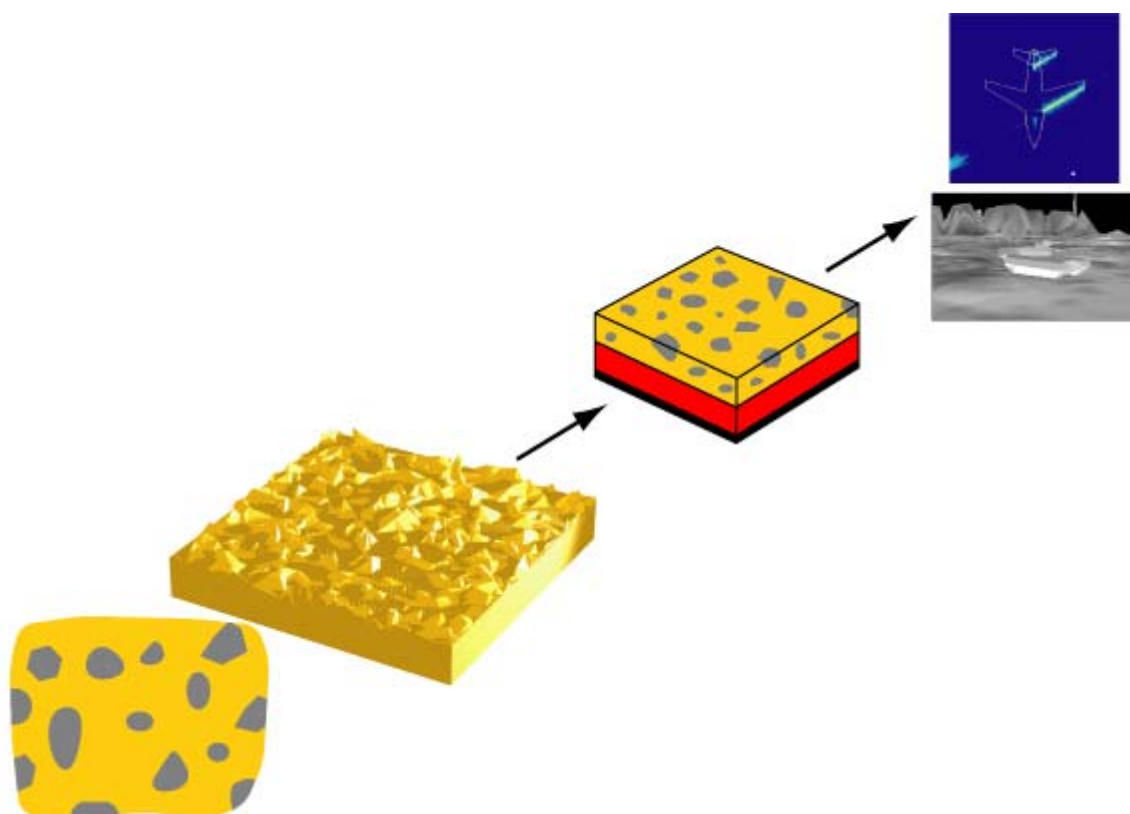


Jan Fagerström, Göran Forssell, Patrik Hermansson, Hans Strifors, Niklas Wellander

Slutrapport för projektet Modellering av signaturmaterial



TOTALFÖRSVARETS FORSKNING SINSTITUT

Sensorteknik

Box 1165

581 11 Linköping

FOI-R--1520--SE

December 2004

ISSN 1650-1942

Användarrapport

Jan Fagerström, Göran Forssell, Patrik Hermansson, Hans Strifors, Niklas
Wellander

Slutrapport för projektet Modellering av signaturmaterial

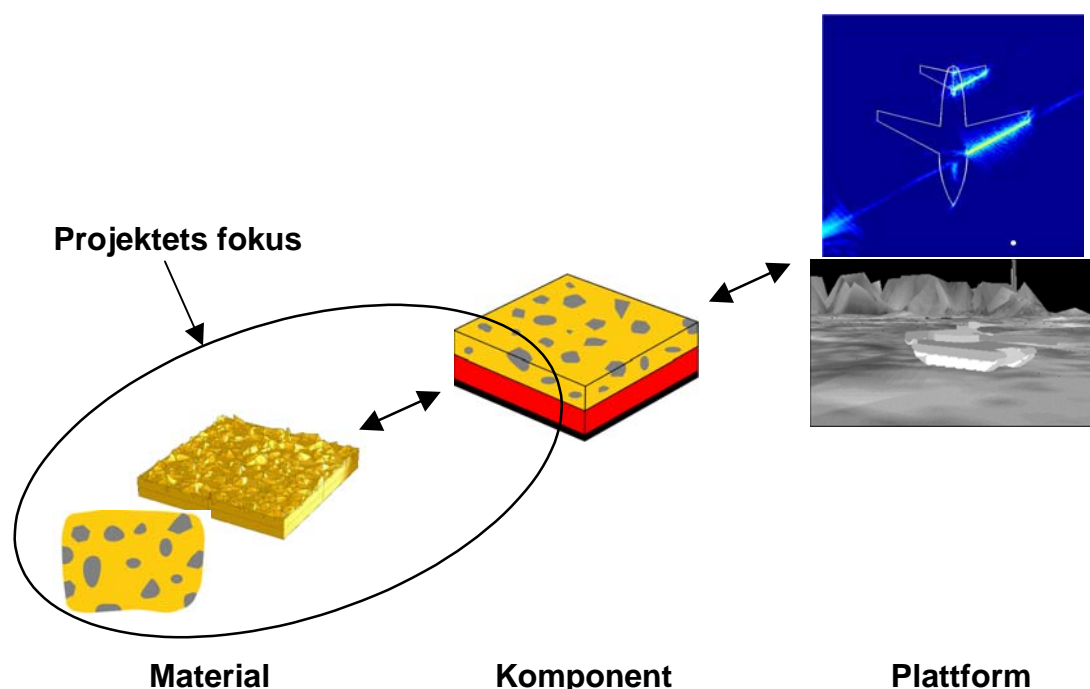
Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Sensorteknik Box 1165 581 11 Linköping	Rapportnummer, ISRN FOI-R--1520--SE	Klassificering Användarrapport
	Forskningsområde 6. Telekrig och vilseledning	
	Månad, år December 2004	Projektnummer E3052
	Delområde 62 Signaturanpassning	
	Delområde 2	
Författare/redaktör Jan Fagerström Göran Forssell Patrik Hermansson Hans Strifors Niklas Wellander	Projektledare Jan Fagerström	
	Godkänd av Lars Bohman	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning FM	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig	
Rapportens titel Slutrapport för projektet Modellering av signaturmaterial		
Sammanfattning (högst 200 ord) <p>Denna rapport ger en sammanfattning av verksamheten och resultaten inom projektet "Modellering av signaturmaterial". Projektet har bedrivits inom de strategiska forskningskärnorna under åren 2002—2004.</p> <p>Projektets övergripande mål har varit att "demonstrera möjligheterna med materialmodellering för utveckling och forskning inom signaturanpassningsteknik (SAT)" och har omfattat både mikroågsområdet och det optiska (IR) området. Projektets resultat bidrar till effektivare utveckling av signaturegenskaper hos militära plattformar, vilket leder till ökad säkerhet vid militära operationer. Projektet har utvecklat och implementerat ett antal beräkningsmodeller för beräkning av elektromagnetiska och optiska materialegenskaper, tillämpat dessa, och verifierat mot mätningar. I synnerhet har modeller för effektiva materialegenskaper hos kompositerna och spridning mot skrovliga ytor studerats. Projektet har arbetat med att visa hur beräkningar på material, komponent och plattformsnivå kan kopplas till varandra. Projektet har också knutit kontakter med forskare och forskargrupper inom området materialmodellering och publicerat sju rapporter, artiklar och konferensbidrag. Sammantaget har projektmålen uppfyllts och den kompetens som byggts upp kan fungera som en kärna till fortsatt verksamhet inom området modellering av elektromagnetiska och optiska materialegenskaper.</p>		
Nyckelord Material, matematisk modellering, signaturmaterial, signaturanpassning		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 12 s.	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Sensor Technology P.O. Box 1165 SE-581 11 Linköping	Report number, ISRN FOI-R--1520--SE	Report type User report
	Programme Areas 6. Electronic Warfare and deceptive measures	
	Month year December 2004	Project no. E3052
	Subcategories 62 Low Observables	
	Subcategories 2	
Author/s (editor/s) Jan Fagerström Göran Forssell Patrik Hermansson Hans Strifors Niklas Wellander	Project manager Jan Fagerström	
	Approved by Lars Bohman	
	Sponsoring agency FM	
	Scientifically and technically responsible	
Report title (In translation) Final report of the project Mathematical modelling of low signature materials		
Abstract (not more than 200 words) <p>This report summarizes the activities and the results of the project “Mathematical modelling of low signature materials”. The project was carried out within the framework of the strategic research cores at FOI during the years 2002—2004.</p> <p>The scope of the project was to “demonstrate opportunities with mathematical materials modelling for research and development of low signature technology” and included the microwave region as well as the optical (infrared) region. The results of the project contribute to efficient development of low signature properties of military platforms, which in turn leads to increased security of military operations. The project has developed and implemented a number of models for computation of electromagnetic and optical properties of materials, applied these to relevant materials and verified the models using measurements. In particular modelling of effective materials properties of composites and scattering from rough surfaces has been studied. The project has worked on the problem of how to interface computational results at the materials, component and platform levels. The project has also created a network with researchers and research groups in the area of materials modelling, and published 7 reports, articles and conference papers. In summary, the project goals are fulfilled. The knowledge and competence which has been created can be used as a seed for further research and development in the area of mathematical modelling of electromagnetic and optical materials properties.</p>		
Keywords Materials, mathematical modelling, low signatur materials, low signature management		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 12 p.	
	Price acc. to pricelist	

1 Bakgrund

FOI har sedan länge bedrivit forskning inom området signaturanpassning. På Avdelningen för Sensorteknik omfattar forskningen framförallt radarsignaturer och optiska signaturer i det synliga och infrarödområdet (IR). Några exempel är värdering av signaturegenskaper hos olika plattformar, mätningar och beräkningar av radarmålarea och IR-signaturer för plattformar och olika bakgrunder, samt utveckling, mätning och analys av material och materialstrukturer med goda signaturegenskaper.

Projektet ”Modellering av signaturmaterial” (MSM) startade 2002 för att bygga upp kompetens om hur teoretiska modeller och beräkningsteknik kan utnyttjas för att beräkna elektromagnetiska och optiska materialegenskaper hos signaturmaterial. Fram till 2002 användes beräkningsmetoder för signaturmaterial enbart för att studera materialkomponenter som t ex radarabsorberande strukturer och multilagerstrukturer i optiska området. För att effektivt kunna analysera signaturegenskaper är det dock avgörande att också kunna beräkna elektromagnetiska och optiska egenskaper på materialnivå, dvs för de material som ingår i olika komponenter. Projektet MSM, som avslutas 2004, har varit ett första steg för att bygga upp denna kunskap inom FOI. Projektet har studerat både radarområdet och det optiska området. Totalt har projektet omfattat 33 personmånaders arbete under 2002—2004. I denna rapport sammanfattar vi projektets verksamhet och ger en *mycket kortfattad diskussion om projektets forskningsresultat*. För en utförlig presentation av de forskningsresultat som tagits fram inom MSM hänvisar vi till publikationerna som presenteras i sektion 3.4, eller till direkt kontakt med de enskilda författarna.



Figur 1. Signaturegenskaper kan studeras på flera nivåer. De olika nivåerna använder olika beräkningsmodeller och storheter för att beskriva signaturegenskaperna men är beroende av varandra. Projektet MSM har fokuserat på att modellera signaturegenskaper på materialnivån.

Projektets verksamhet kan placeras in i ett sammanhang enligt Figur 1. Figuren illustrerar att signaturegenskaper kan beskrivas på flera nivåer. För att beskriva signaturegenskaperna på

de olika nivåerna använder man olika beräkningsmodeller och storheter. De olika nivåerna är dock beroende av varandra. Det är därför viktigt att placera in signaturegenskaper i det sammanhang som illustreras av Figur 1.

Projektet MSM har fokuserat på modellering av signaturegenskaper för material och delvis för komponenter. På materialnivån beskrivs signaturen av optiska och elektromagnetiska materialegenskaper som permittivitet eller brytningsindex, permeabilitet och heterogenitet. På komponentnivån är det t ex reflektivitet, absorption och emissivitet, och på plattformsnivån radarmålarea, kontrast och upplösning som beskriver signaturegenskaperna. Eftersom de olika nivåerna påverkar varandra kommer t ex radarmålarean eller optiska kontrasten för en plattform att delvis bestämmas av permittiviteten och brytningsindex hos de material som används. Projektet MSM har inte fokuserat på hela kedjan från material till plattform. Under arbetets gång har vi dock tagit viss hänsyn till möjligheten att kunna föra över och använda data mellan de olika nivåerna. Detta för att t ex kunna analysera hur materialegenskaperna inverkar på plattformsegenskaperna. Modellering av signaturegenskaper på plattformsnivå studeras sedan tidigare inom andra projekt på FOI.

2 Projektets mål och nytta

För att undgå eller minska risken för upptäckt av en plattform genom radarsensorer och optiska sensorer är det viktigt att plattformen har en god signatur i radarområdet och optiska området. Eftersom nya sensorer och upptäcktsmetoder ständigt utvecklas, och omgivningen varierar så är det viktigt att ständigt arbeta med signaturegenskaperna hos plattformen. Signaturegenskaperna måste vara anpassade till de aktuella hotsensorerna och till den aktuella omgivningen. Inför nya militära uppdrag och operationer, vid nyutveckling och modifiering av militära plattformar är det en stor fördel om signaturegenskaperna kan analyseras i förhållande till de hotsensorer och omgivningar som kan förväntas. Sådan analys av signaturegenskaper kan utföras med hjälp av beräkningsmodeller. Tillgång till beräkningsmodeller ger en stor fördel i detta sammanhang, eftersom de kompletterar och ibland ersätter resurskrävande mätningar. Att arbeta med beräkningsmodeller är vanligtvis också tidseffektivt och billigt. Kort sagt: Modellering av signaturegenskaper medger effektiv analys och utveckling av goda signaturer hos plattformar, vilket i sin tur medför ökad säkerhet i militära operationer.

Under projektarbetet i MSM har vårt övergripande mål varit att ”demonstrera möjligheterna med materialmodellering för utveckling och forskning inom signaturanpassningsteknik (SAT)”. Projektet har utvecklat och använt beräkningsmodeller för att ge svar på frågeställningar av typen: Hur påverkar materialets sammansättning och struktur signaturegenskaperna? Hur ska materialet förändras för att förbättra signaturegenskaperna? En långsiktig vision har varit att utifrån önskade specifikationer utforma lämpliga signaturmaterial med hjälp av beräkningar.

Mera konkret har projektets mål varit:

1. Att ta fram ett urval av beräkningsmodeller för analys av viktiga signaturmaterial i optiska och radarområdet, samt att implementera dessa som datorprogram.
2. Att bygga upp ett kontaktnät med andra projekt inom FOI, externa forskargrupper, samt avnämare, för kompetensuppbyggnad och samarbeten.
3. Att visa på de möjligheter som finns att koppla flera nivåer av modellering till varandra, t ex modellering på material-, komponent-, och plattformsnivå.

Nyttan med projektets arbete är (i) att kunskap byggts upp om de möjligheter som erbjuds av att studera signaturmaterial med hjälp av beräkningsmodeller, samt (ii) att tillgång till några konkreta modeller för detta skapats. Denna forskning skapar alltså tillgång till kunskap och verktyg för att utveckla och analysera signaturmaterial med hjälp av beräkningar. Som diskuterats ovan, leder detta till *snabb, effektiv och billig analys och utveckling av signaturegenskaper, vilket är avgörande för säkerheten i militära operationer.*

3 Verksamhet och resultat

Vi har gett detaljerade presentationer av projektets resultat i rapporter, konferensbidrag och postrar (se nedan). Vi har också presenterat verksamheten i projektet vid många interna och externa projektredovisningar, kundpresentationer och för besökare vid FOI. Nedan följer en kortfattad redogörelse för den verksamhet och de resultat som uppnåtts under 2002-01-01—2004-11-30.

3.1 Forskningsverksamhet

Följande forskningsaktiviteter har genomförts inom projektet. En schematisk beskrivning av hur aktiviteterna fördelats över åren återfinns i Figur 2. Projektdeltagarna har:

1. Litteraturstuderat modeller och metoder för beräkning av optisk spridning mot heterogena (skrovliga) ytor. Litteraturstudierna har varit inriktade på modeller för beräkning av så kallade "Bidirectional Reflectivity Distribution Functions" (BRDF) som bestämmer materialytornas optiska emissivitet och därmed deras signaturegenskaper i IR-området. För rapport se punkt 32 nedan.
2. Implementerat två olika spridningmodeller för IR-området: "Integral Equation Method" (IEM) och "Small Slope Approximation" (SSA) samt tillämpat dessa för ett antal material med varierande materialegenskaper och heterogenitet. Arbetet har till viss del skett i samverkan med projektet "Radarmål i bakgrund".
3. Arbetat med metoder för att föra över BRDF-data till existerande simuleringsprogram för IR-signaturer av plattformar i bakgrund.
4. Arbetat med demonstration av hur beräknade materialdata i IR-området kan användas för signaturanalys i simuleringsprogram för plattformar i bakgrund. För rapport se punkt 34 nedan.
5. Utrett möjligheterna att mäta optiska materialegenskaper för lågsignaturfärger med hjälp av ellipsometri.
6. Utvecklat en metod att beräkna IR-egenskaper inklusive polarisation för en heterogen yta med sfäriska partiklar. Metoden har använts för att analysera ett potentiellt signaturmaterial för IR-området baserat på så kallade ceno-sfärer. Beräkningarna har jämförts med mätningar som genomförts inom projektet Styrbara Signaturmaterial. För rapport se punkt 33 nedan.
7. Litteraturstuderat modeller och metoder för beräkning av effektiva elektromagnetiska egenskaper hos heterogena material, främst radarabsorberande kompositer. Litteraturstudierna har främst varit inriktade på så kallade effektiv medium-modeller och blandningsformler. För rapport se punkt 31 nedan.
8. Implementerat ett stort antal effektiv medium-modeller och blandningsformler i mjukvara samt tillämpat dessa både för radarabsorberande och förlustfria kompositer. Studerat olika fenomen, exempelvis hur materialkomponenternas (partiklarnas) geometri och struktur inverkar på kompositernas elektromagnetiska egenskaperna. Vi har också beräknat signaturegenskaper i radarområdet för hela kedjan av material, komponent och (generisk) plattform (sfär).
9. Arbetat med demonstration av hur beräknade materialdata i mikrovågsområdet kan användas i beräkning av radarmålarea för generisk plattform.

10. Utvecklat en metod för tillverkning och karakterisering av kompositer, tillsammans med projekten ”Avancerade radarabsorbenter” (2003) och ”Styrbara signaturmaterial” (2004). Tillverkat och mätt elektromagnetiska egenskaper i mikrovågsområdet för flera serier av kompositer. Resultaten från detta arbete har vi använt för verifiering av effektiv medium-modeller. För rapport se punkt 36 nedan.
11. Utrett den teori och metod som används för att beräkna materialegenskaper i mikrovågsområdet utifrån reflektions- och transmissionsmätningar med nätverksanalysator.
12. Litteraturstuderat optimeringsalgoritmer för optimering av radarabsorberande komponenter. Arbetet har främst varit inriktat på optimering av radarabsorberande multilagerstrukturer med hjälp av så kallad ”Differential evolution”.
13. Implementerat och tillämpat ”Differential evolution” (i kombination med effektiv medium-modeller) för att optimera radarabsorberande komponenter. För rapport se punkt 36 nedan.
14. Bidragit till arbete med att utveckla metoder för matematisk homogenisering. Arbetet har fokuserat på metoder för att beräkna effektiva elektromagnetiska egenskaper hos periodiska kompositmaterial. För rapport se punkterna 35 och 37 nedan.
15. Studerat och implementerat en metod för att beräkna elektromagnetisk spridning mot generiska metalliska objekt med ytskikt av andra material. Metoden bygger på så kallade impedansrandvillkor och är ett sätt att analysera hur signaturmaterialens egenskaper påverkar signaturegenskaperna för en generisk plattform.

Aktivitet	2002				2003				2004			
	Kv 1	Kv 2	Kv 3	Kv 4	Kv 1	Kv 2	Kv 3	Kv 4	Kv 1	Kv 2	Kv 3	Kv 4
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												
12												
13												
14												
15												

Figur 2. Schematisk beskrivning av hur de olika forskningsverksamheterna inom projektet MSM fördelats över åren.

3.2 Större projektpresentationer

Vi har presenterat projektet vid ett stort antal interna projektdovisningar, för besökare på FOI, vid externa besök, med mera. Nedan följer en lista på de viktigaste presentationerna som genomförts.

16. Temadag signaturanpassningsteknik, Collegium Linköping 2003-03-27 tillsammans med övriga SAT-projekt inom FOI. Mycket god respons från FM, FMV och industri! Vi gav tre presentationer: En allmän presentation av projektet, och två presentationer av arbetet inom mikrovågsområdet respektive IR-området.
17. ”Common European Priority Area” (CEPA)-delegation, FOI Linköping 2003-06-23.
18. Chef DARPA med delegation, FOI Linköping 2003-06-25.
19. Sir Keith O’Nion, Chief Scientific Adviser, Ministry of Defence, UK, med delegation, FOI Linköping 2003-11-06.
20. Projektseminarium, FOI Linköping 2003-11-13.
21. Projektpresentation för FMV, Stockholm 2004-06-03.
22. SAT-symposium, Saab, Linköping 2004-09-14.
23. FOI styrelse, FOI Linköping 2004-10-15.

3.3 Kontakter och besökare

Vi har besökt och bjudit in olika forskningsgrupper och enskilda forskare för att knyta kontakter och öppna upp för samarbeten. Vi har haft stor nytta av flera av dessa kontakter för diskussioner, men vi har inte påbörjat några gemensamma samarbetsprojekt. En viktig orsak till det är att forskningsområdet är nytt för oss och under uppbyggnad.

24. Besök hos Prof. Ari Sihvola *et al.*, Helsingfors tekniska universitet 2002-03-14—15.
25. Prof. Glenn Boreman, University of Central Florida, besökte FOI och MSM sommaren 2002.
26. Prof. James E. Harvey, University of Central Florida, besökte MSM 2002-10-23.
27. Prof. Lars Matsson, KTH besökte MSM 2003-03-20.
28. Prof. Gerhard Kristensson, Lunds Tekniska Högskola, besökte MSM 2003-09-25.
29. Prof. Gunnar Niklasson, Uppsala universitet, besökte MSM 2003-09-26.
30. Besök hos prof. Gerhard Kristensson, Lunds Tekniska Högskola 2004-01-23.

3.4 Publikationer

31. Jan Fagerström, Patrik Hermansson och Göran Forssell, *Modellering av signaturgenskaper hos kompositmaterial med hjälp av blandningsformler*, FOI rapport FOI-R—0632—SE (2002).
32. Patrik Hermansson, Göran Forssell and Jan Fagerström, *A review of models for scattering from rough surfaces*, FOI rapport FOI-R—0988—SE (2003).
33. Göran Forssell, *Comparison between polarization measurements and model calculations of cenosphere surfaces, with different depolarization properties and different coverage*, Defence and Security (former Aerosense), Orlando, april 2004, i Proceedings of SPIE, “Targets and Backgrounds X: Characterization and Representation”, vol. 5432, April 2004. (I samarbete med projektet Styrbara Signaturmaterial.)
34. Patrik Hermansson, *Models for Scattering of Light from Rough Surfaces with Applications in IR Signature Simulations*, Defence and Security (former Aerosense),

Orlando, april 2004, i Proceedings of SPIE, "Targets and Backgrounds X: Characterization and Representation", vol. 5431, April 2004.

35. Niklas Wellander, *Review of contemporary homogenization methods*, 2004 URSI EMTS, International Symposium on Electromagnetic Theory , Pisa, Italy, May 23-27 2004.
36. Jan Fagerström and Anna Jänis, *Modelling of electromagnetic properties of composites applied to radar absorbers*, Computational Electromagnetics 04 (EMB04), Göteborg, 18—19 October 2004.
37. Daniel Sjöberg, Christian Engström, Gerhard Kristensson, David J. N. Wall, and Niklas Wellander, *A Floquet-Bloch decomposition of Maxwell's equations, applied to homogenization*, accepterad för publicering i SIAM Multiscale modeling and simulation. <http://www.es.lth.se/teorel/Publications/TEAT-7000-series/TEAT-7119.pdf> (I samarbete med Prof. Gerhard Kristenssons grupp vid Lunds Tekniska Högskola.)

3.5 Postrar

38. Jan Fagerström, Göran Forssell and Patrik Hermansson, *Mathematical modelling of signature materials*, Kunddag signaturanpassningsteknik, Linköping, 27 Mars 2003.
39. Jan Fagerström and Anna Jänis, *Modelling of electromagnetic properties of composites applied to radar absorbers*, Computational Electromagnetics 04 (EMB04), Göteborg, 18—19 October 2004.

3.6 Övrigt

40. Lämnat ett projektförslag "*Modellering av signaturmaterial inklusive metamaterial, i ett systemperspektiv*" till FoT (U1 2006) som delvis baseras på projektet "Modellering av signaturmaterial".
41. Deltagit i samverkansgrupp för signaturanpassningsteknik (SAMSAT) där försvarsmakten, FMV och FOI ingår. Första möte hölls på FMV 2004-09-28.

4 Slutsats och fortsatt verksamhet

Vi konstaterar att målen är uppnådda för projektet ”Modellering av signaturmaterial” (MSM). Som diskuterades i avsnitt 2 så bidrar projektet till snabbare, effektivare och billigare analys och utveckling av signaturer och signaturmaterial. Detta är nödvändigt för att ha hög säkerheten i militära operationer eftersom nya sensorer och upptäcktsmetoder ständigt utvecklas och plattformarnas signatur måste anpassas till varierande omgivningar.

Projektet har tagit fram och implementerat ett antal beräkningsmodeller för signaturmaterial i radar- och IR-området, samt implementerat dem som datorprogram. Vi har också byggt upp kontakter med forskargrupper och avnämare. Vi har inte lyckats skapa något konkret bestående samarbetsprojekt. Det beror till stor del på att vi har byggt upp verksamheten från början under projektets gång och därför inte haft någon tradition att falla tillbaka på, eller resultat och metoder att erbjuda i ”utbyte”. En viktig lärdom är att det kan vara svårt att initiera samarbeten med andra utan en egen etablerad verksamhet. Slutligen har vi visat på möjligheter att koppla modelleringsresultat på material-, komponent- och plattformsnivåerna till varandra. Vi har demonstrerat principen med några enkla exempel, utformat metoder för överföring av data, och arbetar i skrivande stund (november 2004) med att demonstrera hur vi kan utvärdera beräkningsresultat på materialnivån genom att använda sådana resultat i beräkningar på plattformsnivån. Vi har konstaterat många gånger under projektet att förmågan att koppla de olika nivåerna till varandra är mycket efterfrågat, både av pedagogiska skäl och för att kunna analysera hur egenskaper på de olika nivåerna påverkar varandra. Detta är ett övergripande delresultat av projektet.

Projektet har finansierats av de strategiska forskningskärnorna inom FOI, och har verkligen också fungerat som en kärna till ny forskningsverksamhet. Genom projektet har vi kunnat bygga upp kompetens, skapa mjukvara, samla väsentlig litteratur och fått erfarenhet av problem och möjligheter för modellering av signaturmaterial. Nu finns en kärna till fortsatt forskning om modellering av elektromagnetiska och optiska materialegenskaper.

När det gäller fortsatt verksamhet kan vi konstatera att internationellt växer forskningen kring elektromagnetiska och optiska material och strukturer kraftigt, se t ex referenserna [1], [2] och [3]. Ofta spelar modellering en avgörande roll i denna utveckling. Många av dessa nya material är mycket intressanta för nya och förbättrade tillämpningar, både militärt och civilt, till exempel inom signaturområdet. Vi har lämnat ett projektförslag till FoT som ansluter till den internationella forskningsutvecklingen. Förslaget bygger delvis på erfarenheterna från projektet MSM. Här finns en möjlighet att fortsätta bygga upp kunskap och verktyg för modellering av elektromagnetiska och optiska materialegenskaper, för att effektivt kunna utveckla och analysera material för militära (och även civila) tillämpningar. För signaturområdet leder detta i slutänden till ökad säkerhet vid militära operationer.

5 Referenser

Publikationer som producerats inom projektet MSM återfinns i avsnitt 3.4.

- [1] A. Serdyukov, I. Semchenko, S. Tretyakov and A. Sihvola, *Electromagnetics of Bi-anisotropic Materials. Theory and Applications*, Gordon and Breach Science Publishers (2001).
- [2] Werner S. Weiglhofer och Akhlesh Lakhtakia (eds.), *Introduction to Complex Mediums for Optics and Electromagnetics*, SPIE Press (2003).
- [3] Akhlesh Lakhtakia (ed.), *Nanometer structures. Theory, Modeling, and Simulation*, SPIE Press (2004).