

S.J. Savage, H. Kariis, C. Åkerlind, T. Hallberg

Signaturmaterial 2014-16

Slutrapport

Titel	Signaturmaterial 2014-16: Slutrapport
Title	Signature management 2014-16: Final report
Rapportnr/Report no	
Månad/Month	Dec
Utgivningsår/Year	2016
Antal sidor/Pages	29 p
ISSN	1650-1942
Kund/Customer	FM
Forskningsområde	7. Sensorer och signaturanpassning
FoT-område	Sensorer och signaturanpassning
Projektnr/Project no	E72612, AF.9220416
Godkänd av/Approved by	Christian Jönsson
Ansvarig avdelning	LS

Omslagsbilder, samtliga © FOI:

Låg signatur mot bakgrunden - det hade FOI trailern som används vid mätkampanjer när den placerades bakom Linköpings universitet i samband med en demonstration.

Strukturerade färger - det är vanligt i naturen och är det som ger påfågelfjädrar och också många fjärilar och skalbaggar deras kulör. Strukturer interagerar med ljusets och ger interferens.

Kamouflagemönster finns många varianter – här på en privat samling av uniformer som visades vid en konferens.

Under ytan kan mycket döljas men en del också uppenbaras. Kanske hämtas inspiration till framtidens adaptiva kamouflage från den marina världen och bläckfiskar?

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk, vilket bl.a. innebär att citering är tillåten i enlighet med vad som anges i 22 § i nämnd lag. För att använda verket på ett sätt som inte medges direkt av svensk lag krävs särskild överenskommelse.

This work is protected by the Swedish Act on Copyright in Literary and Artistic Works (1960:729). Citation is permitted in accordance with article 22 in said act. Any form of use that goes beyond what is permitted by Swedish copyright law, requires the written permission of FOI.

Sammanfattning

Under tre år har projektet ”signaturmaterial” för Försvarsmaktens räkning bevakat den internationella och nationella utvecklingen, militärt och civilt, inom material och metoder för signaturanpassning. Arbetet har även inkluderat mätning och värdering av signaturanpassning med såväl experimentella som simuleringsbaserade metoder.

Ett flertal framsteg inom civil materialvetenskap tros få betydelse för militär signaturanpassningsteknik i framtiden, såsom funktionella textilier, fotonkristaller och biomimetiska material. Utvecklingen inom sensorteknik, såväl nya och bättre sensortekniker som avancerade bildbehandlingsalgoritmer, ökar hotnivån och ställer nya krav på signaturanpassning.

I rapporten listas områden där bevakningen bör intensifieras i framtiden och ges rekommendationer till fortsatt arbete. Vid internationella kontakter har konstaterats att områdets prioritet är ökande hos flera av de tunga aktörerna.

Nyckelord: signaturanpassning, kamuflage, civila trender, materialteknik, slutrapport

Summary

The “Signature Materials” project has during 2014-16 monitored international and national, military and civilian developments in the fields of materials and technologies for signature management for the Swedish Armed Forces. The project has included measurements and evaluation of signature management using empirical and simulation methods.

Several civilian advances in the field of materials science and technology are important for future signature management technologies, such as functional textiles, photonic crystals and biomimetic materials.

Developments in sensor technology, including both new and improved sensor technologies such as advanced imaging algorithms contribute to raising the threat level and make new demands on signature management.

This report lists areas where future technology monitoring should be intensified, and gives recommendations for further research.

Through international contacts it is clear that several leading nations are raising the priority of signature management.

Keywords: signature management, camouflage, civil trends, material technology, final report

Innehållsförteckning

1	Inledning	7
1.1	Arbetsätt	7
1.2	Holistisk syn på signaturanpassning	9
2	Internationella aktiviteter	10
2.1	NATO aktiviteter	10
2.2	EDA aktiviteter	10
2.3	Radarabsorberande material	11
3	Optisk materialkaraktisering	12
4	Förändrade signaturkrav drivna av militär utveckling	13
4.1	Material och tekniker	13
4.2	Metod	14
5	FoU-trender med relevans för signaturanpassningsteknik	16
5.1	Statiskt kamouflage	16
5.1.1	Färgämne, pigment	16
5.1.2	Fotoniska kristaller och strukturell färg	16
5.1.3	Radarabsorbenter inkl. hög temperaturabsorbenter	17
5.1.4	Biomimetik	18
5.1.5	Datorstödd materialdesign & materielutvärdering	19
5.1.6	Hydrofobiska och superhydrofobiska beläggningar	20
5.1.7	Textilier	21
5.1.8	Metamaterial	22
5.1.9	Additiv tillverkning och tryckt elektronik	23
5.1.10	Cellulosa	23
5.2	Dynamiskt kamouflage	24
5.2.1	Kromiska material	24
5.2.2	Elektropolymerer	25
5.2.3	Dynamisk emissivitetkontroll	25
5.2.4	Displayteknik	25
6	Diskussion	27
6.1	Hur kan utvecklingen inom adaptiva signaturmaterial användas för att förbättra Försvarmaktens materiel och metoder för signaturanpassning i olika insatsmiljöer?	27
6.2	Vilka åtgärder kan vidtas för att motverka sensorer som utvecklas eller blir mer spridda i tidigare ofarliga våglängdsområden?	27
6.3	Vilken militär nytta kan erhållas med spektralt designade ytor?	27
6.4	Hur kan skydd mot polarisationskänsliga IR-sensorer förbättras?	27
6.5	Kan nya material ge bevarad förmåga till lägre kostnad?	27
7	Slutsatser och rekommendationer	28
8	Referenser	29

1 Inledning

Hotbilden från vapensystem utrustade med avancerade sensorer mot Försvarsmaktens materiel och personal ökar och det ställs därför högre krav på signaturanpassning för att maximera överlevnaden.

Sensorer blir fler, mindre, billigare och presterar bättre. Värdet av små och enkla sensorer som monteras på osofistikerade obemannade flygfarkoster (UAV:er) har nyligen demonstrerats i Ukraina¹. Det är svårt att upptäcka och bekämpa sådana hot och förhindra sensorbäraren att komma nära, och lågflygande plattformar ger jämfört med markbaserade sensorer en ny betraktningssvinkel mot målet. Därför ställs högre krav på signaturanpassningsteknik för att öka överlevnadsförmåga genom att (i) förhindra upptäckt och (ii) fördröja identifiering (iii) försvåra träff med slutfasstyrda vapen.

Denna rapport ger en sammanfattning av viktigaste iakttagelser från åren 2014-2016 som gjorts inom projektet Signaturmaterial, med tyngdpunkten på det senaste året. Rapporten innehåller en kort beskrivning av civila forskningstrender inom material och materialteknik där det finns tydliga möjligheter för militära nytta inom signaturanpassning.

Rapporten beskriver även kort ämnet i ett holistiskt sammanhang, detta för att belysa synergierna som uppstår av en sammanhängande strategi för området.

1.1 Arbetsätt

En viktig uppgift för FoT-projektet Signaturmaterial är att bevaka utvecklingen på området, civilt och militärt, inom och utom landet. Detta har gjorts genom litteraturstudier och möten med ledande forskare på konferenser, workshops och mässor. Genom ett informationsutbytesavtal (annex 61) med Storbritannien har vi möjlighet att få del av resultat från liknande arbete utfört vid dstl. Vid de flesta av de konferenser som projektmedarbetare besökt har vi haft egna presentationer, vilket betydligt underlättar kontaktskapande och informationsinhämtning. Resultat från denna bevakning redovisas i rapporten. Information har bl a inhämtats vid följande arrangemang:

- Soldier systems, Berlin 31 mars - 1 april 2014
- Nordic Military Clothing, Vaxholm 1-3 april 2014
- Saab Barracuda Customer Conference, Västervik, 20-22 maj 2014
- Advanced functional materials, Kolmården 20-21 augusti 2014
- Spie-Remote Sensing & Security and Defence Technologies, Amsterdam 22-25 september 2014
- Soldier Technology, Prag, Tjeckien, 14-15 okt2014
- NATO Future Forces utställning & konferens, Prag, Tjeckien den 16-17 okt2014
- Estonian Swedish workshop on signature technology, Tallinn och Narva 19-20 november 2014
- SETAF Soldier Equipment & Technology Advancement Forum, april 2015, Oslo
- FMV SAT-dag, 7 maj 2015, Stockholm.
- Soldier Technology 2015, 24-25 juni 2015, London, UK.
- EDA Materials CapTech Graphene workshop, 3-4 juni, Linköping,
- SPIE Security & Defence, 21-24 sept. 2015, Toulouse, FR.
- ISIP (International Symposium for Indirect Protection), 19-23 okt. 2015, Bad Reichenhall
- Advances in camouflage science and engineering", 15-16 mars 2016, London

- Advanced Functional Materials, 23-24 augusti 2016, Kolmården
- Living Light, 4-6 maj 2016, San Diego
- FM soldatdag, 28 april 2016, Linköping
- Scenarios for Assessment Methods for Camouflage in Operational Contexts workshop, 7 July 2016, Köln
- Sensorsymposium, FMV, 8 september 2016, Stockholm
- SPIE Security&Defence, September 2016, Edinburgh
- Nordiska doktorandkonferensen, FHS, oktober 2016, Stockholm
- Future Forces Forum, oktober 2016, Prag
- Nordic ellipsometric workshop, November 2016, Linköpings universitet
- Optics and Photonics in Sweden, November 2016, Linköping
- Materials for the future, Chalmers, November 2016, Göteborg

För att även i framtiden vara en attraktiv samarbets- och diskussionspartner är det viktigt att visa upp vår kompetens för det vetenskapliga samfundet. Under 2016 har vi gjort detta genom att bl a publicera följande verk:

- Microwave properties of Al₂O₃/graphene composites at normal and elevated temperatures. Johan Allard, FOI-S--5488--SE
- Modelling of Polarization and Scattering Properties of the Beetle *Cyphochilus insulanus* for Camouflage Applications, Christina Åkerlind, Tomas Hallberg, Stefan Björkert, Sergiy Valyukh, Kenneth Järrendahl, FOI-S--5464--SE, Living Light, La Jolla, San Diego, USA, 2016
- Simplifying BRDF input data for optical signature modelling. Tomas Hallberg, FOI-S--5468--SE, Advances in Camouflage Science and Engineering., London, 2016
- Spectral polarimetric camouflage, Christina Åkerlind, David Bergström, Tomas Hallberg, Sergiy Valyukh, FOI-S--5463--SE, Advances in Camouflage Science and Engineering, London, 2016
- Camouflage in thermal IR - Spectral design, Anna Pohl, Jan Fagerström, Hans Kariis, Roland Lindell, Tomas Hallberg, and Herman Högström, SPIE Security + Defence, Target and Background Signatures, 9997-13, Edinburgh 2016

Deltagande i internationella samarbetsprojekt ger dels tillgång till information från andra länder, del sett kvitto på att vår egen kompetens och verksamhet ligger rätt. Projektet har delvis finansierat Sveriges deltagande i följande NATO-arbetsgrupper:

- NATO SCI-230 "Advanced Materials, Systems and Evaluation Methods for Adaptive Camouflage", avslutad 2010-2014
- NATO SCI-ET-013 "Evaluation Methods and Assessment of Camouflage in Operational Context", 2015
- NATO SCI-287 "Assessment Methods for Camouflage in Operational Contexts", start 2016-2018

1.2 Holistisk syn på signaturanpassning

Projektet signaturmaterial har under de senaste tre åren studerat den begränsade del av området material och materialteknik som bedöms beröra signaturanpassning. Tillämpningsområdet omfattar dock mycket mer än bara detta projekt.

Signaturanpassning omnämns allt oftare inom olika planeringsdokument som FM Perspektivstudie, FM Inriktningsplan, FoT plan, NATO Denial and Deception Doctrine, EDA:s övergripande strategiska forskningsagenda (OSRA) och FOIs projektplaner. Dessa dokument skrivs av olika organisationer och används för inriktning av verksamheten.

Då det inte har varit en uppgift för signaturmaterialprojektet har ingen närmare analys av situationen gjorts, men det är värt att uppmärksamma för diskussion. Detta för att i framtiden bättre kunna ta tillvara de synergieffekter som uppstår om olika aktörer förstår hur och när deras verksamhet bidrar till området som helhet.

Det finns flera olika aktiviteter som berör signaturanpassning. Dessa utförs av olika aktörer inom olika organisationer (myndigheter, företag, forskningsinstitut och UoH). Dessutom deltar Sverige i multilaterala projekt (NATO och EDA) och andra bilaterala och multilaterala samarbeten. Även här är det önskvärt att alla dessa olika aktiviteter stöttar varandra och Sveriges övergripande strategi.

Givet att signaturanpassning är en militär angelägenhet finns det anledning att vara mycket restriktiv med informations spridning, men på de lägre tekniknivåerna bör ett mer omfattande, dock fortfarande begränsat, informationsutbyte mellan olika svenska aktörer vara möjligt.

Då signaturanpassning tillämpas överallt på militär materiel (plattformar, vapen och system, personal, etc) finns anledning att betrakta signaturanpassning som en del i en strategi för *integrated survivability*^{2,3}. Som exempel på detta kan nämnas att effekten av signaturanpassning av ett fordon kan helt omintetgöras om tilläggsutrustning (exempelvis fjärrstyrd vapenstation) monteras i efterhand. Om inte hänsyn till signaturen kan tas redan i designskedet måste en helhetsbedömning göras: matchar det ökade skydd den fjärrstyrda vapenstationen ger den ökade risk för bekämpning som den försämrade signaturen medför?

2 Internationella aktiviteter

Här tas upp aktiviteter som antingen har genomförts inom ramen för signaturmaterialprojektet eller som har relevans för signaturanpassning.

2.1 NATO aktiviteter

Inom ramen för signaturmaterialprojektet har aktiviteter kopplat till NATO-arbetsgrupper genomförts, främst SCI-230, Advanced Materials, Systems and Evaluation Methods for Adaptive Camouflage och SCI-287, Assessment Methods and Evaluation of Camouflage in an Operational Context, där projektet delfinansierat det svenska deltagandet.

En översiktlig genomgång av NATO CSO rapportdatabas visar över 150 st olika genomförda aktiviteter som berör kamouflage 2000-2016. Många är inte längre relevanta, men det är inte osannolikt att några fortfarande är aktuella och därför värt närmare studie som del av en mer strukturerad bevakning av teknikläget inom signaturanpassning.

Under perioden 2014-2016 har vi med särskilt intresse följt utvecklingen i *Systems Concepts and Integration* (SCI) panelen. Flera av de tunga aktörerna (Tyskland, Nederländerna, Storbritannien, Kanada m fl) noterar att signaturområdet får ökad prioritet och drar till sig större intresse från de nationella försvarsmakterna. Även i Sverige bör det skiftade fokuset från internationella insatser mot försvar av svenskt territorium mot en teknisk kompetent motståndare peka mot ökad betydelse av signaturanpassning och poängtera behovet av kunskap om sensorhotet.

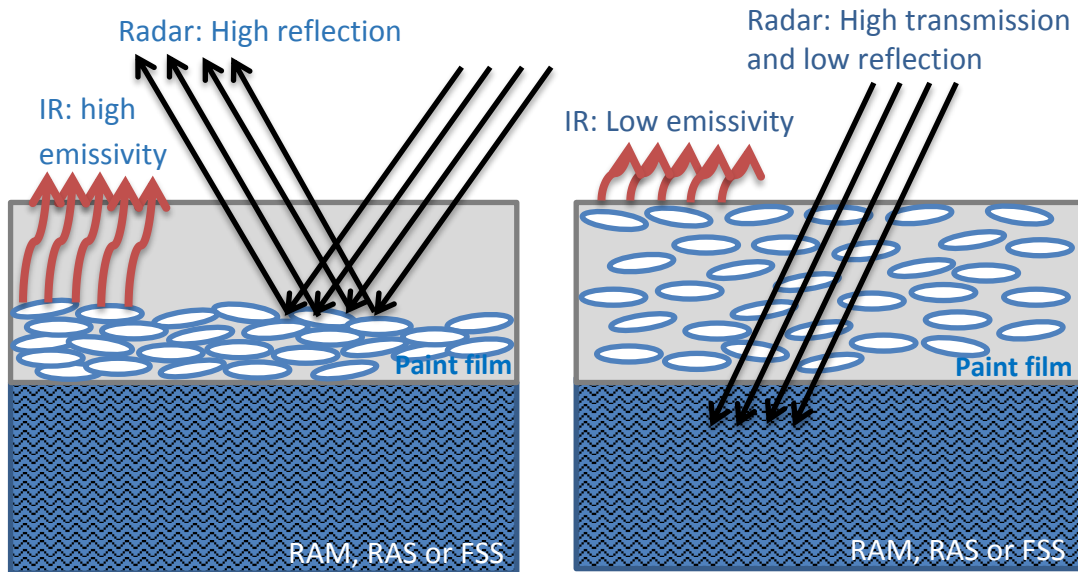
2.2 EDA aktiviteter

ALOMAS, Advanced Low Observable Materials and Structures, är ett EDA-projekt med inriktning på forskning kring lågsignaturmaterial inom både radarområdet och det optiska området och pågår under perioden 2015-2017 och finansieras via FoT Flygteknik. Samarbetet sker mellan industri och forskningsinstitut i Tyskland (koordinator Airbus och WiWeB), Sverige (FOI, Saab och GKN) och Nederländerna (NLR och Teijin Aramid). Detta är en fortsättning av ett tidigare EDA-projekt, ALOA (Advanced Low Observable Materials). Inom ALOMAS använder man och vidareutvecklar resultaten från ALOA och går mot högre TRL.

FOI medverkar genom att utveckla en radartransparent och lågemissiv färg, karakterisering inom IR och mikrovågsområdet samt teoretiska beräkningar. Den lågemissiva färgen består av ett vattenbaserat bindemedel och pigmentpartiklar i form av aluminiumflagor, som ger hög reflektion och därmed låg emissivitet inom IR-området. En viktig egenskap hos färgen är att den ska ha hög transmission/låg reflektans inom radarområdet, så att den kan appliceras på radarabsorberande material (RAM), strukturer (RAS) eller radomer. På så sätt tar vi hänsyn till behovet av multispektral signaturanpassning. Al-flagor med olika typer av beläggningar testas, såsom t.ex. av polymer och/eller SiO₂, samt tillsätsmedel i färgen för att bl.a. dispergera flagorna och fördela de homogent över hela färgskiktet och därmed undvika aggregering och skiktning av flagor.

Färgskikt med olika Al-flagor karakteriseras både inom IR-området (reflektans/emissivitet) och mikrovågsområdet (permittivitet och permeabilitet), där mätresultaten används för att utvärdera färgens egenskaper och som indata för beräkningar. Multilagerberäkningar utförs på strukturer bestående av ett yttre skikt lågemissiv radartransparent färg applicerad på ett RAM-skikt, för att simulera och förbättra egenskaperna hos en sådan struktur. Normalt sett så försämras RAM-egenskaperna då den målas med lågemissiv färg. Men genom att anpassa tjockleken av

färgskikt och RAM-skikt kan strukturens egenskaper optimeras, med ökad radarabsorption och minskad radarreflektion mot färg/RAM-strukturen, se figur 1.



Figur 1 Principskiss för funktionen hos en låg emissiv radartransparent färg målad på ett radarabsorberande material (RAM), struktur (RAS) eller frekvensselektivt skikt (FSS). T.v. illustreras Al-flagor som i färgskiktet är dåligt dispergerade och fördelade i ett skikt, vilket ger hög IR-emissivitet (låg IR-reflektans hos ytskiktet) och hög radarreflektion, medan bilden t.h. med dispergerade och homogent fördelade Al-flagor över färgskiktet ger önskade IR- och radaregenskaper, dvs. låg emissivitet (hög IR-reflektion hos ytskiktet) och hög transmission/låg reflektion för radarvåglängder.

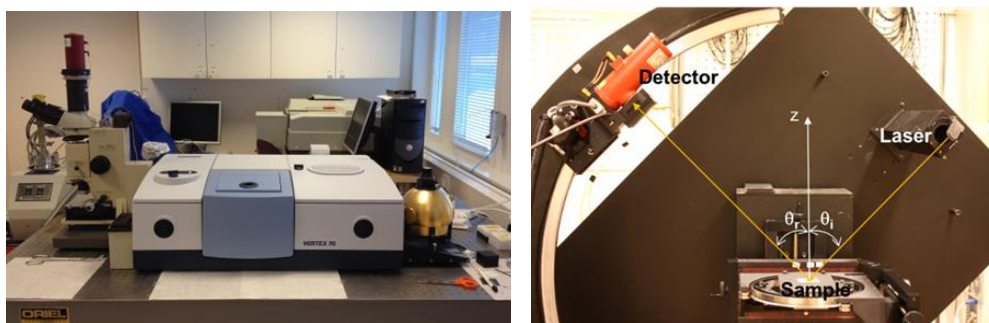
2.3 Radarabsorberande material

Utanför signaturmaterialprojektet finns en aktivitet inriktad på radarabsorberande material. Samarbetsavtal finns med en europeisk partner. Projektets resultat omfattas av sekretess.

3 Optisk materialkarakterisering

I takt med att sensorhotet utvecklas genom allt mer avancerade sensorer med både nya (t.ex. SWIR) och fler (hyperspektralteknik) våglängdsband samt smarta detektionsalgoritmer, ställs allt högre krav på signaturanpassning för att efterlikna bakgrundens egenskaper sett ur en hotsensors perspektiv. Andra nyare sensortekniker såsom polarimetri utnyttjar ljusets polarisationsegenskaper för att förstärka kontrasten mellan bakgrunden och tillverkade materialytor. Sett ur detta perspektiv måste vi ha god kännedom om en mängd olika materialytors och bakgrundstypers optiska egenskaper för att förstå hur ny signaturanpassningsteknik bör utformas och hur vi dessutom kan utnyttja befintlig signaturanpassningsmateriel på bästa sätt och inse vilka brister de har.

God kännedom om olika ytmaterials optiska egenskaper fås direkt genom att kunna mäta och karakterisera dessa. Vi har tillgång till olika mätinstrument för karakterisering av bl.a. spektral hemisfärisk reflektans (instrumentet i figur 2 till vänster) inom ett brett våglängdsområde (från UV till det bortre IR-området), ytors glans och dess specifika ljusspridningsegenskaper vid olika våglängder och polarisationstillstånd. Hur ljusspridningsegenskaperna för en specifik yta ser ut beroende på en ljuskällas (t.ex. solens) infallsvinkel mot ytan och betraktelsevinkeln uttrycks ofta genom dess BRDF (Bidirectional Reflection Distribution Function). Instrumentet för mätning av ytors BRDF, figur 2 till höger, är en tämligen unik resurs inom landet och internationellt sett finns det få instrument av den typen. Även vissa av tillbehören till spektrometrarna är mindre vanliga.



Figur 2 Exempel på mätinstrument. T.v. en spektrometer för IR-området bl.a. utrustad med integrerande sfär (guldfärgade kulan till höger om spektrometern) för mätning av vinkelberoende hemisfärisk reflektans, t.h. mätutrustning för mätning av ljusspridning från en provyta för att mäta dess BRDF vid olika laservåglängder.

Vår erfarenhet och kompetens inom optiska materialegenskaper och karakterisering har skapat flertalet nationella och internationella forskningssamarbeten med universitet och forskningsinstitut och mätuppdrag mot industrin. Samverkan sker även på internationell nivå med andra forskare inom optisk karakterisering för bl.a. utbyte av erfarenheter och utveckling av mätmetodik. Vidare finns ett behov av att testa och kvalitetsbedöma olika typer av material och ytor som används inom FM eller i samband med upphandlingar.

Den här typen av mätningar är även nödvändiga för att ta fram parametriserade materialdata för olika modelleringsverktyg för att beräkna plattformssignaturer och för att skapa olika scenarier inom scenmodellering för att t.ex. studera olika signaturanpassningsåtgärder. Dessutom krävs tillgång till specifika mätdata för att utveckla och validera optiska modelleringsverktyg och beräkningsmodeller. Modellverksamhet sker i andra projekt, såsom FoT-projektet Signaturmodellering.

4 Förändrade signaturkrav drivna av militär utveckling

I duellen mellan sensorer och signaturanpassning kan noteras en tydlig upptrappning. Utvecklingen på sensorsidan ställer nya krav på skyddsmateriel samtidigt som den, främst civila, utvecklingen inom materialteknik möjliggör helt nya skyddskoncept.

Förändringarna i vår omvärld gör att vi nu måste dimensionera våra SAT-krav mot en framtida motståndare med en sensorteknologi på, eller till och med över, vår egen tekniknivå. Det kan innebära fler sensorer aktiva i nya våglängdsband. Multi- och hyperspektrala sensorsystem som med informationsfusion kombinerar data från flera sensorer. Sensorerna får högre upplösning och kan tänkas bäras av nya typer av plattformar, såsom UAV:er och satelliter.

4.1 Material och tekniker

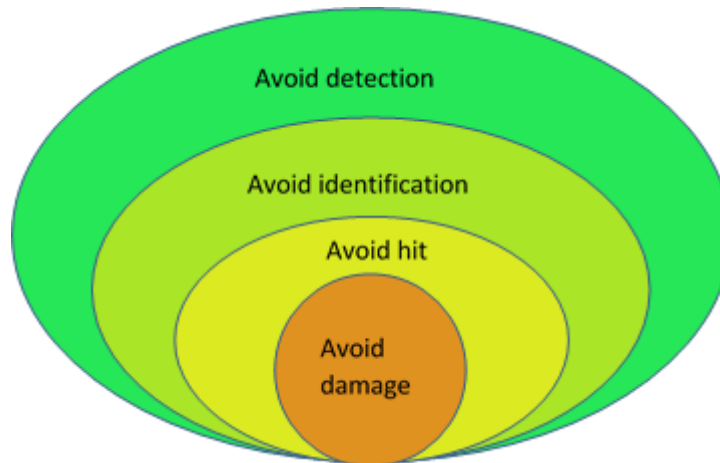
Det finns ett flertal nya material och tekniker som utvecklas av civila aktörer för tillämpningar inom konsumentprodukter och energiteknik och som troligtvis kan bidra till nya signaturanpassningsteknik. Ett urval beskrivs nedan.

Drivkraften för denna utveckling härstammar från växande marknader för s.k. smart teknik inom underhållning och kommunikation (bildskärmar, böjbara displayer, *virtual reality*, etc) och energieffektiva teknologier (belysning, styrbara ljus och IR insläpp, lågemissiv beläggningar, etc).

Följande områden bedöms som särskilt relevanta att studera närmare.

- Material och teknik för displayer (ledande polymerer, ljusemitterande material, elektrokromiska och termokromiska material) har stor potential i kombination med tryckt elektronik och additiv tillverkning
- Datorstödd design av (i) material (ii) kamouflagemönster (iii) utvärdering av kamouflage prestanda
- Textilier och textilier med multifunktionalitet

Den militära nyttan av signaturanpassning kan delas upp i två delar. Att smälta in i bakgrunden är främsta målet, men vid upptäckt bör användningen av signaturanpassning även bidra till att försvåra och fördröja identifiering. Därmed vinn ytterligare tid för egen insats, rörelse eller moteld. Den välkända skyddslöken (figur 3) illustrerar principen som en del av s.k. *integrated survivability*.



Figur 3 En schematisk bild av skyddslöken, där nyttan av signaturanpassningsåtgärder är betydelsefull i alla delar av *integrated survivability* konceptet

Det finns ytterligare en aspekt av signaturanpassning som bör uppmärksammas, nämligen vilseledning (eng. *deception*). Här är syftet att använda signaturanpassning för att vilseleda eller förvirra en motståndare. Vilseledning har under många år negligerats, men värdet av detta ökar med dagens ökande användning av sensorer och datafusion, för därmed ökas möjligheten att skapa sensorkonflikt, dvs. olika sensorer ger olika information. Inte sällan finns två eller fler sensorer riktade mot samma mål, oftast en mänsklig operatör och en IR kamera. Om till exempel operatören upptäcker ett objekt som ser ut att vara en personbil (därmed inte värt en insats) men värmekameran indikerar att det är ett stridsfordon (ett legitimt mål) skapas förvirring hos operatören.

4.2 Metod

I Andersson och Åkerlind 2015⁴ diskuteras hur sambandet mellan militär nytta och materialegenskaper kan beskrivas på ett strukturerat sätt. Modellen i figur 4 visar hur olika systemnivåer kopplar till fysikaliska eller teoretiska angreppssätt för att mäta eller beskriva. Längst ner är spektral design, en metod där mätning och modellering av optiska egenskaper hos material behövs för att designa den optiska responsen från en yta. Material såsom plast, glas, stål, betong etc har alla inneboende materialegenskaper (permittivitet, permeabilitet, emissivitet och värmeledning bl a). I IR är det värmeledning och emittans som huvudsakligen bidrar till den termiska bilden. Med vetskap om dessa och utifrån dem välja material för att kunna påverka hur en yta uppträder kallar vi för spektral design.

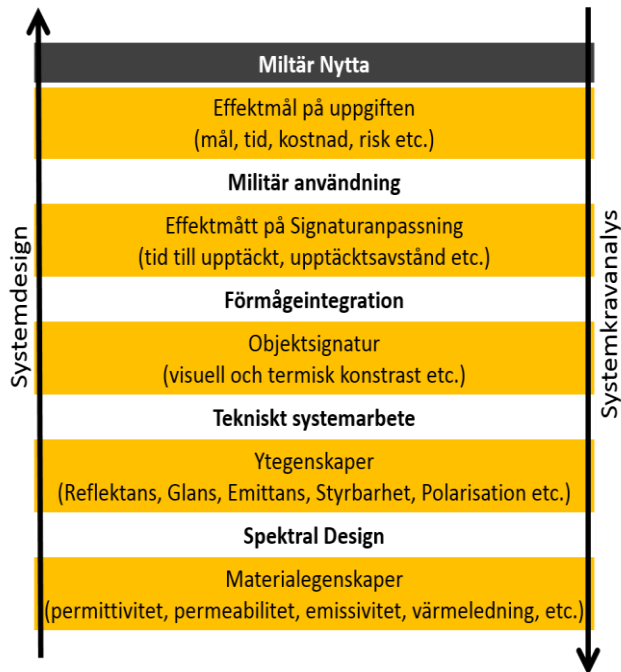
De material och strukturer som utvalts i den spektrala designen ger ytegenskaper såsom glans, reflektans, emittans, polarisation, färg och styrbarhet, vilka kan mätas i laboratoriet.

Genom tekniskt systemarbete konstrueras ett objekt, t ex ett stridsfordon, av en mängd olika ytor med kända egenskaper. Objektets signatur kan mätas på en utomhusmätplats eller modelleras i en dator om materialval och konstruktion är kända. Kontrast mot bakgrund är en typisk parameter som erhålls i detta steg.

För att få fram taktiskt relevanta parametrar som upptäcktsavstånd och tid till upptäckt behöver man också veta vilken sensor som utgör hotet, hur motståndaren tolkar sensorsignalen.

För att göra en bedömning av förmågan att effektivt lösa uppgiften måste plattformen placeras i en operationell kontext som innefattar taktisk gruppering i terrängen, användning av sensorer och vapensystem, ledning, samband, försörjningsmöjligheter och givetvis även motsvarande parametrar för motståndaren.

Om effektivitetsmålet slutligen kombineras med den militära lämpligheten att använda objektet tillsammans personal med övriga system samt mått på kostnader erhålls ett mått på militär nytta (*military utility*).



Figur 4 Stegmodell som beskriver kopplingen mellan materialegenskaper och militär nytta

Stegmodellen kan användas nerifrån och upp vid systemdesign och svara på frågor som: Vilken effekt på den militära nyttan erhålls om man målar eldröret med en färg med lägre emissivitet? Modellen kan användas uppifrån och ner vid kravsättningsarbete: För att uppnå önskad militär nytta, vilka krav ska vi ställa på färgens spektrala reflektans?

5 FoU-trender med relevans för signaturanpassningsteknik

Till skillnad från under kalla kriget är inte längre militär forskning och utveckling teknikdrivande på ett flertal områden. Civila behov driver utvecklingen inom materialvetenskap för displayteknik, textilier, fordon, energilagring mm.

Inom projektet signaturmaterial bedömer vi om och hur resultaten från civila forskningsinvesteringar kan komma Försvarsmakten till godo. Nedan följer ett urval av tekniker uppdelade på tänkt användning för statiskt respektive dynamiskt kamouflage. TRL-skalan används för att bedöma teknikområdenas mognadsgrad.

5.1 Statiskt kamouflage

Dagens signaturanpassningsåtgärder (kamouflage), till skillnad från dynamiskt kamouflage kan inte ändra dess spektrala egenskaper (reflektion, absorption) utan större ingrep i materielen som kamufleras. Till exempel måste ett fordon målas om, eller ett mobilt kamuflagesystem vändas eller ersätts med ett annat. Ett annat alternativ är att komplettera skyddet med tilläggsmaskering, naturliga eller naturliknande material.

5.1.1 Färgämne, pigment

Det finns fortfarande behov av pigment i de klassiska nyanserna grön, brun, svart, vit och beige (sand). Nuvarande trend är att dessa pigments även ska vara effektiva i infraröda våglängder och särskilt 700-1000 nm där klorofyll (från vegetation) har ett mycket karaktäristiskt reflektansspektrum. Dessa pigment används på textilier, nät och i färg för målning av fordon, vapen och dylika objekt.

Det pågår fortfarande FoU inom bindemedel som används för kamuflagefärg, där det finns behov av att minska användning av organiska lösningsmedel av miljöskäl.

Aktiviteter pågår för att utveckla multispektral kamuflagefärg effektiv inom visuella och infraröda våglängder och som är mikrovågs (radar) transparent⁵. Radartransparens behövs för användning på radarabsorberande strukturer (t.ex. på fartyg, flygplan, radom, etc).

Det finns många kamuflagepigment med hög TRL, men mer specialiserade kompositioner för multispektral färg och kamuflagekräm är av lägre TRL, omkring 5-7.

Hudmaskering

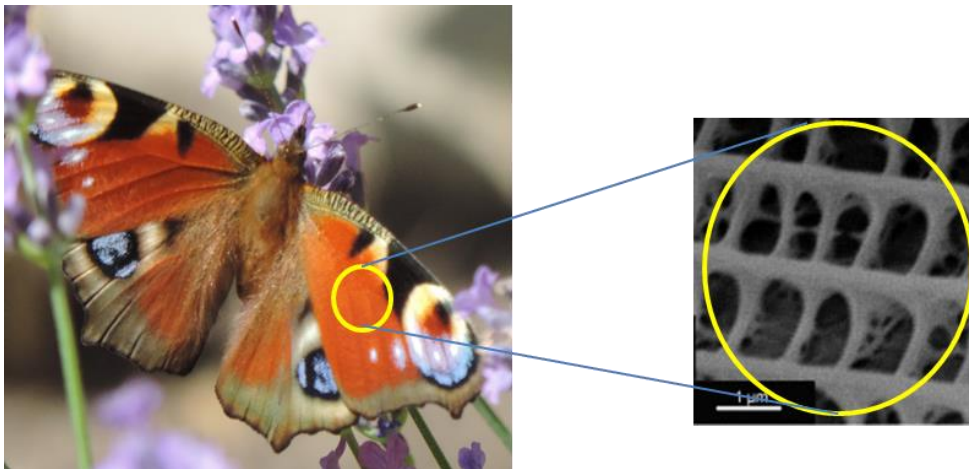
Det finns även behov av kräm för hudkamouflage, där låg IR emission är viktig då huden utstrålar värme. Det är även relevant att kombinera insektsbekämpningsmedel i krämen. Det är dock svårt att kombinera effektivt hudkamouflage med komfort för soldaten då krämen försvårar svettning. Det finns även behov av matt hudkamouflage för att hindra spektral reflektion vid lågvinkelbelysning, då hud som svettas bli täckt av en tunn och speglande vätskehinna. Civilt finns många produkter för att anpassa hudens utseende efter användarens önskemål och enorma summor investeras i produktutveckling på området, men för den specifikt militära tillämpningen IR-kamouflage är TRL-nivån låg (2-5).

5.1.2 Fotoniska kristaller och strukturell färg

Färg hos levande djur, fåglar och insekter (figur 5), har inte sällan syftet att kamuflera eller dra uppmärksamhet till dess bärare. Färgen kan bero av pigmentering i ett djurs hud och hår, t.ex. melatonin (brun/svart), men även på s.k. strukturell färg, där fibrer och ihåliga strukturer och deras storlek bestämmer kulören. Fjärilar och fåglar använder denna teknik, där påfågeln kanske är det mest uppmärksammade fallet. Färgen uppstår då inkommande ljus bryts p.g.a. interferens i mikroskopiska strukturer bestående av celler och

fibrer uppbyggda av proteiner och luft. Därför kan färgen ändras beroende på infallsvinkeln, och kan även styras om storleken på strukturen ändras. Effekten är inte begränsat till synliga våglängder och beror enbart på strukturens storlek, som är av samma storleksordning som ljusets våglängd.

Strukturell färg används inte i konstgjorda kamouflage idag men forskning pågår då det kan vara en fördel att använda material som finns i naturen. Djur, fåglar och insekter använder naturliga proteiner, exempelvis keratin och kitin. Fenomenet har gett upphov till intresse för biomimetiska material. Man önskar inte bara efterapa naturens sätt att göra färger utan även naturens tillverkningsmetoder som är lågenergiprocesser och också andra naturliga företeelser så som de dynamiska effekter som finns hos tex bläckfisk. (se 6.1.3). Civilt finns redan produkter där fotonkristaller ingår, för militär användning ligger TRL på 3-8 för olika tillämpningar.



Figur 5 Påfågelläda (*inachis io*) fjärilens färg uppstår från ljusbrytande strukturen i vingen.

5.1.3 Radarabsorbenter inkl. hög temperaturabsorbenter

Radarsensorer på marken och i luftburna missiler utgör ett allt större hot mot flygplan. Geometrisk utformning av en flygkropp (som USAFs F117 attackflygplan) kan minska reflexer tillbaka mot radarsensorn men på bekostnad av flygegenskaper, och därför söks material som kan användas som beläggning eller lastbärande struktur för att minimera radarreflexer genom absorption. Radarsignalen tränger in i materialet för att absorberas och skingras som värme. Då mängden energi som finns i radarstrålen är liten finns ingen påverkan på flygplanets temperatur eller IR signatur.

Det finns olika absorptionsmekanismer varav de viktigaste härrör från magnetiska och elektriska förluster. I ett magnetiskt material finns dipoler som försöker svänga i takt med radarstrålens magnetfältsvängning. Tröghetskrafter, elastiska- och friktionskrafter orsakar energiförluster och därmed dämpas signalen. I ett elektriskt ledande material finns liknande förluster som härrör från elektroniska- och joniska svängningar.

Det vanligaste radarabsorberande materialet består av magnetiska partiklar som ferriter och elektriskt ledande partiklar som kol, dispergerade i en polymer matris som epoxi, vinyleter eller annan termo- eller härdplast. Det krävs relativt små mängder förlustpartiklar i polymeren och både magnetiska och elektriska förlustmaterial kan kombineras i samma matris, dvs båda typerna av förlustmekanismer kan förekomma i ett

och samma material. T.ex. en del ferriter som är både magnetiskt och har viss ledningsförmåga uppvisar både elektriska förluster och magnetiska förluster.

Det krävs en optimering av absorberens elektriska ledningsförmåga för att kunna absorbera radarstrålen. Den ska inte vara för hög för att då kommer penetrationsdjupet (där radarstrålen tränger in i materialet för att absorberas) vara väldigt ytlig och huvuddelen av signalen reflekteras tillbaka. För att minimera vikt och maximera radarabsorption är det vanligt att skapa en multilagerstruktur.

På senare tid har grafen-baserade teknologier dragit till sig stor uppmärksamhet, och grafen dispergerad i en polymer kan uppvisa användbara elektriska förluster. Det är relevant att notera att grafen kan bidra även till polymerens mekaniska egenskaper som hållfasthet, elasticitet, brottseghet, etc. Idag används radarabsorbenter främst som ytskikt eller som tätning för att sänka radarreflex som sprids från kanter och hörn men det är tänkbar att i framtiden grafenkompositer kan användas som lastbärande strukturer. Dock är TRL idag låg (<3) och det finns flera egenskaper som måste optimeras innan det kan vara aktuellt med implementering i flygsystem.

Det finns potential att använda grafen som ledande skikt på insidan av en cockpitshuv på flygplan istället för dagens indiumtennoxid (ITO) skikt. Skiktet finns för att hindra radarsignalen från att tränga in i förarhytten och reflekteras tillbaka åt alla håll. ITO är sprött och lättskadat medan grafen är väldigt elastiskt och tåligt. Det krävs dock forskning för att bekräfta att (i) grafens ledningsförmåga är tillräckligt bra för att skiktet ska fungera som radarreflektor och (ii) grafens optiska transmission är bra nog för att piloten kan se genom huven.

Det finns radarabsorberande material som kan appliceras på flygplan, även om de är svårt att få tillgång till, men alla kommersiella material är baserade på organiska (polymer) matriser och kan därför inte tillämpas där temperaturen överstiger ca 150 °C. I motornära områden och särskilt nära motorutblåset bli det för varmt och då behövs temperaturtåliga absorbenter. Inne i själva motorn (strålmunstycket och brännkammaren) kan temperaturer uppnå flera hundra grader, och då finns bara keramiska material som tänkbara absorbenter. Forskning pågår för att utveckla kerambaserade och temperaturtåliga radarabsorbenter⁶. När temperaturen stiger över absorberens Curie-temperatur tappas alla magnetiska egenskaper (för att återuppstå vid lägre temperaturer) och därmed förluster, men elektriska förluster kan bibehållas till mycket höga temperatur. För att utveckla en högtemperatur radarabsorbent krävs mycket FoU då material som klarar en hög arbetstemperatur, en mekanisk påfrestande miljö och som absorberar radarstrålen krävs. Idag är TRL låg (<3).

5.1.4 Biomimetik

Genom att studera naturens lösningar på allehanda problem, från vatten- och energiförsörjning, kommunikation, hållfasthet till kommunikation och kamuflage kan inspiration hämtas till klurigare och effektivare lösningar inom ingenjörsvetenskapen och dess problemställningar. Detta att se åt naturliga lösningar kallas för biomimetik och har blivit populärt under senare år i takt med att intresset för miljö och klimat har ökat.

Inom materialvetenskapen har man traditionellt lärt sig att kombinera många typer av material (olika grundämnen) men ofta mycket enkla strukturer, under relativt stora svårigheter. Med nanoteknikens intåg har förutsättningarna ändrats och man kan numera skraddarsy egenskaper hos ett material genom att sk atomslöjd. Genom att studera ”naturliga material” i växter och djur, där byggstenarna i huvudsak består av ett fåtal grundämnen, ofta kolväten, men ofta i komplexa strukturer, och lära av naturen och tillämpa kunskapen (biomimetik) kan vi snart ha en ny revolution inom materialteknik att vänta.

Militärer har sedan början av 1900-talen avundats olika djurs förmåga att smälta in mot en naturlig bakgrund, och vissa djurarter har även förmågan att kunna förändra utseende för

att passa in i olika bakgrund. Kameleonten och bläckfisk är arter som man lätt kommer att tänka på.

Vid konferensen Living Light, San Diego samlades forskare från olika discipliner men med det gemensamma intresset att diskutera aspekter på hur ljus reflekteras och används inom biologin.

Vid Santa Barbara Institute for Collaborative Biotechnologies (ICB), en interdisciplinär forskningsmiljö, försöker man hitta tekniska innovationer med inspiration från biologin.

D.E Morse presenterade studier och resultat rörande den biofysiologiska och kemiska bakgrunden som möjliggör bläckfiskens adaptivitet, en verksamhet som stötts av Air Force Office Scientific Research. Det finns bläckfiskar som kan ändra form, skepnad och färg med andra ord en effektiv 3D-adaptiv display, i vilken förenas switchbar displayteknik med en hierarkisk pixclering och textur och form modulering. Sättet det görs på är oöverträffat andra djurs förmåga och även modern optisk teknik. I en artikel av Phan beskrivs några olika typer av adaptiva material (som kan ändra kulör) system som kan generera mönster samt både färg och texturändrande material.⁷

Andra exempel på djurarter med intressanta egenskaper är silvriga ökenmyror som klarar värmen bra⁸ samt eldflugor (*luminicence*). Dessa egenskaper försöker man åstadkomma artificiellt⁹.

Det finns även lägre arter som har avancerade kamouflagestrategier. Studier av reflektans-, spridnings- och polarisationsegenskaper hos den vita skalbaggen *Cyphochilus insulanus*, har fungerat som utgångspunkt för ökad förståelse om skydd och kamouflage mot infraröda polarimetriska sensorer vilka gjort tekniska framsteg [ref David Bergström et. Al.].

Cyphochilus insulanus har en ryggsköld med förmågan att reflektera alla synliga våglängder (dvs. den är vit) utan polarisation¹⁰. Egenskapen är fast, dvs. kan inte ändras.

I stort sett alla konstgjorda ytor polariserar reflekterat ljus, till skillnad från de flesta naturliga ytor och därför växer intresset för sensorer som kan detektera polariserat ljus. Polarisationenkänsliga sensorer utgör en växande hot i framtiden, och därför finns intresse för att kunna utveckla ytbeläggningar med bibehållen kontroll över ljusets polarisation.

Det är troligt att det finns mycket mer att lära från naturen om olika optiska och infraröda överlevnadsstrategier som olika arter har utvecklat. Ytterligare ett exempel som kan nämnas är en annan skalbagge (*Panamanian Charidotella egregia*) som kan ändra utseende från knallröd till glänsande guld. Det som är intressant i detta är att kunna ändra en ytans infraröd reflektans, en egenskap som är högst relevant för energibesparing men även för att kunna ändra IR reflektans hos ytan. Området är på grundforskningsstadiet (TRL <3).

5.1.5 Datorstödd materialdesign & materielutvärdering

En relativt ny trend inom signaturanpassning är en ökande användning av beräkningar möjliggjort av dagens kraftfulla datorer för att (i) designa material (ii) designa hur materialet kan användas i en kamouflage tillämpning och (iii) utvärdera resultatet. Området tros vara på låg TRL nivå (<3) men pga. områdets sekretess är det svårt att bedöma.

- *Datorstödd material design*. Det bli allt vanligare att med hjälp av beräkningar "skapa" nya material i en dator. Även om sådan beräkningar inte är på något sätt nytt (svensk forskning inom metallurgisk industrin var tidigt ute redan på 1980-talet) har det saknats lättillgängliga möjligheter att länka samman teori och experiment inom övriga tillämpningsområden. Trenden förstärks nu av stora

projekt som Materials Genome Initiative¹¹ (USA) och skapandet av öppna databaser innehållande stora mängder empirisk information. Exempel som bekräftar detta är en presentation (på konferensen Living Light) av Prof. M.C. Milinkovitch¹² om studier och mutationer av genetisk variation i ormskinn, där fysik, datavetenskap och evolutionär biologi länkas samman. Fram till ganska nyligen tillhörde teoretikern och experimentalisten olika samhällen i forskarvärlden, och då var det svårt för en teoretiker att validera sina teorier och för en experimentalist att utveckla teorier som kunde förklara uppnådda mätresultat. Idag är det lättare att validera beräkningar samt att få insikt i egenskaperna hos tidigare helt okända materialsammansättningar. *Ab initio* beräkningar av okända materialsammansättningar och deras förväntade egenskaper används mest idag för att söka nya material för energilagring samt att vidareutveckla metalliska material för krävande tillämpningar men det finns en spinoff-effekt relevant för signaturanpassning då beräkning av optiska egenskaper som t.ex. absorption och emission är av stor betydelse för energibesparing och IR och VIS kamouflage.

- *Datorstödd kamouflage design.* Datorer börjar användas även för kamouflage design genom optimering av storleken, form och färg av kamouflagemönster eller för att skapa oregelbundna figurer och mönster som upprepar sig vid olika längdskalor (fraktala mönster). Syftet med det senare är att skapa kamouflagemönster som är effektiva sett från olika avstånd.
- *Datorstödd utvärdering av signaturanpassning.* Det är besvärlig och tidsödande att utvärdera effektiviteten av en signaturanpassningsåtgärd då det finns många olika parametrar att mäta som upptäcksannolikhet vid ett visst avstånd, naturliga variationer i syn mellan olika människor, inverkan av väderlek, bakgrund, osv. En fullständig utvärdering är därför också dyrt. Det finns därför en drivkraft för att kunna automatisera utvärderingsmomentet. Försök har inletts¹³ men i begränsad omfattning. En önskvärd utveckling med analogi till datorstödd materialdesign är att koppla samman kamouflagedesign och utvärdering för att på så sätt skynda på utveckling och optimering av signaturanpassning, även inom icke synliga våglängder.

5.1.6 Hydrofobiska och superhydrofobiska beläggningar

IR-signaturanpassning som bygger på låg emissivitet hos ytan fungerar inte om objektet är smutsigt, dvs den lågemissiva ytan helt eller delvis täcks av ett annat material.

Hydrofobiska och superhydrofobiska ytor och ytbeläggningar är lättare att rengöra än obehandlade ytor. Regn eller spolning med vattenslang räcker oftast för att skölja bort föroreningar.

Det har länge diskuterats hur en avsiktlig signaturanpassningsåtgärd påverkas av nedsmutsning, nötning och slitage, även om vetenskapliga studier på området saknas. Att måla om ett stridsfordon görs sällan pga. den stora kostnaden och att fordonet måste tas ur tjänst, samt att arbetet kräver underhållsutrustning och kunskap som vanligtvis inte finns i fält. Det som kan göras i fält begränsas till mindre underhållsarbete som rengöring (tvättning) och ev. applicering av tillfälliga signaturanpassningsåtgärder som borttagbar färg och dekaler.

Att smuts försämrar verkan av en signaturanpassning ska inte tas för givet. Khaki som kamouflagefärg härstammar från mitten av 1800-talet då det upptäcktes att dammiga uniformer smälte bättre in i bakgrunden än rena dito då indiska soldater i sina högröda rockar slogs med abessinska styrkor i nuvarande Etiopien. Nackdelen med naturlig nedsmutsning som signaturanpassningsåtgärd är att effekten är okontrollerad och oförutsägbar. Därför vill man gärna tvätta av smuts vid behov. Materiel som är lätt att hålla ren även har en fördel om det krävs sanering från toxiska ämnen.

Hydrofobiska och superhydrofobiska ytor och ytbeläggningar utvecklas för civila behov inom vitt skilda tillämpningsområden. Bilindustrin vill förhindra nedsmutsning av bilens lack och kanske på sikt göra vindrutetorkare onödiga (regn och snö på vindrutans blåses bort av fartvinden), fartygsoperatörer vill förhindra biotillväxt på båtens skrov för att sänka bränsleförbrukning och läkare vill undvika sekundära infektioner orsakade av bakterier som fastnar på katetrar och övrig utrustning. Ett gemensamt krav på alla tillämpningar är att ytan/beläggningen måste vara robust nog att klara normal användning. På senare tid har mer robusta beläggningar utvecklats¹⁴ men det saknas studier om deras prestanda är tillräckligt bra för militära tillämpningar. Det saknas även studier om och/eller hur en ytbeläggning påverkar signaturanpassningens prestanda. Det finns produkter som påstås vara transparenta i visuella våglängder, men det finns ingen motsvarande uppgifter inom IR våglängder.

Det kan noteras att nedsmutsning av sensoraperturer sänker sensorernas prestanda, särskilt i varma miljöer och till havs, och även där kunde en robust ytbeläggning vara användbar. Det finns studier som visar positiva effekter av hydrofobiska beläggningar på radomer¹⁵. Ett tunnare vattenskikt på en regndränkt radom absorberar mindre av signalen och S/N kvoten förbättras.

Det finns ett flertal hydrofobiska och superhydrofobiska produkter på marknaden och deras TRL är hög (>7).

5.1.7 Textilier

Textilier och försök att integrera en mängd nya funktioner i textilier utgör ett stort FoU-område. Detta drivs av insikten att det finns ett stort civilt intresse och en växande marknad för friluftskläder, skyddskläder för industriarbetare, sårförband, och även möbler, som kan växelverka med dess bärare/brukare. Sportutövare får ofta vara testpiloter för denna typ av teknik. Det finns tydliga beröringspunkter med s.k. *internet-of-things*, där textilen i ett plagg eller möbel kan övervaka (alt. monitorera) dess användare och med hjälp av inbyggda sensorer mäta olika parametrar som temperatur, läge, hälsotillstånd, tryck, mängd, etc. och förmedla mätvärden till antingen en lokal eller avlägsen datainsamlingspunkt. Sensorerna kräver vanligtvis små mängder energi som tillförs genom i textilen invävda kablar, och mätvärdena transmitteras lokalt genom samma/parallella kablar eller trådlöst mha NFC, zigbee, blåtand, etc eller över längre avstånd mha radio. Den senare kräver att en antenn också integreras i textilen¹⁶. Detta är relevant till signaturanpassning för om man kan eliminera sprötanten sänks bärarens synliga signatur. Det finns även försök att integrera flexibla displayer i plagg, och datainmatning med hjälp av flexibla tangentbord. Energikällan, vanligtvis batterier men försök med solceller och övrig energiinsamlingsteknik (eng. energy harvesting) pågår, integreras också i textilen.

I och med att allt större krav ställs på den avsuttna soldaten finns stort intresse att integrera många av de ovannämnda funktionerna i soldatens stridsdräkt. Det är sannolikt att om detta görs kommer soldatens signatur att påverkas på något för närvarande utforskat sätt.

e-textilier (funktionella, smarta)

Beteckningar som används idag är inte helt tillfredsställande och samlingsnamn som funktionella, smarta och intelligenta textilier används mer eller mindre synonymt. Även begreppet e-(som i elektronik) textil används allt oftare.

Funktionella textilier (eng. *functional textiles*) förknippas med friluftskläder som avisar regn och smuts, men är permeabla, lätta och nötningståliga. Oftast åstadkommas dessa funktioner mha olika ytbeläggningar och konstgjorda fibrer. Liknande funktioner är användbara i militära tillämpningar, men inverkan av ytbeläggningarna på signaturen är inte klarlagd.

Smarta, intelligenta, och elektroniska textilier syftar snarare på textilier med inbyggda (invävda, eller tryckta) (ström)ledare, integrerade sensorer eller diskreta sensorer kopplad till ledarna, energiförsörjning, ev. energigenerering (*energy harvesting*) och eventuellt radioantenn, display och tangentbord.

Forskningen har kommit så långt (USA, UK) att e-textilier testas av soldater i fält men syftet är att testa de elektroniska funktionernas tålighet ("*soldier proofing*"). Det finns studier av hur dagens signaturanpassning, dvs. statiskt kamouflagemönster påverkas av de elektroniska funktionerna. Det kan finnas möjligheter att integrera dynamiskt kamouflage in i stridsdräkten.

Det är relevant att uppmärksamma möjligheten att integrera dynamisk signaturanpassning i en stridsdräkt eller t.ex. ett mobilt kamouflagagesystem för fordon mha de displaytekniker som utvecklas. Displayer som är strömsnåla, böjbar och robust utvecklas för tillämpningar i konsumentprodukter, och kanske kan liknande tekniker användas för militära tillämpningar. Tekniker som tryckt elektronik är särskilt tilltalande i detta sammanhang.

Textilområdet är brett och uppdelat i flera olika tillämpningar. Vissa produkter (t.ex. inom sjukvård) testas och där är TRL ca 6, men inom militära tillämpningar finns knappast några produkter och TRL är något lägre (5).

5.1.8 Metamaterial

Metamaterial består av konstgjorda strukturer vanligtvis sammansatt av olika men vanligt förekommande ledande och icke-ledande material som koppar och plast. Genom snillrik, intrikat design kan man få fram en materialstruktur som uppvisar elektromagnetiska (EM) egenskaper som inte finns i något existerande material, därav namnet "meta."

Metamaterial är relevant ur signaturanpassnings synvinkel¹⁷ pga. det går att styra elektromagnetisk strålning (ljus, IR- och radar) på tidigare omöjliga sätt. Mha en sköld av metamaterial tvingas ljus att böja sig runt ett objekt utan att varken reflekteras eller kasta skugga. Objektet blir "osynligt" för en utomstående observatör. För att göra metamaterial till ett praktiskt verktyg för signaturanpassning finns det dock flera stora problem att lösa. Skalan på strukturen i ett metamaterial är av samma storleksordning som eller mindre än våglängden på EM-strålningen som det är fråga om, så av praktiska skäl har de flesta försök hitintills gjorts med mikrovågor där våglängden är av storleksordningen millimeter. Det bör tilläggas att fraktala metamaterial påstås kunna kringgå denna storleksbegränsning. Osynlighetseffekten är också smalbandig, så strålning utanför bandet påverkas inte och objektet blir synligt ändå. Volymen som kan "osynliggöras" är liten, maximalt några kubikdecimeter. Att tillverka ett metamaterial är besvärligt. Idag används standardmässig fotolitografiteknik för att skapa de byggelement som monteras ihop manuellt för att skapa metamaterialet, och strukturen är mekaniskt svagt och ömtåligt.

Metamaterial som verkar inom EM-spektrat har tills nu fått störst uppmärksamhet från forskare, men det finns även akustiska metamaterial som verkar inom ljudspektrat. Pga ljudets mycket längre våglängd (ca 70 mm i vatten vid 20 kHz) är storleken på metamaterialets struktur mer lätthanterligt, men effekten är fortfarande smalbandig.

Det finns en ur signaturanpassningssynvinkel mer närliggande tillämpning för metamaterial, och det är i en antenn. På samma sätt som infallande EM-strålning kan tvingas göra "omöjliga saker" så kan emitterad strålning det. En krökt antenn kan fungera som en plan antenn, t.ex. Det har visat sig möjligt att skapa tunna och smalbandiga antenner som dessutom kan vara krökta, för att passa t.ex. in i en flygkropp. Nuvarande antenner är oftast utanpåliggande, synliga och på ett flygplan orsakar de aerodynamiska laster och energiförluster som ökar bränsleförbrukning. Allt oftare är det ont om plats att montera flera antenner, samtidigt som trenden är att göra plattformar mindre. Platsbrist är särskilt problematiskt på små obemannade flygfarkoster, och antenner som placeras för nära kan störa varandras funktioner. Det är tilltalande att närmare studera hur metamaterial kan användas för att bygga in antenner i framförallt flygfarkoster.

TRL för metamaterial är låg (1-2), men det har ändå bevisats möjligt att bygga en fungerande antenn i labbskala. Intresset att fortsätta med FoU är stort, men kräver tillgång till avancerade beräkningsverktyg, kunskap och möjligheter att tillverka antennen. Det sistnämnda är kanske det lättaste problemet att lösa, mha additiv tillverkning (s.k. 3-D printing).

5.1.9 Additiv tillverkning och tryckt elektronik

Tillverkning av komplexa tre-dimensionella komponenter kräver mycket bearbetning och förutom onödig tidsåtgång går mycket material till spillo som spån. Att trenden går mot allt mindre och mer komplexa komponenter i militär materiel försvårar situationen. Under senare år har additiv tillverkning (även kallad 3-D printing) fått mycket stor uppmärksamhet som en tids-, material- och kostnadsbesparande sätt att tillverka små, komplexa komponenter av plast och metall. Additiv tillverkning är på inget sätt en ny upptäckt (ett svenskt företag redan under tidigt 1990-talet tog patent på en central teknik), men dagens uppmärksamhet kan härledas till konvergens mellan moderna digitala designverktyg (eng. CAD, computer aided design), information- och kommunikationsteknik, materialteknik (i synnerhet pulverteknik) och en ökande användning av dyrbara legeringar som titan, nickel, kobolt, etc. Additiv tillverkning erfar en hög utvecklingstakt men vissa produkter har godkänts för flygtillämpningar (TRL = 9).

Additiv tillverkning är mycket användbar för tillverkning av små och komplexa komponenter av metaller och plast som tillverkas i små serier eller enstaka exemplar. I ett kamouflagesystem finns många fästelement och tillbehör, komponenter som bidrar till systemets totalprestanda. Det är inte osannolikt att additiv tillverkning kan bidra till detta.

Tryckteknik används idag för att trycka kamouflagemönster på textilier. Tryckt elektronik, dvs. tekniker att med något modifierad tryckteknik och modifierad tryckfärg printa mönster bestående av elektrisk ledare och elektroniska komponenter (transistorer, displayer, kontakter, tangentbord, etc) på textilier och övriga flexibla underlag har utvecklats för tillämpningar så diversifierade som programmerbara prislappar för livsmedelsförpackningar, temperaturgivare för känsliga läkemedel, underhållning, s.k. smarta biljetter och på senare tid för att emittera ljus.

Tryckfärg bestående av ledande polymerer, metalliska och ickemetalliska partiklar som är ledande eller optiskt aktiv, och nanopartiklar (s.k. kvantprickar) och bindemedel har utvecklats för nämnda civila tillämpningar. Vissa material har även visat sig uppvisa styrbara (eng. switchable) IR egenskaper, t.ex. i prislappar. Det är sannolikt att tekniker för tillverkning av tryckt elektronik kan tillämpas för att tillverka material och strukturer för signaturanpassningsändamål. Exempel på sådana tillämpningar är: att trycka de komplexa mönstren av ledare i ett metamaterial element, och att trycka mönster av elektroniska funktioner t.ex. ljusemitterande dioder, på textilier.

TRL nivåerna varierar beroende på tillämpningen, men tryckt elektronik används kommersiellt (TRL = 9). Dock fortgår utveckling av tryckbläck med högre ledningsförmåga. TRL för signaturtillämpningar är dock lågt.

5.1.10 Cellulosa

De senaste åren har mycket pengar satsats på att investera i att utveckla och förädla cellulosa som råvara (bl. a. Wallenberg Wood Science Center). Bland annat kan man från forskningsfronten höra om cellulosanofibrer och -kristaller, 3D-printning med cellulosa samt om försök att ersätta lignin med PMMA för att åstadkomma transparens. I dagsläget är det svårt att förutspå vad detta kan betyda för material för signaturanpassning. Cellulosa är emellertid naturligt förekommande och lätt tillgängligt. Forskningen är på TRL<3.

5.2 Dynamiskt kamouflage

Sveriges militära styrkor kan beordras utföra skarpa insatser med kort varsel och utan förvarning om var i världen insatsen kommer att ske. Det finns därför ingen tid att ta fram kamouflage materiel anpassad för uppdraget, och det är inte heller ekonomiskt optimalt att lagerföra alla olika kamouflagemateriel för tänkbara insatsmiljöer som öken, arktisk, skog, eller urban miljöer.

Det optimala vore att ha en uppsättning signaturanpassningsmateriel som kunde anpassas efter rådande behov och miljö. Ett simpelt men praktiskt exempel av detta är vändbar kamouflage (uniform, ytterkläder, nät o.s.v.) där insidan är olik utsidan, exempelvis vit (arktiskt) på insidan och grön (skog) på utsidan. Det finns dock bara två valmöjligheter, insidan eller utsidan. Ytterligare en teknik är tillfälligt kamouflage där man målar över en befintlig färg med en ny och färg som lätt kan tas bort genom tvättning. En alternativ teknik är att klistra på avtagbara dekaler av valfri färg, mönster och storlek som kan lätt rivas bort senare. Även här krävs lagerföring av viss materiel (färg resp. dekaler) och en arbetsinsats.

Idealt vore att ha signaturanpassningsmateriel som kunde i fält och utan någon större ansträngning (och helst automatiskt) anpassa sig till närmaste bakgrunden, ungefär som bläckfisk och kameleont kan göra. Även en del dagdjur har en anpassningsförmåga, dock är det alltför långsamt. Till exempel skogsharen och fjällräven ändrar färgen på pälsen beroende på säsongen, men omvandlingen fodras flera veckor för att genomföra. Det finns idag många studier av framförallt bläckfisk för att förstå hur omvandlingen skapas, vad som krävs för material och strukturer, hur färgförändringen sker och hur bläckfisken känner till bakgrundens färg och mönster. Notera att det inte är meningen att kopiera bläckfiskens mekanismer men snarare att begripa vad som sker, för att sedan härma resultaten. Detta kallas för dynamiskt kamouflage. Tekniskt sett är området i sin linda (TRL <3), men det finns ett flertal kommersiella aktiviteter inriktade på displayteknik för konsumentelektronik och belysning som eventuellt kan anpassas för militära bruk och där utvecklingstakten är hög.

5.2.1 Kromiska material

Material som kan ändra sin spektrala egenskaper, d.v.s. färg kallas för kromiska material, oftast med ett prefix som beskriver den mekanismen som styr färgförändringen, som vanligtvis är reversibel. Det finns flera olika kromiska material vara de som är mest användbara för signaturanpassning beskrivs nedan.

- *Elektrokroma material.* Genom att lägga en elektrisk spänning på ett elektrokroma material kan en färgförändring skapas. Ett stort antal material inkl. metalloxider, hexacyanometallater, ledande polymerer, metallopolymerer och phthalocyaniner uppvisar elektrokromism.¹⁸
- *Termokroma material.* Genom att ändra temperaturen på ett termokromt material kan en färgförändring skapas. Effekten har varit känd sedan länge och används i diverse konsumentprodukter. Nackdelen om fenomenet ska användas för signaturanpassning är att temperaturförändringen dels kräver energi (antingen för uppvärmning eller för kylning) och dels att temperaturskillnaden ökar den termiska kontrasten mellan objektet och omgivningen och i IR spektret bli resultaten motsatsen till den som önskas, om inte materialets emissivitet samtidigt sänks (se nedan).
- *Termoelektriska material.* Fenomenet termoelektriciteten har varit känt sedan 1820-talen då det upptäcktes att en temperatur gradient mellan olika sammanfogade metaller ger upphov till en elektrisk spänning. Kort därefter (1834) upptäcktes motsatta effekten, att en pålagd spänning ger upphov till en temperaturgradient. Fenomenet skapar en möjlighet att ändra ett materials

infraröda signatur på ett enkelt sätt. Det finns försök att använda termoelektriska material på detta sätt genom att på utsidan av ett fordon montera små termoelektriska plattor (se bilden nedan) som temperatur styrs i olika mönster. Plattornas infraröda signatur kan styras, men nackdelen är att energiförbrukningen är hög. Detta har visats i en modifierad militär plattform (TRL=7).

5.2.2 Elektropolymerer

Det finns ett flertal olika elektriskt ledande polymerer som används i displayer, antistatiska folier och beläggningar, avskärmning och transparenta elektroder. Ett antal polymerer ändrar färg i synliga eller infraröda våglängder och skulle eventuellt kunna användas som del i dynamiskt kamouflage.

5.2.3 Dynamisk emissivitetkontroll

De flesta objekt som ska kamoufleras är varmare än deras omgivning och kan därför urskiljas från bakgrunden med infraröda sensorer. Genom att sänka objektets infraröda utstrålning reduceras kontrasten mot bakgrunden och objektet bli svårare att upptäcka. Ett sätt att åstadkomma detta är att reducera emissiviteten hos objektet, som därmed ser ut att vara svalare än det verkligen är. Detta är dock svårt (men inte omöjligt) att åstadkomma i praktiken.

Att ändra emissiviteten hos en yta är önskvärt inte bara för signaturanpassning. Låg emissiva beläggningar på fönsterglas har använts sedan länge för att minimera energiförluster genom infraröd utstrålning. Dessa beläggningar består av ett multilager av olika keramer, tunn nog att inte blockera synlig ljus helt (en normal transmission ligger omkring 70 %). Infraröd strålning inifrån reflekteras tillbaka in i byggnaden. Effekten är dock inte styrbar, och skulle bli svårt att applicera på de ytor som normalt finns på militära materiel. Det finns behov av styrbara emissivitet för temperaturstyrning av satelliter för att stabilisera temperaturen då satelliten kommer in i/går ut från jordens skugga. Snabba temperatursvängningar bör undvikas och då skulle en styrbar emissivitet vara värdefull.

Försök att utveckla elektrokroma material (verksamma inom infraröda spektrat) för signaturanpassning har gjorts¹⁹ och en elektrokromisk cell bestående av en multilager beläggning har demonstrerats med en styrbara emission inom 8-12 μm spektret. Genom att lägga på en låg pänning kunde beläggningens reflektans (dvs. inversa emittans) ändras över ett spann av 80 %. Teknikmognad är dock låg, TRL = 1.

5.2.4 Displayteknik

Ljusemitterande dioder, kvanttråder, kvantprickar och dylik nanoteknik erfar en hög utvecklingstakt och stora investeringar från civila aktörer driven av marknaden för displayer i nya konsumentprodukter med låg energikonsumtion (till exempel VR-goggles, böjbara displayteknik för mobiltelefoner), och för lågenergi belysning i allmänhet. Liknande teknik kan eventuellt användas för signaturanpassning, särskilt om flexibel displayer kan utvecklas som är robust nog att appliceras på hårda (och eventuellt mjuka) ytor. Försök att med hjälp av LEDs sänka kontrasten mellan en sändarmast på horisonten och himlen har demonstrerat värdet av tekniken.

Vidare utvecklat skulle robusta displayer kunna användas tillsammans med en kamera riktade mot bakgrunden för att i realtid projicera bilden av en bakgrundsscen på ett objekt, till exempel ett fordon. Tekniken har redan demonstrerats i konstnärligt syfte (se figur 6 nedan). En fråga som är värt att studera närmare är hur bra bilden måste vara för att kunna lura en sensor (operatör)?



Figur 6 En bil täckts med LEDs som används för att projicera bakgrundscenen på fordonet²⁰

6 Diskussion

I FoT-planen anges att projektet ska belysa följande frågeställningar:

6.1 Hur kan utvecklingen inom adaptiva signaturmaterial användas för att förbättra Försvarens materiel och metoder för signaturanpassning i olika insatsmiljöer?

Adaptiva material kan användas för att anpassa signatur till t ex bakgrund, ljusförhållanden, väder, hotbild och uppdrag. Ett antal tekniker för detta har studerats, vilket beskrivs i kapitel 5.2.

6.2 Vilka åtgärder kan vidtas för att motverka sensorer som utvecklas eller blir mer spridda i tidigare ofarliga våglängdsområden?

I framför allt SWIR-området (1,1 – 2,5 μm) är sensorutvecklingen snabb. Framsteg inom civil materialvetenskap kan och bör användas för att ta fram pigment med önskade egenskaper i detta område.

6.3 Vilken militär nytta kan erhållas med spektralt designade ytor?

Hyperspektrala sensorer utvecklas i snabb takt. Dessa kan motverkas med spektralt designade ytor, som bygger på en kombination av struktur och materialegenskaper. Biomimetik är en lovande metod för att designa skyddande ytor.

6.4 Hur kan skydd mot polarisationskänsliga IR-sensorer förbättras?

Idag finns inget skydd mot polarimetriska IR-sensorer, som i framtiden kan bli ett allvarligt hot mot kamouflerade objekt. Skydd mot dessa studeras i samverkan med FoT-projekten Signaturmodellering och Avancerade Spaningssensorer, som tittar på de möjligheter sådana sensorer erbjuder.

6.5 Kan nya material ge bevarad förmåga till lägre kostnad?

Stora civila satsningar görs för att få fram material med nya och förbättrade egenskaper. Den kunskap som tas fram där bör komma Försvarens materiel till godo. Egna resurser behöver därmed inte läggas på utveckling av materiel, däremot på bevakning av civil forskning, identifiering av betydelsefull utveckling och anpassning av civila landvinningar till militära behov.

Ja, alternativt förbättrad förmåga till bevarad kostnad.

7 Slutsatser och rekommendationer

- Det militära värdet av signaturanpassning växer i takt med att antalet avancerade hotsensorer och sannolikheten att en framtida opponent har avancerade sensorer ökar.
- Då den allra mesta forskning och utveckling som berör material och materialteknik med möjliga tillämpningar för signaturanpassning sker inom universitet och högskolor (inom- och utomlands) och företag bör en systematisk bevakning av detta FoU ske. Vidare bör teknikutvecklingen värderas avseende
 - (i) möjliga tillämpningar inom signaturanpassning,
 - (ii) aktuell TRL
 - (iii) utvecklingstakten, dvs. om/när tekniken skulle kunna implementeras.
- En ökad grad av informationsutbyte mellan olika organisationer (institut, myndighet, företag och UoH) med intresse för teknik som kan bidra till signaturanpassning skulle bidra till en mer samlad strategi för Sveriges aktiviteter inom området. Därför rekommenderas bildande av en informell arbetsgrupp (AG-signaturteknik).
- Efter att under flera år ha varit ett lågprioriterat område har intresset för signaturanpassningsteknik åter börjat öka i länder som Tyskland, Storbritannien, Nederländerna, Frankrike, och Norge.
- Nya sensorer (såsom SWIR, polarimetri) nödvändiggör utveckling av nya skyddskoncept.
- Sverige är fortfarande en viktig aktör. Ordförande i NATO-grupp SCI-287, medarrangör av NATO workshop, sessionsordförande vid SPIE konferensen "Target and background signatures", coordinator för EDA-projektet "Adaptive camouflage for the soldier", inbjuden talare vid Future Forces Forum.
- Den civila utvecklingen på materialområdet är snabb. Mycket av det som händer där kan få militära tillämpningar inom några år. Det är angeläget med fortsatt bevakning av utvecklingen.
- Vi saknar nu ett bra verktyg för strukturerad omvärldsbevakning av signaturmaterial. Techwatch är ett verktyg som EDA utvecklar tillsammans med JRC. Man ska bevaka ca 6000 källor i 70 språk och med hjälp av textmining extrahera användbar information. En testversion finns och skall uppdateras vid årskiftet 2017. Ett par övriga skannande verktyg är också under utveckling på Armasuisse respektive TNO. En analys av dessa verktygs användbarhet rekommenderas.

8 Referenser

- ¹ Karber, P.A. *Lessons learned from the Russo-Ukrainian war*. The Potomac Foundation, July 2015
- ² Roopchand, J. *Integrated Survivability Concept -A Hybrid Protection System for AFVs*. Int. J. Engng. Innov. Tech. **3** (2013) 228-233
- ³ Se e.g. Guzi, G.L. *Integrated survivability assessment*, ARL-TR-3186, April 2004
- ⁴ Andersson, K.E. och Åkerlind, C. "A review of materials for spectral design coatings in signature management applications", Proc. SPIE **9253** 92530Y-19 (2014).
- ⁵ E.g. ALOMAS, ett europeisk multilateralt samarbetsprojekt inom EDA (europeiska försvarsbyrån) regi
- ⁶ Se e.g. Tian, H., Liu, H.-T., Cheng, H.F. *A high-temperature radar absorbing structure: Design, fabrication, and characterization*. Comp. Sci. Tech. **90** (2014) 202-208
- ⁷ Phan, L. et al; *Dynamic materials inspired by cephalopods*, Chem. Mater., 2016; <http://pubs.acs.org/doi/ipdf/10.1021/acs.chemmater.6b01532>
- ⁸ https://www.helmholtz-berlin.de/projects/tailored-disorder/projects/brf_en.html ; Dr. Helge-Otto Fabritius, Ph.D
- ⁹ Chen, L., Shi, X., Li, M., Hu, J., Sun, S., Su, B., Wen, Y., Han, D., Jiang, L., Song, Y. *Photonic structures by the reflector layer of firefly lantern for highly efficient chemiluminescence*. Scientific Reports, **5**:12965, (2015) DOI: 10.1038/srep12965
- ¹⁰ Åkerlind, C., Arwin, H., Hallberg, T., Landin, J., Gustafsson, J., Kariis, H., Järrendahl, K. *Scattering and Polarization Properties of the Scarab Beetle *Cyphochilus insulanus* Cuticle*, . Opt. **54** (2015) 6037-45
- ¹¹ <https://www.whitehouse.gov/mgi>, tillgänglig 2016-11-15
- ¹² Laboratory of Artificial and Natural Evolutions / Swiss Institute of Bioinformatics
- ¹³ Muller, T. & Muller, M. *Computer-aided camouflage assessment in real-time*. Proc. SPIE 6543, Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XVIII, 654307 (2007); doi:10.1117/12.724830
- ¹⁴ Nine, Md. J., Cole, M.A., Johnson, L., Tran, D.N.H., Losic, D. *Robust Superhydrophobic Graphene-Based Composite Coatings with Self-Cleaning and Corrosion Barrier Properties*. ACS Appl. Mater. Interfaces, **7** (2015) 28482–28493 DOI: 10.1021/acsami.5b09611
- ¹⁵ Se e.g. http://www2.l3com.com/essco/resources/tutorials_importance_in_hydrophobic_coating.htm. Tillgänglig 2016-11-15
- ¹⁶ Pohl, A., Lejon, S., Pettersson, L. *Flexible 300 MHz Communication Antenna for Battle Dress Uniform Integration, Swedish Microwave Days*, Linköping, 2016-03-15, 2016, FOI-S--5461--SE
- ¹⁷ Han, T., Bai, X., Thong, J.T.L., Li, B. & Qiu, C.-W. *Full control and manipulation of heat signatures: cloaking, camouflage and thermal metamaterials*. Adv. Mater. **26** (2014) 1731-34 DOI: 10.1002/adma.201304448
- ¹⁸ Chandrasekhar, P., Zay, B.J., Birur, B.C., Rawal, S., Pierson, E.A., Kauder, L., Swanson, T. *Large, switchable electrochromism in the visible through far-infrared in conducting polymer devices*. Adv. Funct. Mater. **12** (2002) 95-103
- ¹⁹ Yablonovitch, E. *Electrochromic infrared camouflage*. UC Los Angeles, 2005
- ²⁰ Källa: <http://amazingstuff.co.uk/technology/invisible-car/#.WCmLuskmlvm>