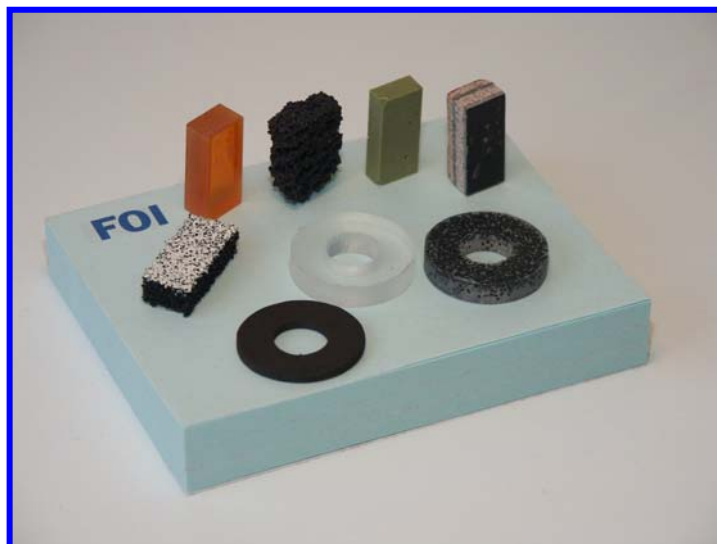


Jan-Olof Ousbäck

PROJEKT AVANCERADE RADARABSORBENTER

SLUTRAPPORT



TOTALFÖRSVARETS FORSKNING SINSTITUT

Sensorteknik

Box 1165

581 11 Linköping

FOI-R-1124--SE

November 2003

ISSN 1650-1942

Användarrapport

Jan-Olof Ousbäck

PROJEKT AVANCERADE RADARABSORBENTER

SLUTRAPPORT

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Sensorteknik Box 1165 581 11 Linköping	Rapportnummer, ISRN FOI-R-1124--SE	Klassificering Användarrapport
	Forskningsområde 6. Telekrig	
	Månad, år November 2003	Projektnummer E3001
	Verksamhetsgren 5. Uppdragsfinansierad verksamhet	
	Delområde 62 Signaturanpassning	
Författare/redaktör Jan-Olof Ousbäck	Projektledare Jan-Olof Ousbäck	
	Godkänd av	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning FM	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig	
Rapportens titel PROJEKT AVANCERADE RADARABSORBENTER, SLUTRAPPORT		
Sammanfattning (högst 200 ord) Rapporten ger en överblick av verksamhet och framkomna resultat inom projekt Avancerade radarabsorbenter under perioden 2001-2003. Målet för projektet har varit att utveckla och karaktärisera material och strukturer för signaturanpassning inom radarområdet av olika plattformar. Projektet har fokuserat på material för högttemperaturlämplingar, bredbandiga absorbenter, nanokompositabsorbenter och absorberande siktrutor. Vidare har mätmetoder för materialkaraktärisering på mikro- och mm-vågsbanden (vågledarmätningar: 0.04-40 GHz och frirymdsmätningar: 2-240 GHz) studerats. Olika material såsom polymerkompositer, nanokompositer och resistiva skikt har mätts och karaktäriserats. Nya optimeringsmetoder (baserade på genetiska algoritmer) för multilagerstrukturer har utvecklats. Bistatiska radarmålteberäkningar på enkla kroppar belagda med absorberande skikt har genomförts och resultaten visar att för bistatiska vinklar större än 120° har radarabsorberande skikt ingen effekt.		
Nyckelord		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 17 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-1124--SE	Report type User report
	Research area code 6. Electronic Warfare	
	Month year November 2003	Project no. E3001
	Customers code 5. Commissioned Research	
	Sub area code 62 Stealth Technology	
Author/s (editor/s) Jan-Olof Ousbäck	Project manager Jan-Olof Ousbäck	
	Approved by	
	Sponsoring agency Swedish Armed Forces	
	Scientifically and technically responsible	
Report title (In translation) PROJECT ADVANCED RADAR ABSORBERS, FINAL REPORT		
Abstract (not more than 200 words) <p>The report presents results and activities obtained in the project Advanced radar absorbers during the years 2001-2003. The goal of the project has been to develop and characterise materials and structures for signature control (low observables), in the microwave region, of vehicles and other platforms of the Swedish Armed Forces. The project has focused on materials for high temperature applications, broadband absorbers, nano-composite absorbers and radar absorbing windows. The project has also focused on measurement techniques for material characterisation on microwave and mm-wave bands (0.04 – 40 GHz for wave-guide measurements and 2 – 240 GHz for free space measurements).</p> <p>Various materials such as polymer composites, nano-composites and resistive sheets has been studied and characterised.</p> <p>New optimisation methods for radar absorbing structures, based on genetic methods, has been develop.</p> <p>Calculation on bistatic radar cross section of simple shaped objects covered with a radar absorbing surface coating has been carried out and the result shows that for bistatic angles larger then 120° the effect of coating is negligible.</p>		
Keywords		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 17 p.	
	Price acc. to pricelist	

INNEHÅLL

SIDA

TACK TILL PROJEKTMEDLEMMAR	5
1. INLEDNING	6
2. BAKGRUND	6
2.1 Projekt ARA	6
3. RESULTAT	7
3.1 Mät- och beräkningsmetoder	7
3.1.1 Mätmetoder för materialkaraktärisering	7
3.1.2 Beräkningsmetoder	8
3.2 Materialkaraktärisering	8
3.3 Nanostrukturella förlustmaterial	9
3.4 Högtemperaturabsorbenter	10
3.5 Lågemissiva RAM	12
3.6 Styrbara RAM	14
3.7 Bistatisk spridning från RAM-belagda kroppar	15
4. SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER	16
5. REFERENSER	17

TACK TILL PROJEKTMEDLEMMAR

Ett stort tack riktas till alla som medverkat i projektet.

Anna Jänis	Materialmätningar och karaktäriseringar
Hans Strifors	Optimerings- och beräkningsmetoder
Steven Savage	Nanokompositer
Lars-Göran Heimdal	Materialtillverkning
Nils Gustafsson	Materialmätningar
Jan Fagerström	Materialmodellering
Hans Kariis	Styrbara material, planering
Siv Ek-Setterberg	Projektadministration

Samt alla andra som på ett eller annat sätt bidragit med idéer, synpunkter och inspiration, ingen nämnd ingen glömd.

1. INLEDNING

Forskning kring radarabsorberande material och strukturer (RAM och RAS) har pågått under mer än ett halvt sekel och det finns idag ett stort antal radarabsorbenter med olika egenskaper för olika tillämpningar. Några sammanfattningar och översikter finns i [1 - 3]. Nya sensorhot och framförallt utvecklingen inom området signaturanpassning (SAT) har dock inneburit att nya krav ställs på RAM och RAS. Även den nya hotbilden i omvärlden med internationella insatser, strid i bebyggelse (SiB) och nätverksbaserade försvar (NBF) innebär behov av nya signaturmaterial. Av dessa skäl påbörjades projekt Avancerade Radarabsorbenter (ARA) år 2001 med en varaktighet på 3 år.

Syftet med projektet var att påbörja arbetet med att utifrån de nya hotscenariorna bygga upp kunskap om de nya möjligheterna som nya material och strukturer kan innebära. Denna slutrapport ger en översikt av arbetet inom projektet och presenterar några viktiga resultat som framkommit, samt ger rekommendationer för fortsatt arbete inom området signaturmaterial.

2. BAKGRUND

Den internationella utvecklingen rörande material är mycket intensiv. Nya materialkomponenter och materialstrukturer med designbara och/eller styrbara egenskaper utvecklas. Sekretessgraden rörande adekvata material för signaturanpassning är mycket hög. Det är därför av vitalt intresse för det svenska försvaret att vidmakthålla och utveckla en hög kompetensnivå inom området, för att rätt kunna bedöma och värdera den internationella utvecklingen. Internationella insatser kommer t. ex. att kräva snabba signaturförändringar, från markerad närvaro med hög signatur (övervakning/observation) till skydd med låg signatur (fientlig bekämpning).

2.1 Projekt ARA

Målet för projektet har varit att genom experimentellt och teoretiskt arbete bygga upp kunskap och förståelse för vilka mekanismer i olika material och materialkombinationer som kan utnyttjas för att utveckla bredbandiga, styrbara och frekvensselektiva material med goda radarsignaturreducerande egenskaper för olika tillämpningar och miljöer. Häri har bl. a. ingått att utveckla nya typer av radarabsorbenter med inriktning mot högttemperaturtillämpningar och bredbandighet, samt radarabsorbenter med goda IR-egenskaper. Detta har också medfört att nya och förbättrade mät- och analysmetoder för material och materialstrukturer utvecklats.

Motiv och förväntad nytta för det svenska försvaret har dels varit att ge förutsättningar till att rätt kunna bedöma och värdera den internationella hotutvecklingen, d. v. s. vilka signaturreducerande materialstrukturer våra sensorsystem kan komma att möta vid internationella insatser, dels att ge adekvat tekniskt vetenskapligt underlag till kravspecifikationer för materialstrukturer på egna plattformar vid nyutveckling och modifiering.

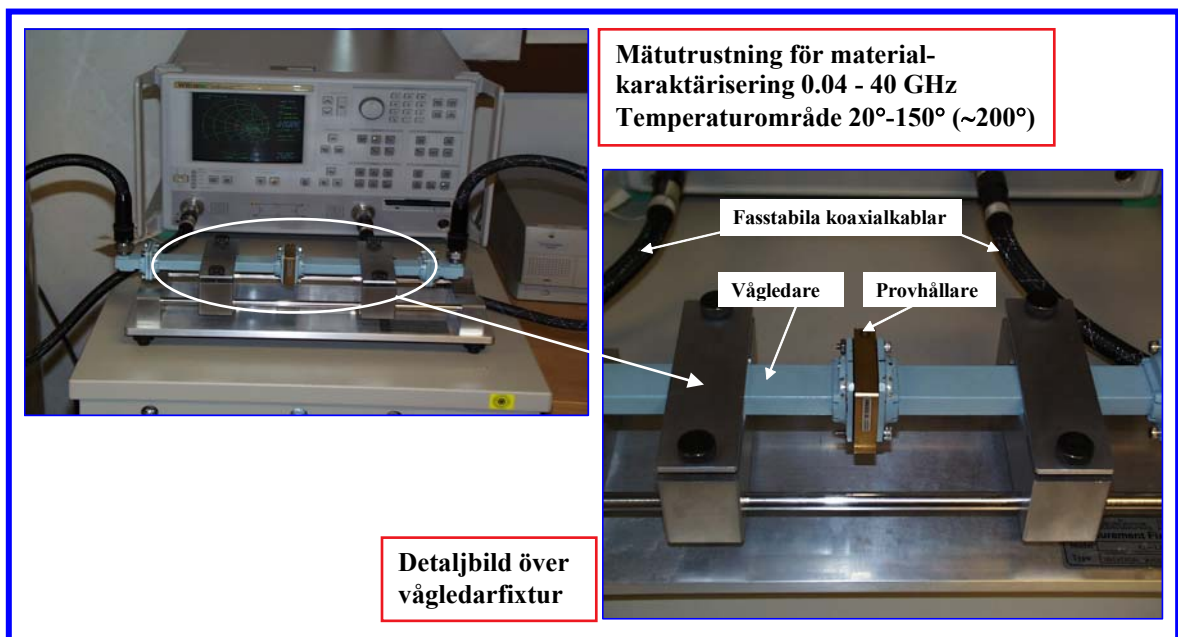
3. RESULTAT

3.1 Mät- och beräkningsmetoder

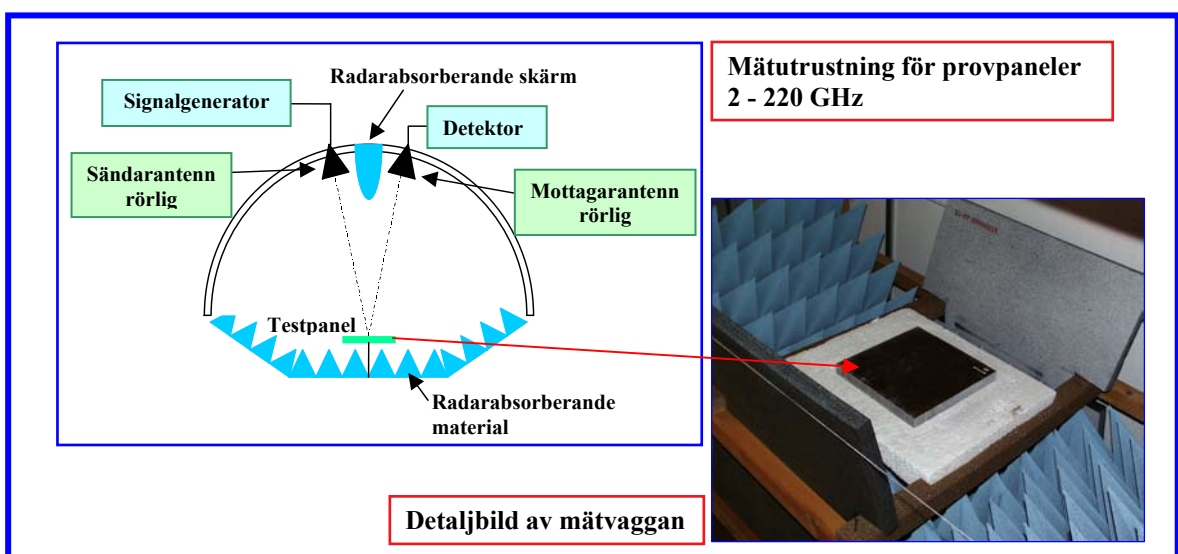
En förutsättning för att kunna utveckla signaturmaterial är att ha relevanta beräknings- och mätmetoder. Under projekt ARA har sådana metoder modifierats och utvecklats. Metoderna har använts inom projektet för att karaktärisera olika typer av material samt för att beräkna reflektions- och transmissionsegenskaper hos olika radarsignaturmaterial.

3.1.1 Mätmetoder för materialkaraktärisering

Två tidigare basala mätutrustningar för materialkaraktärisering har under projektet utvecklats. I figur 3.1 visas utrustningen för bestämning av de elektriska och magnetiska egenskaperna som homogena provkroppar och i figur 3.2 visas utrustningen för mätning av reflektion och transmission på provpaneler.



Figur 3.1 Bild på mätutrustning för materialkaraktärisering



Figur 3.2 Bild på mätutrustning för reflektions- och transmissionsmätningar på provpaneler

3.1.2 Beräkningsmetoder

I samarbete med projekt *Materialmodellering* har metoder för att datormässigt modellera kompositmaterial studerats. Avsikten har varit att modellera ett kompositmaterials elektromagnetiska egenskaper (såsom mikrovågsreflektion och transmission) utifrån ingående materialkomponenter. Traditionellt har detta skett genom experimentella undersökningar där man har tillverkat olika kompositmaterial och uppmätt deras egenskaper. Detta är en tidskrävande och därmed dyr metod. Genom att datormässigt kunna beräkna materialegenskaperna och göra verifieringsmätningar, minskas den experimentella insatsen flera steg och en effektivare materialframställning blir möjlig. Resultat presenteras bl. a. i [4].

Ett annat område som är av stor betydelse är optimeringsmetoder d. v. s. att utifrån givna material med dess elektromagnetiska egenskaper optimera en radarabsorberande struktur. Projektet har studerat en optimeringsmetod baserad på nya modeller (besläktade med genetiska metoder). Studien har påvisat att denna metod är betydligt bättre än de tidigare metoderna som byggde på analogimetoder för mikrovågskretsar och som ofta resulterar i suboptimeringar.

3.2 Materialkaraktärisering

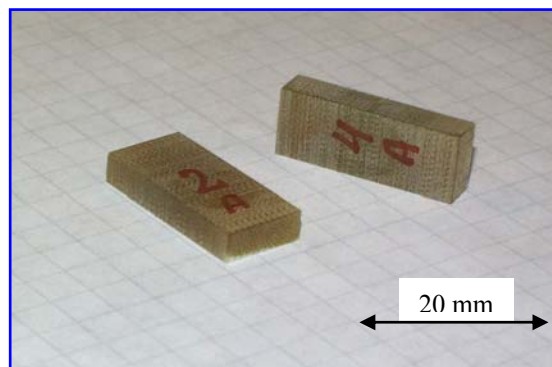
För att utveckla radarabsorberande strukturer är det av vitalt intresse att karaktärisera olika typer av relevanta material för att bestämma deras elektromagnetiska egenskaper. De två fundamentala egenskaperna är de elektriska egenskaperna (relativ permittivitet ϵ_r):

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \epsilon_r' + j\epsilon_r''$$

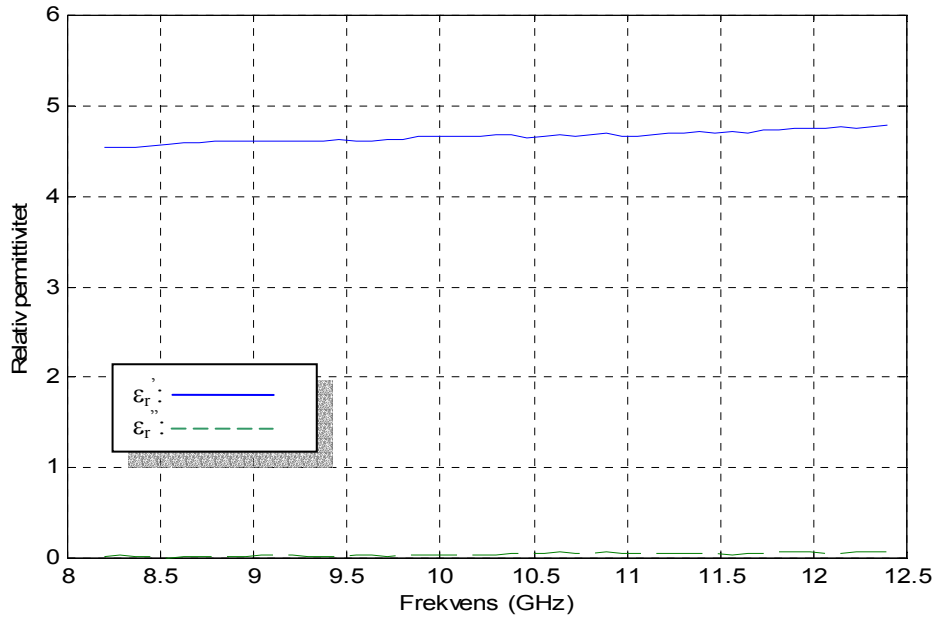
och de magnetiska egenskaperna (relativ permeabilitet μ_r):

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = \mu_r' + j\mu_r''$$

Under projektets gång har ett stort antal olika materials elektromagnetiska egenskaper uppmätts [5-6]. Syftet har varit att bygga upp ett materialbibliotek som kan användas vid utveckling av nya RAM och RAS. I figur 3.3 visas exempel på provkroppar av glasfiberlaminerad epoxy som har karaktäriserats och i figur 3.4 ett typiskt exempel på relativ permittivitet för sådana material.



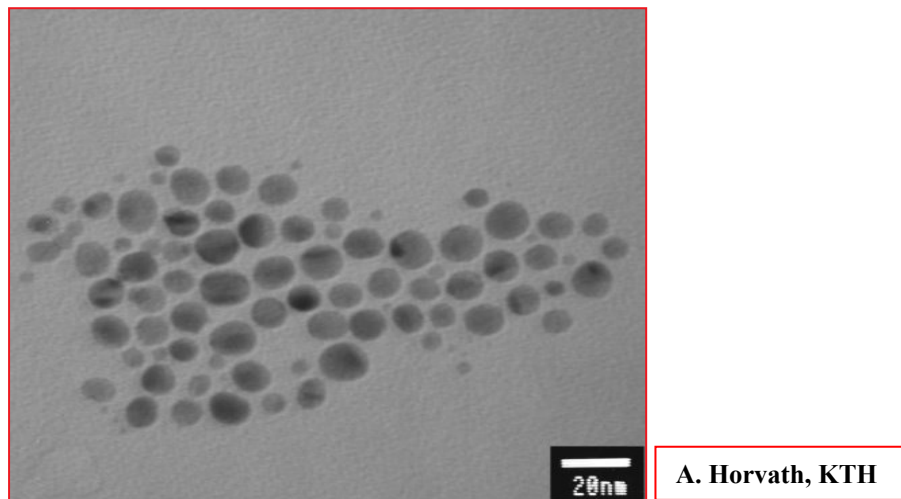
Figur 3.3 Exempel på provkroppar för materialkaraktärisering



Figur 3.4 Relativ permittivitet för en typisk glasfiberarmerad polymerkomposit

3.3 Nanostrukturella förlustmaterial

I samarbete med projekt *Nanokompositer* och KTH har studier rörande nanostrukturella material avsedda som förlustmaterial i radarabsorberande strukturer genomförts. Studien har haft som syfte att syntetisera några olika typer av nanostrukturella material med magnetiska förlustegenskaper och att med ett lämpligt matrismaterial skapa en radarabsorberande nanokomposit. I figur 3.5 visas exempel på ett nanostrukturellt material som har framställts (CoFe_3O_4). Materialet har en kornstorlek på ca 20 nm.



Figur 3.5 TEM-bild (Transmission Electron Micrograph) av CoFe_3O_4 nanopartiklar

Som matrismaterial har olika typer av polymermaterial testats. Även metoder för deponering av förlustmaterialet i matrisen har studerats.

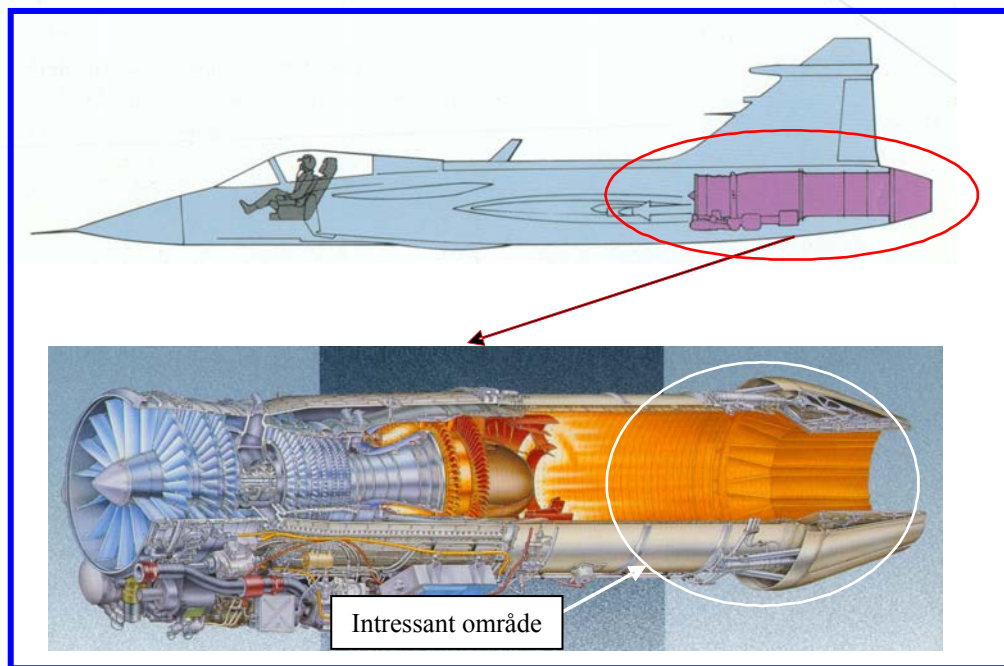
Nanostrukturella material som förlustmaterial i radarabsorbenter kommer troligen att få en allt större betydelse. Skälet till detta är bl. a. :

- Nya materialegenskaper
- Förbättrade hållfasthetsegenskaper

Fortsatt samarbete med KTH är planerat till och med bå 2006.

3.4 Högtemperaturmaterial

Dagens moderna plattformar är utrustade med mer eller mindre SAT-åtgärder för att reducera deras radarmålyta. I första hand läggs vikt vid geometrisk utformning så att infallande radarstrålning reflekteras bort i ofarliga riktningar. Det finns emellertid strukturer som inte kan åtgärdas med formgivning på grund av dess funktionalitet. Exempel på detta är olika typer av motor- och ventilationsutlopp på flygplan, robotar, fartyg och landbaserade fordon. Här måste SAT-åtgärder med signaturmaterial användas. Dagens tillgängliga SAT-material har ett typiskt temperaturområde om $-50 - 150^{\circ}\text{C}$. Inom detta temperaturområde kan konventionella polymerbaserade kompositmaterial användas. Typiska motor- och ventilationsutlopp har dock ett temperaturområde som vida överstiger detta. Temperaturer från 100°C till över 1000°C är vanliga för dessa tillämpningar. Som exempel kan motorutblås från flygplan nämnas där temperaturer mellan 600°C och 1000°C förekommer. Se figur 3.6.



Volvo RM12 Volvo Aero Corporation

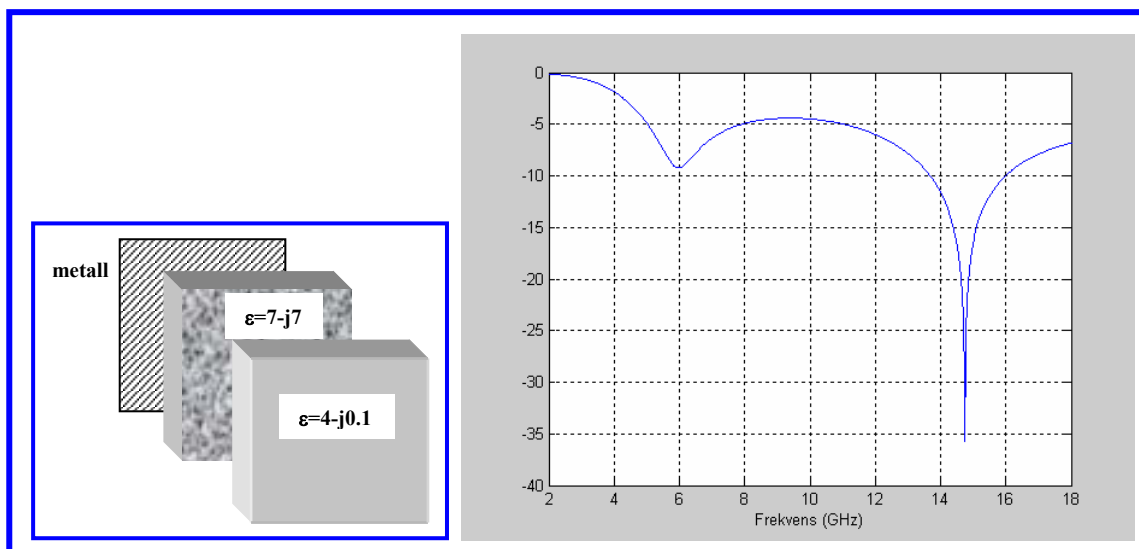
Figur 3.6 Exempel på en högtemperaturapplikation för RAM

Matrismaterial eller bärarmaterial är ett material som har som funktion att mekaniskt innesluta det elektromagnetiska förlustmaterialet som svarar för SAT-egenskaperna. Konventionella polymerbaserade matrismaterial klarar bara temperaturer upp till ca 200°C . För högre temperaturer krävs andra material. Olika typer av keramiska material klarar oftast mycket höga temperaturer, typiskt $> 1000^{\circ}\text{C}$.

Konventionella keramiska material har oftast en relativ dielektricitetskonstant på över 8. Detta gör att effektiva radarabsorbenter är svåra att basera på sådana matrismaterial. Ett material som marknadsförs under namnet ”Blackglass” har dock visat sig ha lägre relativ dielektricitetskonstant typiskt ca 4.

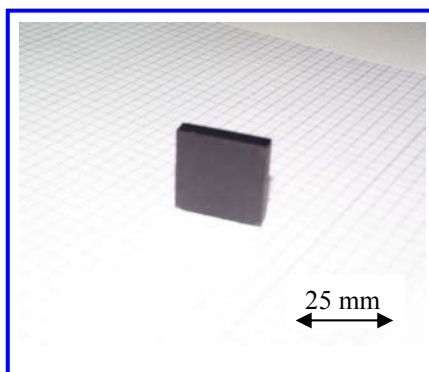
Som ett exempel på en radarabsorbent med detta material visas i figur 3.7 en radarabsorberande struktur och dess reflektionsegenskaper.

Det bör nämnas att strukturen inte är optimerad. Arbetet inom projektet pågår för att utveckla optimeringsmetoder baserade på genetiska optimeringsmetoder. Dessa kommer i det vidare arbetet att användas för att utveckla förbättrade radarabsorberande strukturer.



Figur 3.7 Schematisk bild över en högtemperaturabsorbent

Ferritpulver som sintras till ett kompakt material kan även användas som radarabsorberande material. Absorptionen bygger på magnetiska förluster så relativt tunna absorbenter är möjliga att göra (typiskt några mm tjocka). I figur 3.8 visas en bild på ett sådant material som tidigare är tillverkat på FOI.



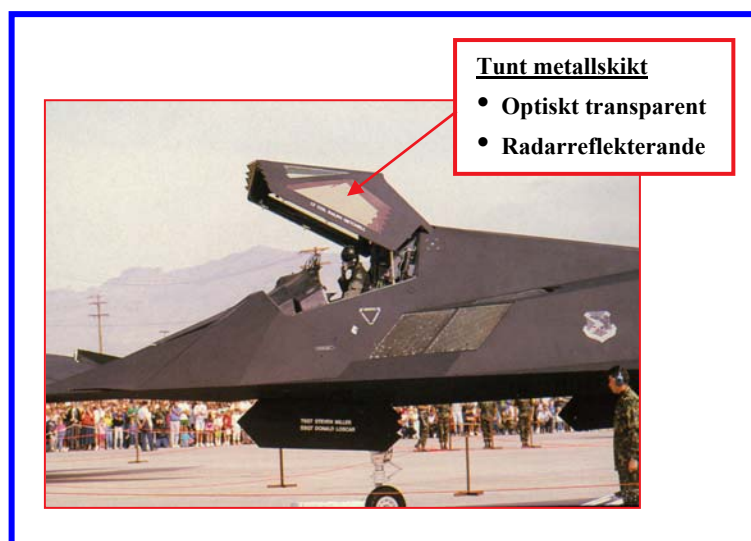
Figur 3.8 Ferritbaserat radarabsorberande material

Vissa av dessa material har även absorptionsförmåga vid låga frekvenser (~ 50 MHz) och används bl. a. i mätthallar för radiofrekventa mätningar. Ferritmaterialen tål relativt höga temperaturer, men då förlusterna beror på materialets magnetiska egenskaper får temperaturen ej överstiga den s.k. Currie-punkten, då de magnetiska förlusterna försvinner. Detta sker ofta vid en temperatur på ca 600-700 °C. Ferritmaterial är mycket kompakta och har därför en relativt hög vikt, vilket kan vara en nackdel i flygtillämpningar.

Inom det nationella nanoteknikprogrammet kommer forskning kring högttemperatur-absorbenter att föras vidare.

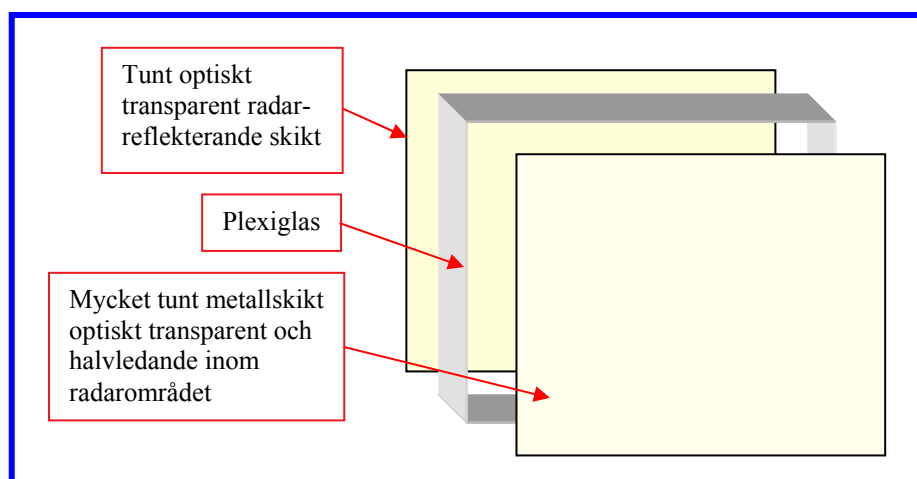
3.5 Lågmissiva RAM

Traditionellt har det funnits en konflikt mellan radarabsorberande material och IR-reducerande skikt. De förstnämnda består oftast av någon typ av plastkompositer som lätt värms upp av solbestrålning och därmed får en ökad IR-signatur, medan de sistnämnda ofta har någon typ av metallpigment för att få ett ledande skikt vilket ödelägger de radarabsorberande egenskaperna. Projektet har gjort en inledande studie rörande en radarabsorberande siktruta som även skall vara lågmissiv. Dagens siktrutor beläggs ofta med ett tunt metallskikt som är optiskt transparent men ledande inom IR- och radarbanden och därmed reflekterande. Se figur 3.9.



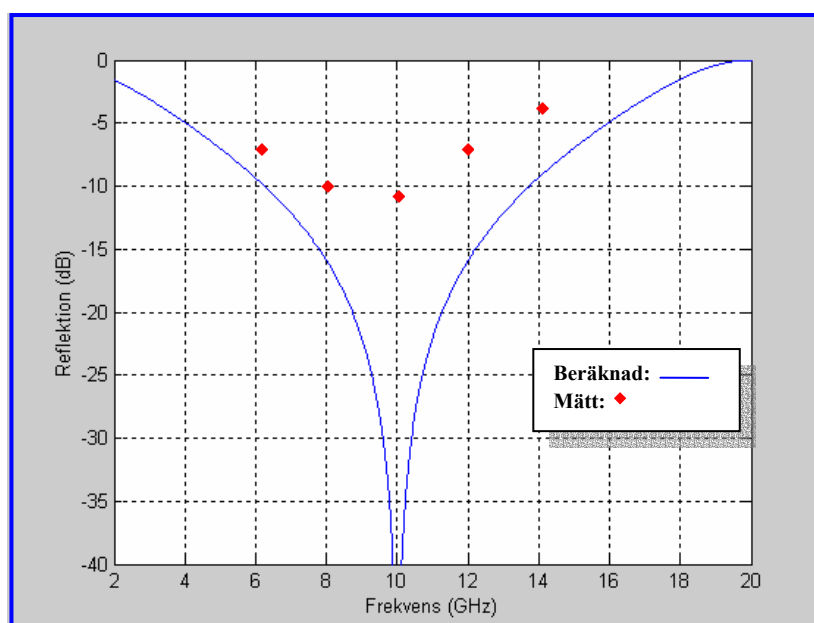
Figur 3.9 Exempel på en radar- och IR-reflekterande siktruta

Ett exempel på hur en lågmissiv radarabsorberande siktruta skulle kunna vara uppbyggd visas i figur 3.10. Siktrutan består exempelvis av plexiglas som på insidan är belagd med ett tunt metallskikt som är radar- och IR-reflekterande, men optiskt transparent. (Samma typ som dagens rutor är belagda med). På utsidan finns ett mycket tunt metallskikt som är reflekterande inom IR-området men endast halvledande inom radarområdet.



Figur 3.10 Exempel på en radar- och IR-reflekterande siktruta

Man får då en radarrefleterande struktur som brukar benämnas Salisbury-screen och som bl. a. finns beskriven i [3]. I figur 3.11 visas ett beräkningsexempel på en struktur enligt figur 3.10 samt några mätvärden på en liknande struktur.



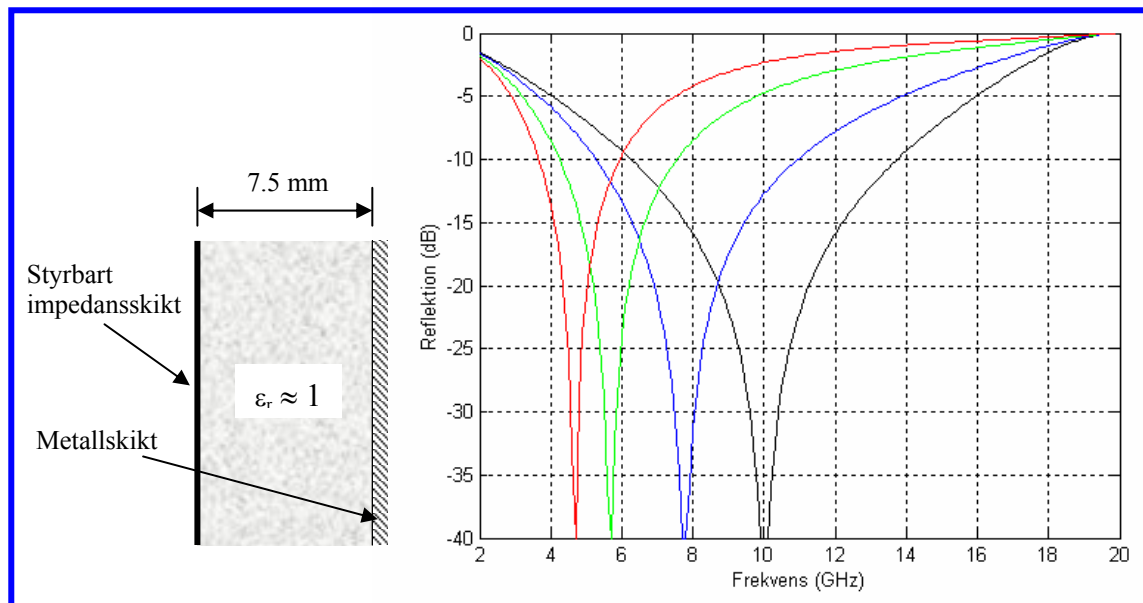
Figur 3.11 Reflektion hos en absorberande siktruta enligt figur 3.10

Studien visar att metoden har förutsättningar att fungera, men den bör studeras ytterligare, främst vad gäller applicering av tillräckligt tunna metallskikt samt utveckling av skyddsbeläggning av utsidans metallskikt för att förhindra erosion.

3.6 Styrbara RAM

Under senare år har tecken kommit på att möjligheter att utveckla styrbara RAM studeras på vissa håll internationellt. Inom projekt ARA har en liten förstudie genomförts avseende möjligheter att utveckla en styrbar radarabsorbent baserat på tunna förlustskikt av ledande polymerer.

I figur 3.12 visas en radarabsorberande struktur och dess reflekterande egenskaper.



Figur 3.12 Exempel på en tänkbar elektriskt styrbar radarabsorbent

Strukturen består av ett tunt impedansskikt vars aktiva beståndsdel är ledande polymerer. Skiktets impedans består av en reell del (R_{yt}) och en imaginär del X :

$$Z = R_{yt} + jX$$

R_{yt} bestämmer skiktets resistiva egenskaper och X dess fasvridande egenskaper. Om det är möjligt att påverka skiktets fasvridande egenskaper är det möjligt att förflytta strukturens reflektionsminima i frekvensledd. I diagrammet ovan visas reflektionen för 4 olika värden på skiktets fasvridning. Exemplet har publicerats i [7].

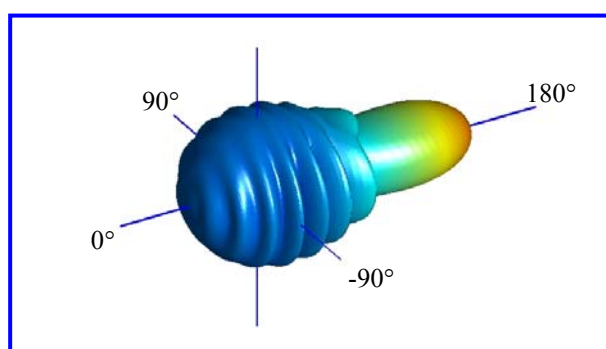
Även om ovanstående struktur är smalbandig är det möjligt att skapa en adaptiv radarabsorberande struktur genom att med en sensor registrera vilken hotfrekvens man är belyst med och justera radarreflektionen hos strukturen till ett minima.

Fortsatt arbete med styrbarhet kommer att bedrivas inom ett nytt projekt, *Styrbara material*, Med början på 2004.

3.7 Bistatisk spridning från RAM-belagda kroppar

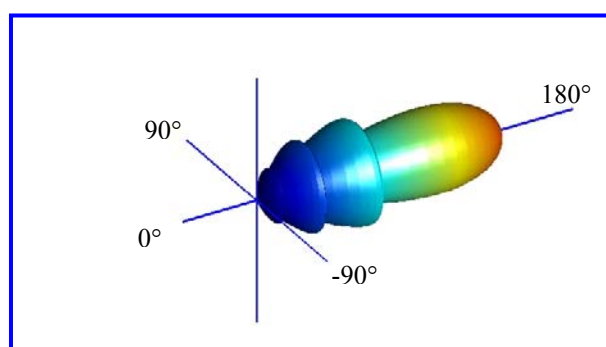
Bistatiska radarsystem har länge ansetts som ett medel att upptäcka signaturanpassade farkoster, men effektiva system har saknats. Under senare år har även passiva system, där man utnyttjar befintliga sändare i form av TV/Radio- eller mobiltelefonisändare och utför avancerad signalbehandling, studerats.

För att klargöra en RAM-belagd kropps bistatiska målyta har projektet genomfört en studie där sfärer och cylindrar har studerats [8]. Exempel på resultat visas i figur 3.13 och 3.14. I figur 3.13 visas den totala radarmålytan hos en perfekt ledande sfär. Sfären belyses av en sändare placerad vid 0° . Om mottagaren också befinner sig vid 0° fås den monostatiska målytan. För en ledande sfär är den bistatiska målytan relativt hög. Om sändaren nu förflyttas mot 180° ökar målytan drastiskt. (Vid 180° befinner sig sfären på siktlinjen mellan sändare och mottagare).



Figur 3.13 Total spridning kring en perfekt ledande sfär

I figur 3.14 visas samma fall men med en sfär belagd med ett effektivt RAM. Ur figuren framgår att den monostatiska målytan nu sjunker drastiskt medan målytan då den bistatiska vinkeln närmar sig 180° inte påverkas nämnvärt.



Figur 3.14 Total spridning kring en sfär belagd med ett effektivt radarabsorberande skikt

Studien har alltså visat att RAM-beläggning av farkoster är effektivt för bistatiska vinklar upp till ca 120° , medan för större bistatiska vinklar är RAM-beläggning verkningslös.

4. SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER

Denna slutrapport har översiktligt presenterat verksamheten och några resultat som framkommit inom projekt Avancerade radarabsorbenter under åren 2001-2003. Forskningen har varit inriktad på delvis nya typer av material såsom nanostrukturella förlustmaterial och nya materialstrukturer, samt hur sådana skall kunna modelleras, optimeras och karaktäriseras.

Projektet har pekat på några betydelsefulla framtida forskningstillämpningar, såsom radarabsorberande siktrutor, lågemissiva RAM och styrbara signaturmaterial.

Den förändrade inriktningen för det svenska försvaret kommer att innebära nya krav på signaturmaterial med fokus på styrbarhet, nya miljöer och NBF.

Den framtida forskningen bör därför främst inriktas mot signaturmaterial med styrbara egenskaper. Detta innebär dock att en tidshorisont på ca 6-10 år kan förutses för dessa material.

Det är emellertid viktigt att bibehålla kompetens även om icke styrbara material, för att rätt kunna värdera den internationella hotbilden inom detta område. Den internationella materialforskningen är idag mycket intensiv och det är viktigt att inte missa viktiga framsteg exempelvis på extremt bredbandiga material.

5. REFERENSER

- [1] W. H. Emerson, "Electromagnetic Wave Absorbers and Anechoic Chambers Through the Years", IEEE Trans. on AP, Vol 21, No 4, July 1973.
- [2] P.O. Olsson, "Radarabsorberande material, en översikt", FOA-R--95-00000-2.4--SE, December 1995, ISSN 1104-9154.
- [3] J-O. Ousbäck, F. Larsson, "Radarabsorberande material, en översikt", FOA-R--00-01543-615--SE, December 2000, ISSN 1104-9154.
- [4] J. Fagerström, P. Hermansson, G. Forsell, "Modellering av signaturegenskaper hos kompositmaterial med hjälp av blandningsformler", FOI-R--0632--SE, Oktober 2002, ISSN 1650-1942.
- [5] J-O. Ousbäck, A. Jänis et.al., "Materialkaraktärisering av fiberarmerade laminat", (under utgivning)
- [6] J-O Ousbäck, "Materialkaraktärisering av polymerbaserade förlustskikt", (under utgivning)
- [7] O. Dickman, F. Larsson, K. Lindersson, J.O. Ousbäck, L. D. Wernlund, "Styrbara material: Ledande polymerer i radarabsorberande kompositer", FOA-R--96-00231-2.4--SE, Februari 1996, ISSN 1104-9154.
- [8] H. C. Strifors, G. C Gaunaurd, "Scattering of electromagnetic Waves by a perfectly conducting cylinder with a thin lossy magnetic coating", IEEE trans. On antennas and propagation, vol 48, no. 10, Oct 2000