att lösa ett elektriskt spridningsproblem via Maxwells ekvationer. Metoden utgår från en given planvågsbelysning (d.v.s. i frekvensdomänen) och förutsätter för närvarande att det belysta objektet är av metall med god ledningsförmåga. Det speciella med metoden är att den bygger på en formulering av de ekvationer som uppkommer, tillsammans med en viss ansats på lösningen, som gör att man kan göra beräkningar på objekt som vanligtvis betraktas som ”för stora”. Man slipper då för vissa lite större problem att gå över till iterativa lösningsmetoder eller använda mer approximativa metoder som iterativ fysikalisk optik (IPO, se avsnitt 2.2) eller geometrisk optik.

Under projektiden har metoden presenterats vid flera konferenser, exempelvis [2], likaså har en tidskriftsartikel skickats in [3].

Ett exempel på resultat visas i Figur 1. Där ses dels ett fotografi på en skrovlig yta av aluminium som använts vid mätning och dels ett diagram där mät- och beräknade data jämförs. Vid beräkningarna användes en modell av ytan som innehöll ca 21 000 facetter.



Figur 1. Den vänstra bilden visar ett fotografi på en skrovlig aluminiumyta som har används för att utföra bistatiska radarmätningar på. Diametern på ytan är 0,9 meter. Diagrammet till höger visar en jämförelse mellan beräknade och uppmätta data för den skrovliga ytan, vid 30 graders elevationsvinkel för sändarantennen. Diagrammet visar den normerade målarean som funktion av mottagarantennens elevationsvinkel (relativt samma referens som sändarantennen) vid 10 GHz och HH-polarisation.

Under senare del av projektiden, har viss möda lagts på att anpassa koden för körningar på paralleldatorer. Även om potentialmetoden gör att större objekt kan hanteras, pressas hela tiden gränserna för vilka objekt man vill göra beräkningar på. Likaså gör behovet av att räkna på många frekvenser och för många vinklar, att tillgången till datorer med massiv parallelliseringsmöjlighet blir högst önskvärd. I det här fallet är det datorerna vid nationellt superdatorcentrum i Linköping (NSC) som nyttjats. Preliminära beräkningar på kaviteten i Figur 2 och Figur 3 visar på lovande beräkningsresultat jämfört med mätningar. I dessa beräkningar har kaviteten modellerats med ett beräkningsnät med 39700 trianglar, men det är önskvärt att öka antalet trianglar något.

Bland framtida arbetsuppgifter ses dels en mer grundlig validering av koden som är anpassad för körning på paralleldatorer, samt att få till möjligheten att räkna på tunna skikt av dämpande material.

2.2 Iterativ fysikalisk optik

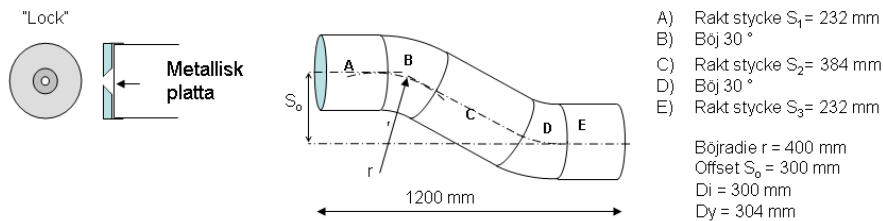
Under senare tid har datorernas beräkningskapacitet nått en nivå som möjliggör att mer beräkningskrävande, men också mer exakta metoder för beräkning av radarmålarea och elektromagnetiska fältberäkningar kan göras på relativt stora objekt vid X-bandsfrekvenser (8-12 GHz). FOI har därför under ett antal år valt att tillämpa iterativ fysikalisk optik (IPO) för beräkning av bl.a. kaviteter som t.ex. luftintag på flygplan. Kaviteter ger ofta stora bidrag till radarmålarean och är ofta mycket beräkningskrävande. IPO har visat sig ge god överensstämmelse med mätningar. Metoden innebär att man använder fysikalisk optik även vid beräkning av multipelstudsar. Tidigare har dessa beräknats med endast geometrisk optik och detta har fungerat bra för de flesta typer av objekt där multipelstudsarnas sidlobar är låga i förhållande till huvudloben. Vid exempelvis beräkningar av radarmålarea för kaviteter som luftintag på flygplan har geometrisk optik i vissa fall visat sig vara otillräcklig. Detta har mynnat ut i att FOI har utvecklat en IPO-kod för beräkning av medelstora elektromagnetiska problem. Under året har koden gjorts användarvänlig och anpassats för radarmålareaberäkningar. En noggrannare beskrivning av utvecklingsarbetet finns i [4].

För närvarande hanterar vår IPO-kod endast perfekta elektriska ledare, d.v.s. metall med god ledningsförmåga. För att kunna beräkna radarmålarea för exempelvis kaviteter vars insidor beklänts med radarabsorberande material har den befintliga koden utökats med att inkludera s.k. Leontovich-randvillkor. Detta randvillkor förutsätter att radarvågens inträngningsdjup i materialet är litet varför metoden fungerar väl om materialet har god ledningsförmåga. För att kunna validera vår kod har vi under sommaren gjort mätningar på en kavitet där vissa insidor beklänts med ett radarabsorberande material av typen Eccosorb FGM-40. En bild av denna kavitet illustreras i Figur 2 och Figur 3.



Figur 2. Olika vyer av kaviteten som använts för verifierande mätningar. Vänstra bilden visar kavitetens öppning; högra bilden visar den förslutna bakänden av kaviteten.

Kavitetsdimensioner



Figur 3. Kavitetsdimensioner.

Under slutet av 2013 kommer ytterligare valideringsmätningar göras på dihedraller (hörnreflektorer) där insidan av hörnreflektorens skänklar bekläts med Eccosorb FGM-40. På så sätt får vi tillgång till mindre beräkningskomplexa objekt för att kunna validera IPO-koden.

Under nästa år kommer koden utökas till att hantera godtyckliga dielektriska eller magnetiska multilagerstrukturer där fysikalisk optik approximationen är giltig. Denna utökning kommer att valideras mot en fransk IPO-kod som utvecklas av Oktal-SE i samarbete med ONERA-DEMR där även FOI har stöttat med experthjälp.

2.3 Mål-bakgrundsinteraktion (marin)

2.3.1 Bakgrund

Svenska marinen ska ha förmåga till såväl nationella som internationella militära insatser, i kustnära farvatten och på öppet hav. Ett gott egenskydd kräver tillförlitliga signaturdata. Detta gäller såväl signaturen för den egna plattformen som för befintliga och framtida hotssystem. Med anledning av det efterfrågade behovet av radarsignaturdata har vi studerat hur sjötilståndet inverkar på radarsignaturen av ett fartyg, samt hur radarsignaturen kan modelleras och beräknas.

Radarsignaturen för ett objekt brukar delas upp i tre olika komponenter. Ett bidrag ges av *objektet i fria rymden, utan interaktion med omgivningen*. Ett annat bidrag är *bakgrundsklottret*, dvs. bakgrundens reflektion av radarstrålningen. Den sista komponenten består av radarstrålningens *interaktion mellan bakgrund och objekt*. I det marina fallet handlar det om radarstrålningens spridning från fartyget till det omgivande vattnet och tillbaka till radarn och vice versa. Man har kunnat påvisa att denna växelverkan signifikant kan påverka radarsignaturen av ett fartyg. På grund av såväl teoretiska som beräkningstekniska svårigheter, lämnas detta viktiga bidrag ofta därhän. FOI har under ett antal år studerat möjligheten att hitta metoder som tar hänsyn till alla spridningsbidragen på ett fysikaliskt tillfredsställande sätt för realistiska objekt. Målet är alltså att kunna beräkna radarsignaturen för fartyg i sjö med hänsyn taget till interaktion mellan mål och bakgrund.

2.3.2 Metodik och modellering

Projektets arbete kring modellering och beräkningar av radarsignaturer för fartyg i sjö kan grovt delas in enligt följande:

1. Modellering av vattenytan

Arbetet inleddes med en studie av hur vattenytan kan modelleras för användning vid radarsignaturberäkningar av fartyg i olika sjötilstånd. En modell för generering av sjöytan, baserad på semiempiriska vågspektrum, har implementerats

[5]. Syftet med att ta fram modellerade ytor var att dessa skulle kunna användas vid beräkning av sjöklotterbidraget.

2. Litteraturstudier

Härefter påbörjades en litteraturstudie rörande modellering av sjöklotter, dvs. bakgrundsspridningen. Denna litteraturstudie kom senare att inriktas mot modellering av interaktionen mellan sjö och fartyg för radarsignaturberäkningar av fartyg. Detta är ett stort forskningsområde där mycket finns publicerat. Det är dock svårt att hitta praktiskt tillämpbara modeller. Om sådana finns så är de troligen klassificerade.

3. Modellering av inverkan av kölvatten på havsyntans klotter i radarbilder.

Vidare har modellering av kölvatten studerats. Styrkan på sjöklottrets bidrag till radarbilder beror på sjöstillståndet, dvs. ytvågornas amplitud och frekvensinnehåll. Klottret orsakas oftast till största delen av Braggspredning, dvs. konstruktiv och destruktiv interferens av reflexer från ytvågor av radarvågens våglängd. Dessa vågor refereras ofta till som kapillärvågor. Ett fartyg i rörelse orsakar ett kölvatten, en vak, som starkt påverkar havsyntans kapillärvågor. Modulationen av kapillärvågorna och dess ändring av havsyntans normaliserade radarmålyta kan beräknas om havsyntans vattenströmmar är kända [6]. För lågsignaturfartyg kan kölvattnet ge ett starkare bidrag till radarsignaturen än fartyget självt.

4. Radarsignaturberäkningar för flacka vinklar, horisontell polarisation

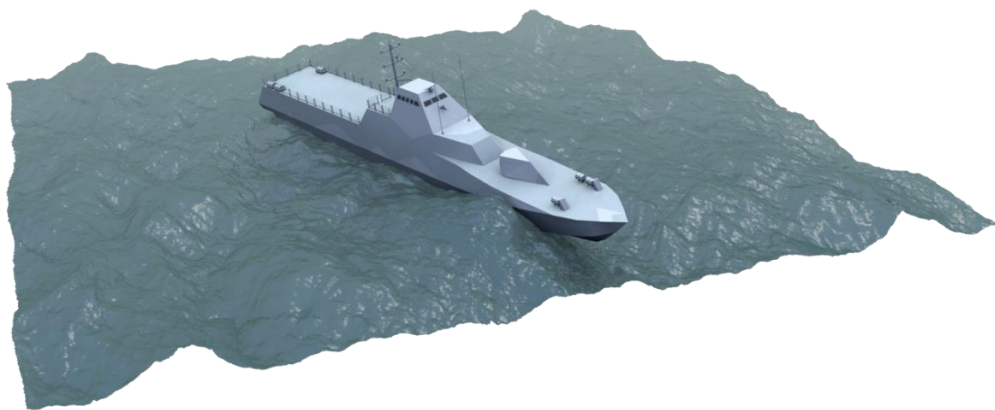
Signaturbidraget från interaktionen med vattenytan är vinkelberoende. Modelleringen av ytans bidrag måste därför ta hänsyn till bl.a. aspektvinkel. Projektet har under det senaste året valt att fokusera på att studera vattenytans inverkan på ett fartygs radarsignatur speciellt för flacka radaraspektvinklar vid horisontell polarisation. Detta fall är av särskilt intresse för till exempel ett scenario där en hotrobot anflyger fartyget, eller då inmätning sker på stora avstånd. Arbetet består av två delar:

- **Radarsignaturens beroende av sjöytemodell**

En undersökning av hur radarsignaturen beror av olika modellering av sjöytan har genomförts. Radarmålareberäkningar för fartyg i fri rymd, fartyg i en s.k. speglad scen, fartyg på en plan yta samt fartyg på en vågyta har genomförts i beräkningsverktyget SE-Workbench: SE-RAY-EM [7]. Vattnet har modellerats med elektromagnetiska materialegenskaper dels för ett perfekt elektriskt ledande material, dels för havsvatten.

- **Radarsignaturens beroende av fartygets rullning på vågor**

Inverkan av fartygets rullning på vågorna, s.k. fartygsroll, på radarsignaturen har studerats. Figur 4 visar en CAD-modell av ett lågsignaturfartyg på en, inom projektet genererad, sjöyta vid vindhastigheten 25 m/s. Då ett fartyg gungar på vågorna blir radaråterspridningen olika stor beroende på vinkeln mellan fartygsskrov och vattenyta, speciellt för vinklar nära 90° erhålls en stark reflex från fartyget. Detta gäller även lågsignaturfartyg.



Figur 4. Modell av signaturanpassat fartyg på modellerad sjöyta [5], vindhastighet 25 m/s. (Bildrendering: Jimmy Berggren, FOI.)

2.3.3 Slutsatser

Projektet studerar sjöytans inverkan på radarsignaturen för ett fartyg, samt hur signaturen kan modelleras och beräknas. Ett fartygs radarmålarea beror av många parametrar, bl.a. av radarstrålningens infallsvinkel mot fartyget och dess polarisation. En litteraturstudie tyder på att man för flacka infall och horisontell polarisation vid sändare och mottagare kan approximeras sjöytan med ett perfekt ledande plan. Detta medför i så fall enkel modellering. Vidare konstateras att för vertikalt polariserat fält blir spridningen från sjöytan mer komplicerad. Höga vindhastigheter ger en ökad korspolarisation. Inverkan från vågor gör att även lågsignaturfartyg kan uppvisa stor målarea. Ett fartyg i rörelse orsakar ett kölvatten, en vak. För lågsignaturfartyg kan kölvattnet ge ett starkare bidrag till radarsignaturen än fartyget självt.

2.4 Mål-bakgrundsinteraktion (mark)

För att kunna inkludera omgivningen vid beräkning av radarmålarea för ett fordon krävs att växelverkan mellan fordonet och marken beaktas. Denna växelverkan kallas mål-mark interaktion och kan vara betydande vilket gör att ett objekts smygegenskaper totalt kan förstöras om växelverkan bortses från vid designfasen av objektet. Växelverkan måste också inkluderas vid generering av träningsdata för högupplösta måligenkänningsalgoritmer eftersom skuggor och detaljupplösning beror av vilka interaktioner som beaktas. Generering av korrekta träningsdata kommer att bli alltmer viktigt för utveckling av framtida radarsystem. Projektet har under tidigare år arbetat med att ta fram fysikaliska modeller för att kunna inkludera växelverkan i sådana underlagsberäkningar.

Under året har arbete fokuserats till att färdigställa den vetenskapliga artikeln "A New Methodology for Measuring the Bistatic Ground Scattering Coefficient. Comparisons with the AIEM at Large Bistatic Angles", se [8]. I detta arbete presenteras en ny metod för att kunna mäta markens bistatiska radarmålarea vid stora bistatiska vinklar. Metoden gör det möjligt att utveckla växelverkansmodeller för stora vinklar och att validera dessa med mätningar som utförts med stor mät noggrannhet.

2.5 Mätningar med syntetisk aperturradar (SAR) på Lilla Gåra

Detta arbetspaket inom projektet Plattformssignaturer syftar till att utveckla verksamheten för mätningar av radarsignatur. Genom att uppnå förmågan att göra högupplösta mätningar mot fordon eller andra objekt i en bakgrundsmiljö ökar möjligheterna att värdera radarsignaturer på ett relevant sätt.



Figur 5. Antenn på mast monterad på rälsgående vagn på mätplatsen Lilla Gåra. Masten är ca 9.2 m hög.

Inledande SAR-mätningar gjordes under 2012 med sändare och mottagare placerad i en mast på en rälsgående vagn (se Figur 5). Genom att förflytta antennen längs rälsen skapas en syntetisk apertur. Bildkvaliteten från dessa inledande mätningar blev dock otillfredsställande vilket antogs kunna bero på okontrollerade rörelser i den vagnsmonterade mast som användes som radarplattform (se Figur 5). Under 2013 har en teoretisk analys gjorts av hur olika typer av positionsfel inverkar på avbildningen. Slutsatsen är att den dåliga fokusering i tvärsled som nedsätter bildkvaliten har sin grund i okontrollerade variationer i radarns position i djupled (alltså avståndet mellan radar och mål) medan andra positionsfel har väsentligt mindre inverkan. Felen kan utgöras av statiska positionsfel (vagnläget) eller dynamiska (svaj i masten). Baserat på denna analys gjordes i år också ett försök att autofokusera bilderna, d.v.s. att utnyttja information i insamlade radardata för att korrigera felen. Dessvärre erhöles endast marginella förbättringar i bildkvaliten.

Huvuduppgiften i år enligt plan var att göra nya mätningar där data för lägeskorrektion av antennenpositionen skulle göras med accelerometrar. Dessa mätningar har ännu inte utförts, i första hand därför att vagnens drivutrustning, som är gammal, är ur funktion. Vidare har en analys visat att det kan bli svårt att få tillfredsställande korrektionsdata med den tilltänkta utrustningen.

Sannolikt måste betydligt mer resurser än vi ursprungligen uppskattade läggas på arbetet, både vad gäller autofokusering och instrumentell positionskorrektion för att nå framgång. Detta skulle tillföra värdefulla erfarenheter och kompetens. Man skulle kunna tänka sig att sådan förmåga i framtiden skulle kunna utnyttjas för utveckling av operativ fordonsburen SAR för spaning mot flanker snett framåt. Den på detta sätt starkt utvidgade arbetsuppgiften innebär emellertid också ett riskmoment när det gäller omfattningen av arbetet och en hög kostnad. Möjligheterna att gå vidare under befintliga förutsättningar är under utredning. En möjlighet är att använda utrustning som kan positionera antennerna

med god mekanisk precision men inte täcker så stort vinkelområde utan ger någon eller några bildsektorer¹ åt gången. Mellan varje bild eller bildomgång måste antenner eller objekt visserligen flyttas men det bör bli enklare att erhålla bra SAR-bilder och enklare att använda utrustningen för mer fältnässig signaturmätning på 50-300 m håll i en verklig omgivning. Den tekniska lösningen kan vara någon form av färdig lösning, en SAR-räls eller med en industrirobot för antennpositionering. Den sistnämnda positioneringslösningen bedöms ge god precision, mångsidighet (6-axlig positionering och bra mjukvarustöd) och rimlig kostnad.

2.6 Modellering av optiska ytegenskaper (BRDF)

Projektet har under 2013 arbetat med en metod att effektivt ta fram indata till beräkningar av infraröd (IR-) signatur. Metoden gäller ytors optiska egenskaper och är användbar på de flesta objekt, och kan även användas i fält (istället för att analysera ytorna i labb-miljö). Metoden ger därmed enklare och snabbare tillgång till korrekta optiska ytegenskaper hos verkliga objekt, och därmed också till noggrannare analyser av IR-signaturer med hjälp av beräkningar.

Under några år har projektet arbetat med modellering och utveckling av modeller för IR-signaturer av olika plattformar, soldater och bakgrunder (se referenserna [9], [10] och [11]). Viktiga inparametrar i sådana beräkningar är ytornas optiska spridningsegenskaper, så kallad BRDF ("bi-directional reflectivity distribution function"). BRDF behövs för att korrekt återge reflekterad och emitterad IR-strålning i olika riktningar. BRDF innehåller generellt mycket information, för alla infallsvinklar och utfallsvinklar, och är därför komplicerat och tidskrävande att mäta. Ett ytterligare problem med BRDF är att ytorna normalt måste karakteriseras i labbmiljö, vilket betyder att ytorna på de verkliga objekten sällan kan användas för karakteriseringen. Istället måste man använda speciellt tillverkade provtytor. Provytorna riskerar därför att ha delvis andra egenskaper än de verkliga ytorna. Detta har observerats i tidigare studier [11].

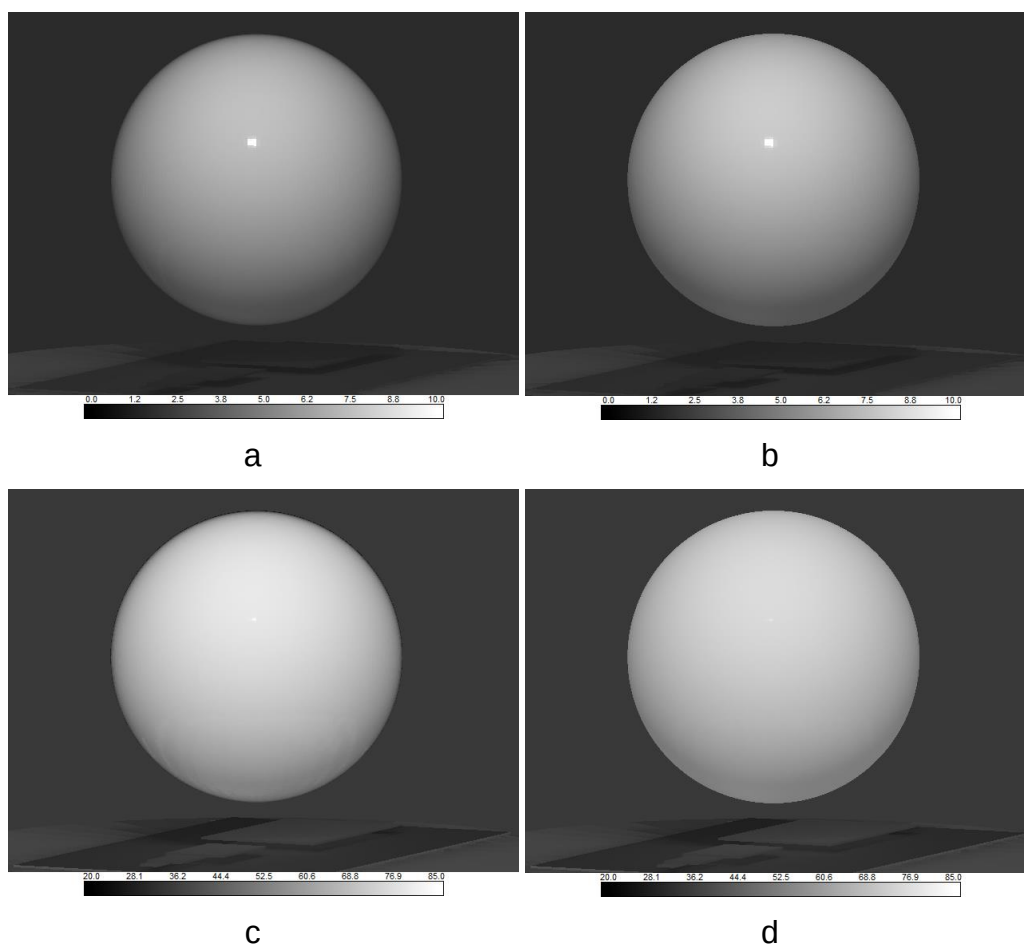
För att komma till rätta med båda problemen (tidskrävande mätningar och användningen av speciellt tillverkade provtytor) har vi analyserat en metod att ta fram BRDF från förenklade reflektivitetsmätningar med handhållen utrustning som kan användas i fält, se Figur 6. Utrustningen mäter total och diffus reflekterad strålning för några få olika infallsvinklar.



Figur 6. Handhållen utrustning för reflektansmätning. Till vänster 410-Solar reflectometer och till höger SOC 410 DHR Reflectometer. Fotografier från Surface Optics Corporation.

¹ Vid ISAR-mätningar görs mätningen typiskt över 360° varefter bilder beräknas med vissa aspektvinkelsteg (typiskt 1-5°) där varje bild använder data från en viss delsektor (t.ex. 3-20° beroende på frekvens och upplösning). Här skulle man mellan varje förflyttning kunna mäta data för en, eller några överlappande, ej alltför breda delsektorer.

Genom att karakterisera ett antal provytor med både förenklad reflektivitetsmätning (handhållen utrustning) och noggrann mätning av BRDF och total reflektivitet har vi identifierat ett samband mellan de förenklade mätningarna och BRDF-egenskaperna. Resultatet är en metod att ta BRDF från förenklade mätningar av ytor. Med denna metod kan vi enklare karakterisera ett stort antal verkliga ytor som sedan kan användas i realistiska simuleringar av IR-signaturen hos plattformar, soldater och bakgrunder. Ett exempel ges i Figur 7. Metoden beskrivs i en rapport (se referens [12]), och målet är att utnyttja metoden i kommande IR-signaturberäkningar.



Figur 7. Figuren visar radiansen beräknad för en sfär där man i bilderna till vänster (a och c) använt BRDF-data utifrån labbmätningar på en provbit. Bilderna till höger (b och d) har BRDF-data bestämts utifrån den handhållna utrustningen med undantag av data för den spekulära lobvidden. Bilderna a och b avser våglängdsbandet 3-5 μm och bilderna c och d avser våglängdsbandet 8-12 μm .

2.7 Polarimetrisk termisk signatur modelleringskod (PoISig)

När man diskuterar signaturer och upptäckt av mål är kontrasten mellan mål och bakgrund det primära. En hög kontrast gör det lättare att upptäcka och identifiera objekt. En förståelse för och kunskap om hur och när sådana kontraster uppkommer behövs för att bedöma hur lätt ett mål kan upptäckas. Därav finns behovet att kunna simulera bland annat den termiska signatur.

Det finns ett antal kommersiella programvaror med vars hjälp enskilda målobjekts eller hela sceners IR-signatur kan beräknas, t.ex. RadThermIR™, CameoSim™ eller SE-

Workbench™ för att nämna några som FOI har tillgång till och använder. En nackdel med dessa kommersiella programvaror är att användaren inte har full insyn i hur koden tar hänsyn till olika fenomen. Dessutom så kräver dessa en rigorös uppställning av problemet med många parametrar som därmed blir både tidskrävande vid formeringen samt vid uträkningen och därmed svår att hantera i fält.

För att adressera detta har projektet bidragit till utvecklingen av en egen mjukvara, en ”verktygslåda” för IR-simuleringar som:

- Bygger på fysikaliska principer och som tar med relevant väderhistorik.
- Tar hänsyn till atmosfärsdämpning och radianseffekter.
- Tar hänsyn till sensoreffekter.

Det som är genomfört och som presenteras i detta avsnitt är implementationen av den första punkten av dessa tre. Fyra kortsiktiga mål sattes upp för verksamheten:

1. Få tillgång till en simuleringsmiljö för att testa nya algoritmer.

För att kunna testa egenutvecklade algoritmer för beräkning av olika termiska egenskaper och/eller radiansfenomen behövs full tillgång och förståelse av koden. Genom samarbeten med producenter kan FOI få dessa egenutvecklade algoritmer implementerade i de kommersiella koderna till gagn för vårt fortsatta arbete.

2. ”Enkel” beskrivning av problemet för att reducera den nödvändiga processorkraften.

Det är en fördel om koden inte kräver så mycket processorkraft för att kunna göra snabba iterationer i studier av hur olika fenomen påverkar en modell. Detta är också till fördel under en utvecklingsfas av nya algoritmer. Därmed kopplar denna punkt till både punkt 1 ovan och punkt 4 nedan.

3. Flexibel termisk modellering.

Detta kopplar till första punkten, dvs. för att kunna testa egenutvecklade algoritmer är det en fördel om koden är flexibel så att nya algoritmer enkelt kan infogas. Det finns även långsiktiga mål (se nedan) som kräver en stor flexibilitet.

4. Kompetenshöjande.

Eftersom FOI inte har full insyn i hur kommersiella koder tar hänsyn till exempelvis termiska fenomen och radians så är det svårt att värdera validiteten hos de modeller vi bygger upp i dessa. I och med att FOI bygger upp en egen kod kan vi få en större förståelse av resultaten och lättare utvärdera styrkor och svagheter hos modellerna. I slutändan ger detta högre tillförlitlighet även till våra termiska modeller med kommersiella programvaror vilket kommer Försvarmakten till gagn genom större säkerhet i prediktionen av IR-signaturer.

Det finns även två långsiktiga mål med denna kod som sträcker längre än inom ramen för detta projekt och dessa är:

1. Taktiskt verktyg för att estimeras egensignatur.

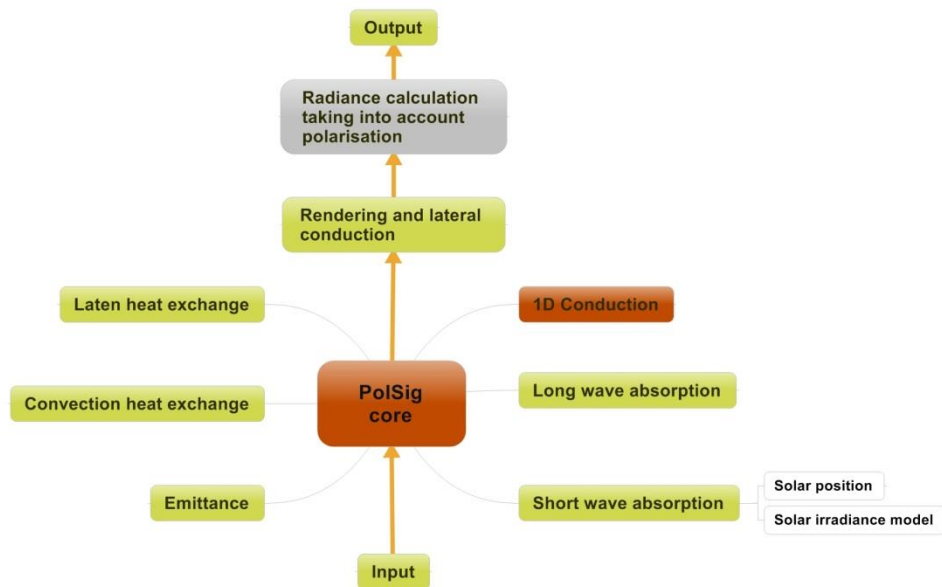
Syftet är att använda PolSig för att värdera egensignaturen i fält, vilket påverkar det taktiska uppträdandet.

2. Taktiskt verktyg för att estimeras bakgrundssignatur.

Att i fält kunna estimeras hur bakgrunden kommer se ut i ett framtida scenario är av betydelse för hur man taktiskt t.ex. planerar och genomför ett spaningsuppdrag men också som ingångsdata till förändringdetektionsalgoritmer.

Mot bakgrund av målen som sattes upp har vi valt att försöka reducera den nödvändiga datorkraften genom att beskriva ytorna av ett målobjekt med en endimensionell termisk beskrivning och att minimera behovet av en finmaskigt geometrisk modell (indelningen av en yta i mindre ytelement) med en metod som liknar störningsanalys (se nedan).

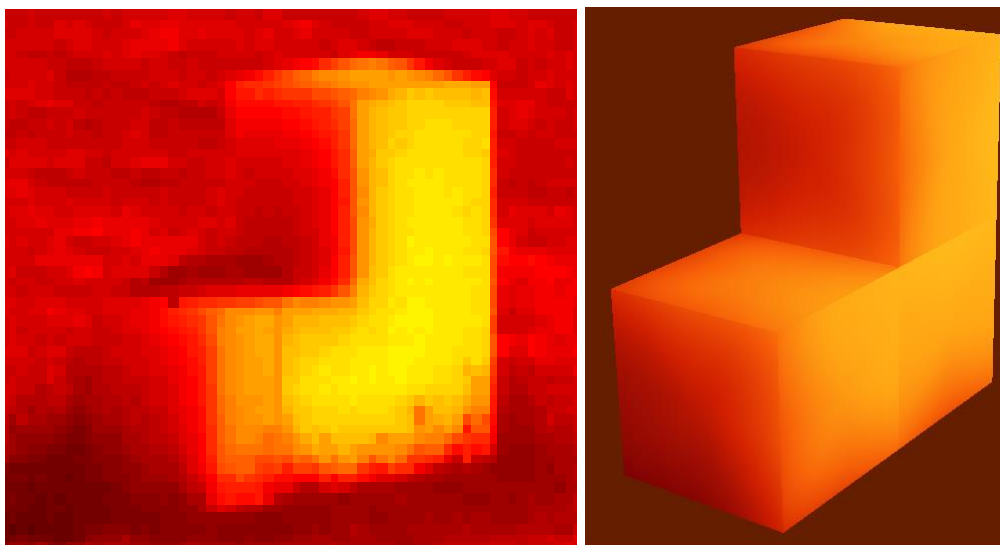
För att få en flexibel kod har koden byggts upp modulärt, se Figur 8. Huvuddelen av koden tar hand om den endimensionella finita differensmetoden (FDM) för värmeledningen genom materialet. Denna bygger på Crank-Nicholson-algoritmen precis som många av de kommersiella koderna (t ex. RadThermIR [13][14]).



Figur 8 Schematisk bild på PolSigs modulära uppbyggnad. Observera att den endimensionella värmeledning (markerad med röd box i figuren precis som kärnmodulen) i materialets tjockleksriktning hanteras i kärnmodulen. Lateral värmeledning från närliggande sidor tas däremot om hand i en separat modul i anslutning till rendering av resultatet.

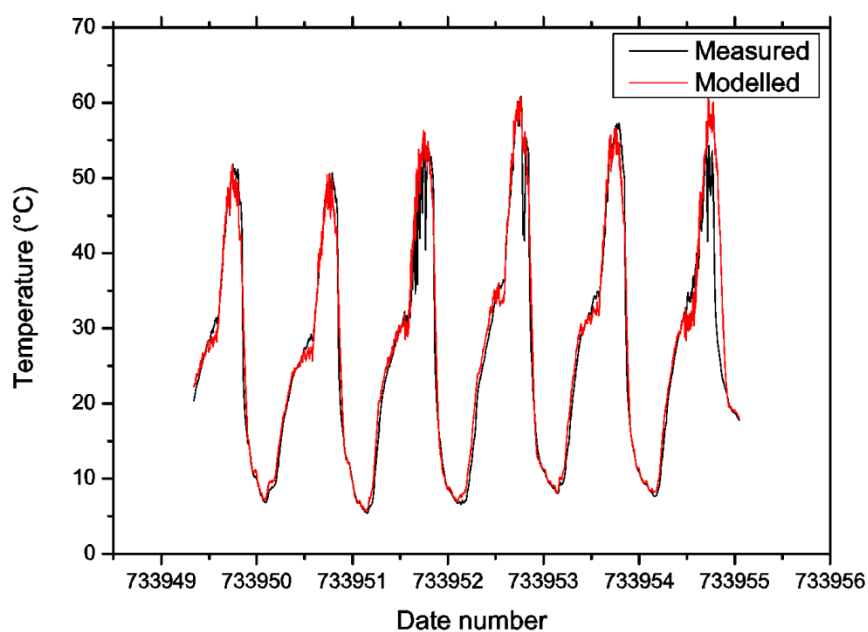
Värmeutbredning längs ytorna bygger på störningsanalys. Ytorna betraktas som frilagda från varandra i steg 1 där värmeutbredningen beräknas endimensionellt. I steg 2 beräknas hur mycket omgivande ytor stör den ytan vi har räknat på. När vi tankemässigt för ihop ytorna (steg 2) så kommer värme flöda från den ena ytan till den andra.

Den 23 juni till 1 juli 2009 genomfördes ett mätförsök med ett generiskt IR-mål där syftet var att validera delar av de modeller som bygger på kommersiella koder och som används inom projektet [9]. Dessa data användes också till validering av PolSig-koden. Resultatet från denna validering kan ses i Figur 9 och Figur 10. I Figur 9 ses en renderad temperaturfördelning på CUBI-objektet och jämförs med resultatet upptaget från AGEMA kameran i MWIR ("Mid Wave Infrared", våglängd 2.8–5 μm). Notera att vår störningsmodell genererar trovärdiga skiftningar i temperaturen på ytorna som förväntat (jämfört med vänstra bilden).



Figur 9. Till vänster en bild av CUBI-objektet kl. 16:00 från 2009 år försöket taget med AGEMA kameran i MWIR. Till höger bild på simulerad CUBI vid samma tillfälle. Observera att den modellerade CUBI visar modellerad (inte skenbar) temperatur. Inga sensorspecifika effekter som brus, känslighet, mm, eller atmosfärs effekter har modellerats.

Figur 10 visar temperaturen på den främre sidoytan som vetter mot kameran på den låga delen, över hela tidsperioden för försöket. Som synes så är överensstämmelsen bra mellan beräknade och uppmätta temperaturer.



Figur 10. Temperatur på den främre nedre sidoytan (låga delen) på CUBI, som syns i Figur 9. Svart kurva är uppmätt temperatur och röd är modellerad temperatur.

3 Diskussion och framåtblick

Sammanfattningsvis har arbetet i projektet Plattformssignaturer varit lyckat under 2012–2013. Projektet är kompetensbärande inom området modellering och analys av radar- och IR-signaturer. Vissa av de arbeten som utförts under 2012–2013 kommer utvecklas vidare under efterföljande projekt. Till exempel kommer algoritmer för att behandla absorbenter med potentialmetoden och IPO att utvecklas. Signaturer för sjömål i marin bakgrund kommer också vidareutvecklas. Vidare kommer efterföljande projekt studera inverkan av olika materialstrukturer i signaturmodeller (skiktade materialstrukturer och multipelspridning i material). Modellering av IR-signatur kommer studera möjligheten att förfina modellerna genom att inkludera konvektionseffekter på ett mer realistiskt sätt, och även använda metoderna för studier av termiska egenskaper (t.ex. termisk komfort för soldater). I samverkan med modelleringsarbetet kommer validerande mätningar utföras och viss mätteknik utvecklas. Det övergripande målet är att upprätthålla kompetensen inom området radar- och IR-signaturer, bevaka teknik och metoder inom signaturområdet och att utföra modellering och analys av signaturegenskaperna hos militära plattformar.

4 Referenser

- [1] J. Rahm, "Statusrapportering Plattformssignaturer", FOI MEMO 4259, FOI, Linköping (2012).
- [2] M. Herberthson, "Application of the Potential method for determining the radar cross section of electrically large objects", URSI GASS, Istanbul, 13-20 augusti (2011) (Även FOI-S--3862--SE).
- [3] M. Herberthson, "The Potential Method for Calculations of Scattering from Metallic Bodies" Inskickad för publicering.
- [4] J. Rahm och M. Gustafsson, "Användarmanual för beräkningsprogrammet IPO", FOI-rapport FOI-R--3672--SE, Linköping (2013).
- [5] Å. Andersson och J. Rahm, "Sjöytemodellering – statusrapportering", FOI MEMO 3685, Linköping (2011).
- [6] N. Wellander, "Radar Imaging of Ocean Surfaces", FOI-rapport FOI-D--0486--SE, Linköping (2012).
- [7] OKTAL Synthetic Environment, SE-Workbench: SE-RAY-EM (mjukvara), Frankrike (2010). <http://www.oktal-se.fr>.
- [8] M. Gustafsson, M. Herberthson, J. Rahm, E. Zdansky och A. Örbom, "A New Methodology for Measuring the Bistatic Ground Scattering Coefficient. Comparisons With the AIEM at Large Bistatic Angles", IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 10, no. 5, p. 1167, September (2013). (Även FOI-rapport nr FOI-S--4403--SE.)
- [9] J. Fagerström, T. Hallberg, A. Hjelm, N. Karlsson, R. Lindell och A. Persson, "IR-analys av ett generiskt markobjekt CUBI". Konstruktion, mätningar och simuleringar.", FOI-rapport FOI-R--2888--SE, Linköping (2009).
- [10] J. Fagerström, A. Hjelm, N. Karlsson, R. Lindell och J. Rahm, "Termiska beräkningar på två varianter av referensobjekt CUBI. Känslighetsanalys och jämförande mätningar.", FOI-rapport FOI-R--3268--SE, Linköping (2011).
- [11] J. Fagerström, N. Karlsson, R. Lindell och J. Rahm, "Metod för modellering av IR-signatur för fordon. Mätningar och beräkningar.", FOI-rapport FOI-R--3591--SE, Linköping (2012).
- [12] N. Karlsson, J. Fagerström, T. Hallberg och R. Lindell, "Förenklad bestämning av optiska ytegenskaper för IR-signaturmodellering", FOI-rapport FOI-R--3770--SE, Linköping (2013).
- [13] RadTherm Technical Documentation (teknisk manual för RadThermIR), ThermoAnalytics, Inc. (Företagets web-sida: <http://www.thermoanalytics.com>)
- [14] "RadThermIR Version 10.1. User Manual", Manual för RadThermIR, revision 20110419, ThermoAnalytics, Inc., (2011). (Företagets web-sida: <http://www.thermoanalytics.com>)

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
164 90 Stockholm

Tel: 08-55 50 30 00
Fax: 08-55 50 31 00

www.foi.se