



Slutrapport FOT-SAT 16-18

NILS KARLSSON, ÅSA ANDERSSON, LARS BOHMAN, PÄR GLENDOR,
OVE GUSTAFSSON, MAGNUS GUSTAVSSON, ROLF JONSSON,
HANS KARIIS, MIKAEL KARLSSON, STEVEN SAVAGE,
NICLAS WADSTRÖMER, ERIK ZDANSKY, CHRISTINA ÅKERLIND

Nils Karlsson, Åsa Andersson, Lars Bohman,
Pär Glendor, Ove Gustafsson,
Magnus Gustavsson, Rolf Jonsson,
Hans Kariis, Mikael Karlsson,
Steven Savage, Niclas Wadströmer,
Erik Zdansky, Christina Åkerlind

Slutrapport FOT-SAT 16-18

Titel	Slutrapport FOT SAT 16-18
Title	Final report FOT SAT 16-18
Rapportnr/Report no	FOI-R--4637--SE
Månad/Month	November
Utgivningsår/Year	2018
Sidor/Pages	40 p
Kund/Customer	FMV
Forskningsområde	7. Sensorer och signaturanpassning
FoT-område	Sensorer och signaturanpassning
Projektnr/Project no	E72051
Godkänd av/Approved by	Christian Jönsson
Ansvarig avdelning	Ledningssystem
Exportkontroll	Innehållet är granskat och omfattar ingen information som är underställd exportkontrollagstiftningen.

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

Denna rapport sammanfattar FOI:s arbete inom FOT-SAT 16-18 som består av olika delar inom signaturområdet.

Maskeringsmönster - är en del där FOI tidigare tagit fram en metod att utifrån bilder på en vald omgivning ta fram ett lämpligt mönster i syfte att smälta in i omgivningen. Arbetet har nu främst varit dokumentation av detta arbete.

Internationella samarbeten - rymmer olika samarbeten som deltagande i Natogrupp, SCI-287 "Assessment methods and evaluation of camouflage in an operational context", EDA-grupp SPEC "Specification of European Camouflage" samt Informationsutbyte mellan Sverige och Storbritannien inom ramen för annex 61.

Modellering och simulering av termiska egenskaper - är ett arbete för att kunna utföra simuleringar i IR-området av objekt med s.k. mobila maskeringssystem (MCS).

Modellering och simulering radar - är ett arbete där man tagit fram en metod för att beräkna radarsignaturen för ett objekt med s.k. mobila maskeringssystem (MCS).

Terrtex - har handlat om att ta del av BAE Systems vidareutveckling av värderingsprogrammet och ge återkoppling.

SAT-symposiet - arrangerades av FMV och i rapporten görs en kort redogörelse för FOI's deltagande i symposiet.

Nyckelord: Radar, IR, signatur, maskering, mönster

Summary

This report summarize the FOI part of the project ”FOT-SAT 16-18”, that consists of the following:

Camouflage pattern –FOI has developed a method that from a picture of chosen environment creates a camouflage pattern. In this project the focus has been on documentation.

International cooperations – contains different cooperations; Nato group SCI-287 “Assessment methods and evaluation of camouflage in an operational context”, EDA-group SPEC ”Specification of European Camouflage” and Information exchange between Sweden and UK in annex 61

Simulations of thermal properties - is a work that aims to perform simulations in the IR region of object camouflaged with mobile camouflage MCS.

Simulations radar – FOI has developed a method to calculate the radar signature of an object camouflaged with MCS.

Terrtex – is an program for evaluation of signatures originally developed by FOI, but now further developed by BAE Systems

SAT-symposium – this report briefly lists the FOI participation

Keywords: radar, IR, signature, camouflage, pattern

Innehållsförteckning

1	Inledning	7
2	Maskeringsmönster	8
2.1	Metodbeskrivning	8
3	Internationella samarbeten	12
3.1	SCI-287	12
3.2	Informationsutbyte SE-UK inom ramen för annex 61	13
3.3	SPEC	14
4	Modellering och simulering – termiska egenskaper	15
4.1	Simulerings modeller	15
4.2	IR-signatursimulering	17
4.3	Resultat från IR-signaturmätningar, Skövde	21
5	Modellering och simulering – radar	26
5.1	Metodbeskrivning av elektromagnetisk beräkningsmodell för MCS-material	26
5.2	Validering	28
5.3	Inverkan av sömmar på radarsignaturen för MCS.....	35
5.4	Inverkan av böjd absorberant runt kanonrör	36
5.5	Sammanfattning och slutsatser.....	36
6	Terrtex	37
7	Deltagande i SAT-symposium	38
8	Slutsatser	39
9	Referenser	40

1 Inledning

Denna rapport sammanfattar FOI:s del av FOT-SAT 16-18. Arbetet har varit fördelat på följande områden.

- Maskeringsmönster
- Internationella samarbeten
- Modellering och simulering – termiska egenskaper
- Modellering och simulering – radar
- Terrtex
- SAT-symposium.

Varje område presenteras i separata kapitel av rapporten.

Modellerings- och simuleringsarbetet har varit ett samarbete med Saab Barracuda, där Barracuda bidragit med maskeringmateriel i form av MCS till stridsvagn T-72 som utgjorde testobjekt. Vidare utförde Barracuda IR-mätningar på testobjektet T-72 i Skövde samt såg till att T-72 och dess MCS-kit fanns på plats vid FOI's radarmätningar på Lilla Gåra. Dessutom utförde Saab Dynamics radarmätningar på paneler med MCS material.

Terrtex är ett programverktyg utvecklat av FOI för analys och utvärdering av sensorgenererade bilder och kan med fördel användas vid utvärdering av olika signaturanpassningsåtgärder. Vidareutveckling av programmet har utförts av BAE Systems Bofors.

2 Maskeringsmönster

Ambitionen med arbetet är att utifrån en representativ bakgrund skapa ett optimalt kamouflagemönster. Tidigare har kamouflagemönster skapats för hand. Detta arbete är ett första steg att automatisera och effektivisera processen. Behovet för detta har bl.a. ursprung i Försvarsmaktens deltagande i internationella insatser som medfört att man verkar på flera och mer olika miljöer än tidigare. Det finns ett behov att kunna anpassa eller införskaffa kamouflage på relativt kort varsel för den miljön man ska verka i. Arbetet syftar till att ta fram metodik för att skapa optimalt mönster med hänsyn till typbakgrund, operativ miljö och kulörval. I föreliggande arbete har fokus varit på att ta fram en metod som är praktisk d.v.s. enkel att använda och kräver begränsad mängd indata. Det är tänkt att man relativt snabbt ska kunna ta fram ett nytt mönster för nytt område.

Projektet har utvecklat en metod för att skapa ett visuellt kamouflagemönster utifrån bildmaterial om aktuell miljö. I detta arbete har vi avgränsat oss till det visuella våglängdsbandet, men metoden kan extrapoleras till andra delar av våglängdsspektrat.

När ett mönster tas fram digitalt så måste också ett mänskligt val göras av vilken bakgrund som skall gälla som utgångspunkt. Mönsteranalys som utgår från ett foto är som utgångsläge tvådimensionellt och inte tredimensionellt. Verkligheten är tredimensionell, alltså avviker mönstret som fås genom analysen till viss del redan från början från verkligheten.

Stor del av tiden i projektet har använts till att prova olika, mer eller mindre, avancerade mönstergenereringsmetoder. I denna rapport presenteras den enklaste metoden och den enda av de vi undersökt som har potential att faktiskt kunna fungera.

2.1 Metodbeskrivning

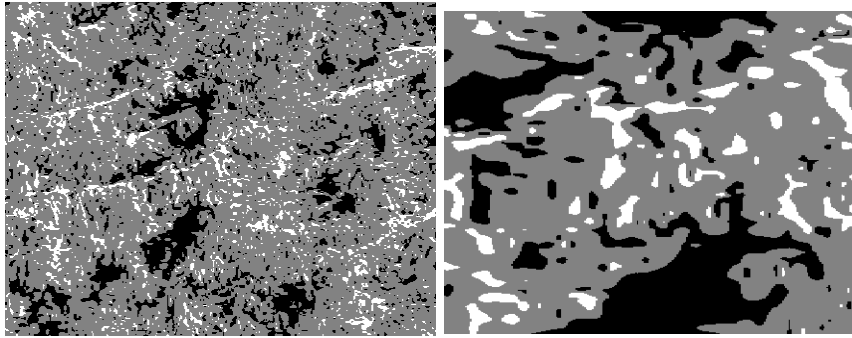
Metoden beskrivs i fem steg.

2.1.1 Steg1 Val av representativ bild

Insamling av representativa bilder från miljön vari kamouflaget ska användas. Figur 1 är ett exempel på en vald bild som behandlas vidare. En skal- och färgpreferens ska finnas i bilderna så att man kan bestämma den spatiella upplösningen samt normalisera färgskalan.



Figur 1. Bild av vald representativ miljö som i det här fallet en skogsridå.

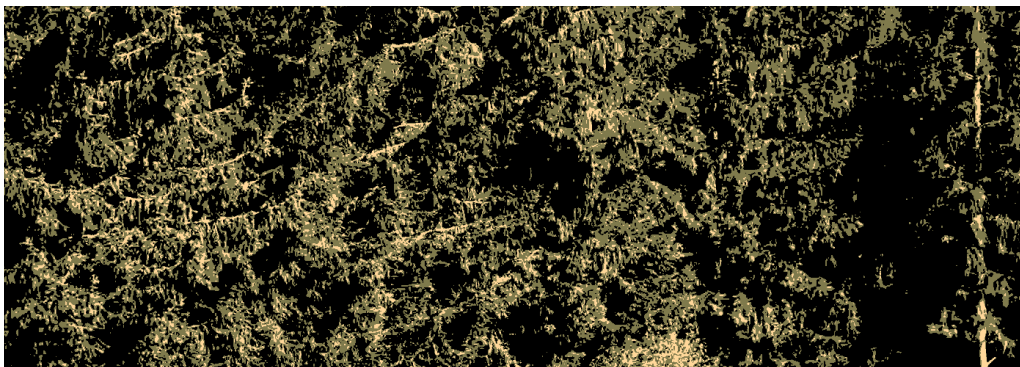


Figur 4. Vänster) En bild framtagen enligt beskrivningen ovan med tröskelvärden 0.3 och 0.5. Höger) Bilden är en förstorad del av den vänstra bilden för att visa hur mönstret blir i olika skalor.

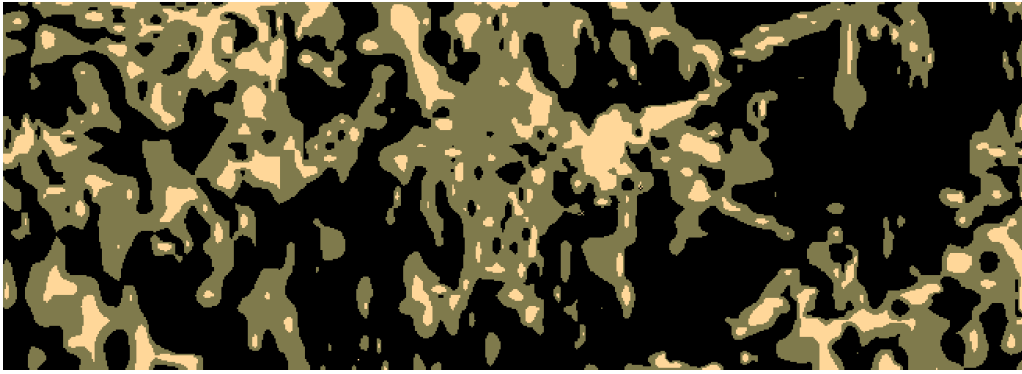
2.1.5 Steg 5. Fyll fält med lämplig färg

Det finns två alternativ när man ska fylla fälten med färg. Man kan välja färger ur en mängd med standardfärger eller så skapar man sina egna färger. Man väljer då färg kring topparna i bildens färghistogram. Färgen ges av H-komponenten i HSV-representationen av bilden. För bästa kamouflageresultat bör man välja de mest representativa färgerna. Detta kan göras manuellt eller med en automatiserad klustringsmetod baserad på en Gaussmixtur modell [1].

Första alternativet använder standardfärger som redan finns framtagna för applikationen. Andra alternativet utgår från bildens H och S värden. Då använder man histogrammet för att välja färginnehållet. Ur histogrammet väljs 2 eller 3 typiska färger, se Figur 5 och Figur 6. Detta görs antingen genom att ta största topparna eller de mest representativa kulörerna i histogrammet. Detta kan göras genom analys och anpassning av multipla Gaussfördelningar eller manuella bedömningar.



Figur 5. En bild framtagen enligt beskrivningen i texten där färgerna valts med hjälp av Gaussmixturanpassning.



Figur 6. Bilden är en inzoomad del av bilden i Figur 5 för att visa hur mönstret ser ut i olika skalor.

Denna metod har inte utvärderats så vi vet inte hur lätt eller svårt det är att bestämma en representativ miljö. Om man har en given miljö vet vi att det går att skapa kamouflagemönster enligt den ovan beskrivna metoden.

Sedan denna metod togs fram har stora framsteg gjorts inom maskinlärning med artificiella neurala nätverk (Deep Learning). Stora framsteg har gjorts inom analys av bilder så som detektion, klassificering och identifiering av objekt. Liknande metoder har också visat sig kunna generera artificiella mycket verklighetstrogna bilder. Man använder då två nätverk som samtränas. Det ena nätverket skapar verklighetstrogna bilder och det andra nätverket ska skilja på verkliga och skapade bilder. När näten tränas mot varandra så får man en generator som kan skapa verklighetstrogna bilder. Denna metod borde ha goda förutsättningar att kunna användas för att skapa kamouflagemönster.

3 Internationella samarbeten

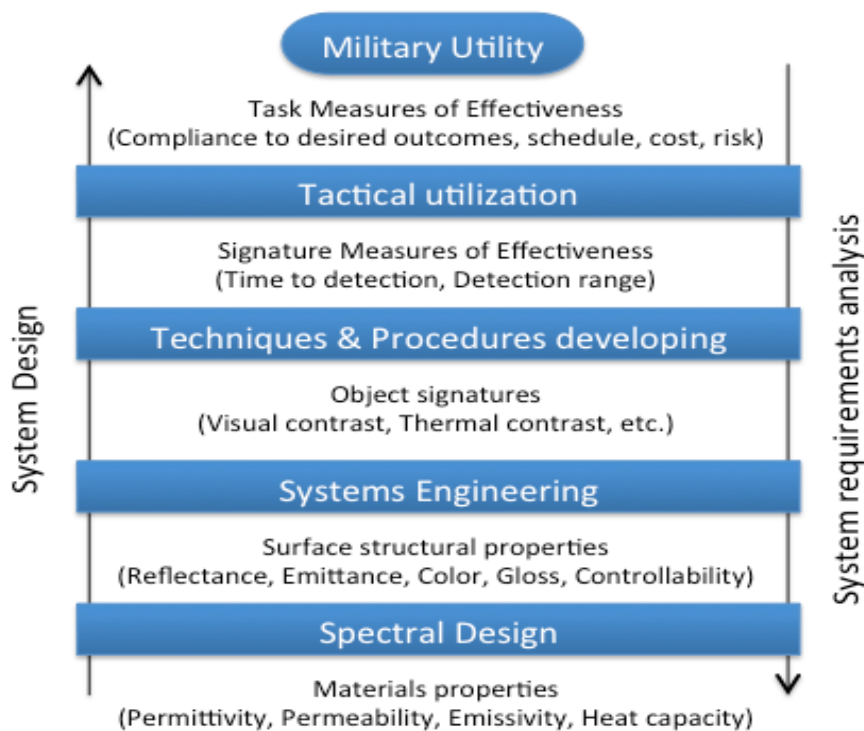
3.1 SCI-287

Inom Natos SCI-panel leder FOI gruppen (System Concepts and Integration) SCI-287 med titeln "Assessment Methods and Evaluation of Camouflage in an Operational Context". Gruppens arbete startade 2016 och pågår, efter att RTB (Nato Science and Technology Board) beviljat ett års förlängning, till slutet av 2019. Deltagande länder, förutom ordförandelandet Sverige, är Australien, Frankrike, Nederländerna, Rumänien, Storbritannien, Tjeckien, Tyskland och USA.

I ett tidigt skede genomfördes en workshop med militärer från flera av de deltagande länderna bland deltagarna. Syftet var att enas om realistiska och militärt relevanta scenarier att användas vid utvecklingen av värderingsmetoder. I scenariobeskrivningarna ingår bland annat uppdrag, väder, ljusförhållanden, egna och motståndarens fordon och ett relevant dynamiskt tidsförlopp.

Ambitionen är att i möjligaste mån hålla informationen från projektet på en öppen nivå. Därför tittar vi i första hand på generiska fordon eller äldre verkliga fordon. För att behålla relevansen kommer dock sannolikt vissa resultat att bli hemliga.

En inventering har gjorts av tillgängliga modellerings- simulerings- och värderingsprogramvaror. Inventeringen har omfattat både programvaror som utifrån en bild eller bildsekvens genererar ett godhetsmått på maskeringen och programvaror för datainsamling och analys av observationsförsök med mänskliga observatörer, både för observation av riktiga objekt i en realistisk omgivning och fotosimuleringsförsök. Målet är att kunna utföra en värdering längs hela kedjan från materialegenskaper till militär nytta, se Figur 7.



Figur 7. Illustration av värderingskedja upp till militär nytta

3.2 Informationsutbyte SE-UK inom ramen för annex 61

Information exchange agreement nr 61 (informationsutbytesavtal, IEA61) mellan Sverige och Storbritannien möjliggör utbyte av information som berör kamouflage och signaturanpassning inom ett brett område men framförallt det som berör materialteknik ämnad för signaturanpassning. IEA61 signerades i april 2015 och gäller t.o.m. april 2019. Då det finns ett ömsesidigt önskemål att förlänga avtalet förbereds detta nu. Ett utkast finns och granskas för Sveriges del av FMV:s jurister.

Sedan april 2015 har ett flertal formella och informella möten och en konferens arrangerats, samt ett flertal dokument utbytits. Flera studiebesök (site visits) vid olika laboratorier har genomförts på båda sidor, och representation från Storbritannien har närvarat vid fältmätning av fordon i Sverige.

Det har varje år sedan avtalet undertecknats arrangerats ett mer formellt arbetsmöte (workshop) växelvis i Sverige och Storbritannien. I Sverige har mötena hållits hos FOI i Kista (jan 2016) och Linköping (april 2017). I Storbritannien har mötena hållits hos QinetiQ (juni 2015, mars 2016). Nästkommande möte ska hållas i Storbritannien hos DSTL Porton Down, i november 2018.

Gemensamt för alla möten är att deltagarna representerar myndigheter, akademi och industri från båda Sverige och Storbritannien. I samband med mötena har det genomförts studiebesök till olika laboratorier i Sverige och Storbritannien. Vissa delar av mötena har varit reserverat för enbart deltagande från myndigheter. Utanför de formella mötena har informella möten hållits i samband med olika konferenser.

I mars 2016 genomfördes (av FOI och QinetiQ) konferensen Advances in Camouflage Science & Engineering (ACSE) vid Institute of Materials i London. Huvuddelen av deltagarna kom från Sverige och Storbritannien.

Inom ramen för nuvarande avtal har ett begränsat samarbetsprojekt startats med mål att jämföra mätresultat från olika instrument (hos FOI och QinetiQ) som bygger på samma metod, s.k. bidirection reflection distribution function (BRDF). En gemensam rapport skrivs och planer finns för att presentera resultaten på en vetenskaplig konferens. Under kommande avtalsperiod planeras en mer omfattande mätserie med prover som har större relevans för militära tillämpningar.

Det finns även intresse för mer krävande aktiviteter som t.ex. fältprov i arktisk miljö.

Under tiden som IEA61 har funnits har de flesta aktiviteter haft som mål att skapa ömsesidigt förtroende och för att identifiera möjliga samarbetsområden. De senare arbetas in i det kommande avtalet.

En bieffekt av IEA61 har varit en förstärkt växelverkan i Sverige mellan myndigheter (FMV, FOI), akademi (Uppsala Universitet och Linköping Universitet) och industri (BAES Hägglunds, Saab Aero, Saab Dynamics, Saab Barracuda, Saab Applied Composites).

3.3 SPEC

Slutrapporten från (European Defence Agency) EDA-gruppen SPEC, ”Specification of European Camouflage” blev klar 2015 [2]. Arbete har under 2016-2018 bedrivits på sparlåga, dels med planering inför en nästa avtalsperiod och dels med ett sk. ”round-robin-test” av olika kamouflagenät. FOI har deltagit i 2 möten vid EDA i Bryssel.

Mätningar har genomförts vid FOI vad gäller nätprovns reflektionssegenskaper i VIS/NIR samt radaregenskaper, se Figur 8. Testen utfördes enligt utföranderekommendationen i SPEC-rapporten mot ett franskt kamouflagenät samt mot ett nätprov från Saab Barracuda som testade att tillverka ett nät som skulle uppfylla SPEC-kraven.

Mätresultaten presenterades och diskuterades vid möten i Bryssel. Skillnader i resultat mellan svenska, franska och tyska mätningar återstår att analysera.



Figur 8. Det franska nätet på ”mätgaffel” vid radarmätplats Lilla Gåra.

4 Modellering och simulering – termiska egenskaper

Målsättningen för detta arbete är att beräkna den infraröda signaturen för en T-72 med och utan kamouflage av typen Mobile Camouflage System (MCS). Signaturen har beräknats med programvaran TAIthermIR från Thermoanalytics Inc. [3] med modeller framtagna inom FOI. Modelluppbyggnaden av T-72 stridsvagnen utgick från kommersiella CAD-modeller som anpassats utifrån lasermätningar som utfördes på en befintlig stridsvagn. Stridsvagnens kamouflage är ett kamouflage-set, Mobile Camouflage System (MCS), för montering på befintliga stridsvagnar framtaget av Saab Barracuda, Gamleby. Kamouflage-setet är uppbyggd av olika kamouflagepaneler, byggda med olika mjuka och halvmjuka isolerande material, monterade direkt på vagnen och för vissa av delarna med support bestående av enklare stativ.

TAIthermIR är en termisk modelleringsprogramvara som används för att förutse temperaturfördelningen i konstruktioner som fordon, fartyg, flygplan, byggnader eller människor. Med programmet kan de stationära eller dynamiska termiska tillstånden för exempelvis markbaserade fordon beräknas. Programmet använder skalmodeller med endimensionell beskrivningar av material. Modellen kan simulera värmeöverföring genom ledning mellan olika delar inom modellen och omgivningen, med konvektion mot flöden inom eller utom modellen och genom strålning med andra delar eller med omgivningen.

Den simulerade infraröda signaturen har jämförts med signaturmätningar som genomfördes utanför Skövde, 21-24 augusti 2017 av FMV och Saab Barracuda med stöd från FOI. Vid mätningarna användes två T-72 stridsvagnar, en T-72 stridsvagn utan kamouflage och en stridsvagn utrustad med Saab Barracudas MCS kamouflage.

4.1 Simulerings modeller

Vid signatursimuleringarna användes en simuleringsmodell av stridsvagnen T-72 som i senare simulering kläddes med en modell av Mobil Camouflage System (MCS). Det innebär att alla antaganden och kompromisser som gjordes vid simuleringen av den okamouflerade modellen finns kvar vid simuleringarna som gjordes med MCS-modellen.

Modellerna för simulering av stridsvagnen T-72 byggdes på en kommersiell CAD-modell av T-72. Då CAD-modellen i ursprungsskicket skiljde sig från de T-72 stridsvagnar som användes vid signaturmätningarna så krävdes ett stort antal förändringar. Dessa förändringar byggde på genomförd laserskanning av en verklig stridsvagn, ett antal stillbilder och kunskaper om uppbyggnaden av T-72 stridsvagnarna, vilka beskrivs i kommande rapport [5].

4.1.1 MCS CAD-modell

Kamouflaget, MCS, för T-72 bestod av ett antal paneler, bestående av flera skikt av bland annat isolerande material, som fästs på T-72 och som täcker alla dess ytor utom utblickar och sikten

För att kunna klä den verkliga T-72:an i MCS-kamouflage monterades ett antal metallstrukturer på vagnen. Dessas uppgift var att skydda MCS-kamouflaget från direktkontakt med heta ytor på vagnen samt underlätta in- och utflöde av luft till motorn.

Skyddsstrukturerna utgörs av fyra separata strukturer. En värmesköldskanal som leder ut de varma avgaserna bakom vagnen. En struktur som hindrar MCS-kamouflaget från vara i direktkontakt med ytan ovanför avgasutblåset. En burliknande struktur över varmluftsutblåset ovanför motorn samt en snorkelliknande struktur ovanför luftinsuget till motorn.

MCS-kamouflaget modellerades över modellen på T-72:an, enbart med hjälp av fotoreferenser. Modelleringen fokuserade på att återskapa de ingående panelerna i MCS-kamouflaget samt att sömmar och möten mellan panelerna placeras på rätt plats. MCS-kamouflaget består av ett ganska tjockt och styvt material men dess egentygd gör att en viss mängd veck uppstår. Dessa veck modellerades in i modellen av MCS-kamouflaget. I Figur 9 visas en fotoreferens av MCS-kamouflaget och Figur 10 visar den färdiga modellen av MCS-kamouflaget.



Figur 9. Stridsvagn T-72 klädd i MCS-kamouflage.



Figur 10. MCS-kamouflaget till stridsvagn T-72 med modellerat i Maya.

Partier som är skuggade av andra delar vid scanning och fotografering saknar också dokumentation i referensmaterialet. Exempel på sådana är skrovsidorna bakom banden och hjulen. Dessa partier fick tolkas hur de skulle kunna se ut med baserat på referensmaterialet.

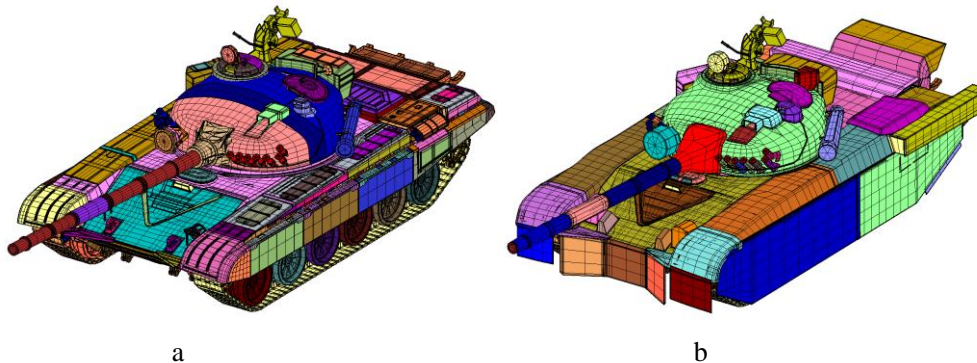
4.1.2 Infraröd signaturmodell i TAIthermIR

TAIthermIR-programmet som används vid signatursimuleringarna kan importera CAD-modellerna (.obj-filer) direkt. Den importerade modellens alla delar tilldelas egenskaper som materialtyp, materialegenskaper som antal lager, skiktjocklek, skiktmaterial, starttemperatur på bak- och framskikt, egenskaper på fram- och baksidan som exempelvis färg och konvektionsdata. Fordonsmaterialdata för både T-72 och MCS måste anges i simuleringprogrammet. Några av de olika materialegenskaperna stöds inom programmet, till exempel modeller för konvektion och BRDF-funktioner. Viss materialdata till stridsvagn hämtades från referens [4].

TAIthermIR använder ett annat filformat (.tdf) när modellen sparas. I deras filer sparas alla material- och termiska data. Kör- och hastighets-profiler och väderdata läses in inför simulering från speciella ascii-filer, därefter sparas dessa indata i den speciella TAIthermIR-filen.

Varje del är sammansatt av en eller flera grupper av polygoner. Varje grupp av polygoner ges likartade material- och initiala temperatur-egenskaper. Ett exempel är uppdelningen av stridsvagnens torn som är gjutet i ett stycke men som har olika tjockt pansar i

framåtriktningen än uppåt eller bakåt. Det gjorde att tornet delades upp i olika grupper av polygoner som har olika egenskaper, se Figur 11. Trots variationer i antal lager, tjocklek och material sitter tornets grupper av polygoner ihop och värmen leds mellan grupperna.



Figur 11. Stridsvagnsmodeller av T-72 utan (a) och med (b) MCS uppdelad i grupper av polygoner. Varje grupp ges likartade egenskaper gällande material och initial temperatur.

Liknande delar kan ha initialt samma egenskaper men skiljer sig åt i temperatur efter några tidssteg i simuleringen. Exempel på det är bärhjulen som alla är lika men påverkas olika vid kontakt, konvektion och strålning, beroende på placering på vagnen.

Modellen utrustas med termiska källor eller sänken. Ett exempel är modellens motor med tillhörande luftflöden för avkyllning eller avgasutsläpp. Då stridsvagnen är utrustad med en vattenkyld dieselmotor förmodades dess yttre temperatur öka från initialtemperatur till en maxtemperatur vid full drift. Detta antaganden har gjort även för drivaxlar och närliggande delar.

4.2 IR-signatursimulering

En signatursimulering av ett objekt kräver beskrivning av objektet, som beskrivits i tidigare kapitel, men även en beskrivning av omgivningen och externa källor eller sänkor såsom t.ex. lufttemperaturen och solinstrålning. Vid dessa simuleringar användes väderdata hämtade från den väderstation som användes vid signaturmätningar utanför Skövde. Dessa data inkluderar solinstrålning, vind, temperatur m.m. Exempel på väderdata ges i samband med beskrivningen av signaturmätningarna i Skövde.

I dessa simuleringar har en standardomgivning använts vars homogena egenskaper definieras automatiskt av programmet utifrån inläst väderfil.

Den fullt parametersatta modellen, kompletterad med kurvor för temperaturvariationen hos vissa delar, samt väderdata och kördata för stridsvagnen, med motorstatus, hastighet samt körriktning, ger möjlighet att fullfölja simuleringen. För att förenkla hanteringen användes parametrar för kördata från en tidigare simulering varvid endast motorstatus och hastigheter justerades medan körriktningen motsvarar en sträcka huvudsakligen i nordvästlig riktning.

De tidpunkter som valdes att simulera representerar framförallt sen kväll eller natt. Det betyder att simuleringssklockan startade vid kl. 13 och simuleringen stegade sedan med en timmes-steg fram till kl. 21.00, därifrån med tio minuters-steg fram till kl.22:30 då stegen motsvarade 5 minuter. I resultatet (simuleringsbilder) finns tydliga variationer mellan stegen inom 5-minutersintervallerna. Detta uppfattas som effekter av vädervariationer men antas även bero på att simuleringarna inte har stabiliserats. Det kan eventuellt åtgärdas med tätare simuleringsteg i tid.

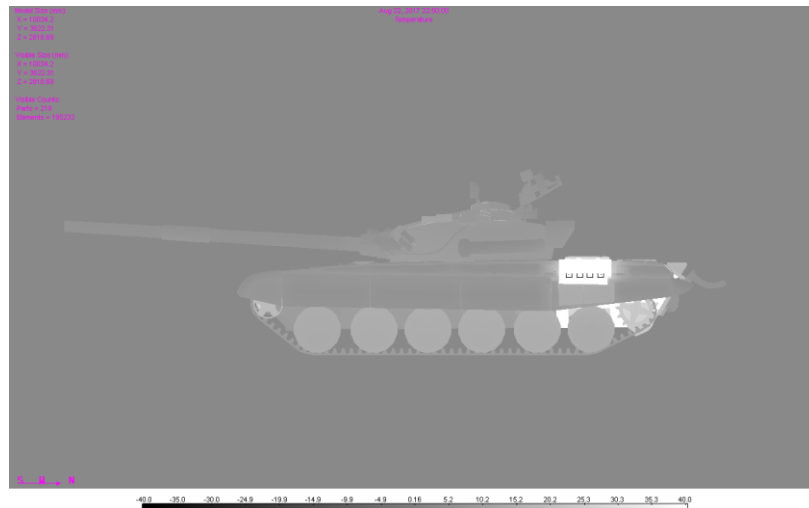
Bilderna från simuleringarna visar temperaturen och inte strålningsnivån för respektive våglängdsområde som används i IR-kamerorna.

4.2.1 Stridsvagn T-72 utan MCS

Signatursimuleringarna som genomfördes motsvarar sen kvällstid eller natt situationen. Exempel på bilder från simuleringarna visar stridsvagnens olika delars temperatur. Vissa delar är s.k. överexponerade, exempelvis avgasröret, då dynamiken i bilderna valts för att ge tydliga signaturvariationer hos större delen av vagnen. Bilderna från simuleringarna visar temperaturen och inte strålningsnivån för respektive våglängdsområde som används i IR-kamerorna.

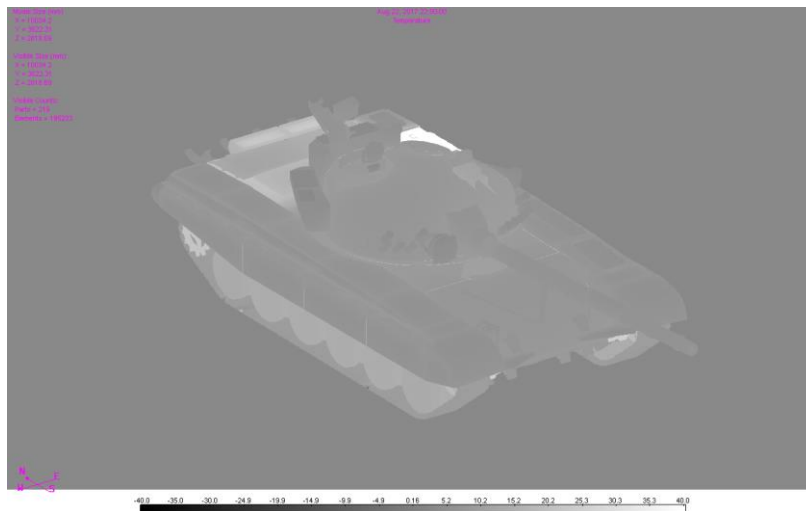
Stridsvagn T-72 största strålningsmässiga bidrag till IR-signaturens kommer från det upphettade avgasröret på fordonets vänstra sida liksom vid kraftr transmissionen vid drivhjulen längst bak. Signaturen bakifrån visar tydligt det uppvärmda motorrummet och de varma delarna som tillhör transmissionen från motor till drivhjul som drivaxlar samt infästningar, lagerhus etc., se Figur 12. Stridsvagnens tjocka pansar, tjocka gjutdelar och tjocka sammansatta plåtar etc., i både stridsvagnskrov och torn ger en fördröjning i anpassningen av ytornas temperatur.

Stänkskärmar är av tunnare plåt än skrov och torn samtidigt som stänkskydd längs hela stridsvagnssidorna och delvis över banden bak är av gummi. Både den tunnare plåten och gummit ändrar temperatur snabbare än skrov och torn exempelvis vid soluppvärmning eller nerkyllning pga. in- och utstrålning.



Figur 12. Temperaturen hos en okamouflerad och varmkörd T-72 stridsvagn där signaturen är beräknad med simuleringsprogrammet TAIThermIR.

Utrustning som lampor med deras skyddsräcken, packningslådor och förvaringsrör samt rökkastare som är monterade på tornet är också av tunnare material. Även dessa ytors temperatur förändras snabbare.

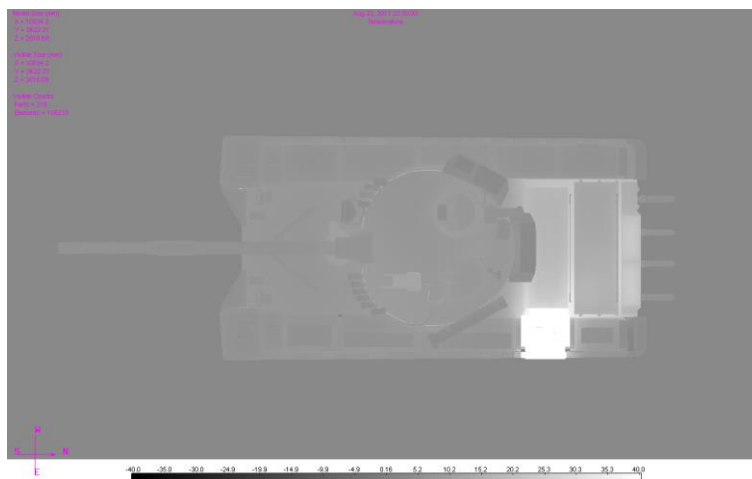


Figur 13. Temperaturen hos en okamouflerad och varmkörd T-72 stridsvagn där signaturen är beräknad med TAIthermIR.

Larvbanden samt bär-, driv- och spännhjul antar olika temperaturer beroende på drifttillstånd och väderlek. Simuleringen av dessa signaturer utnyttjar idag inte hela TAIthermIR-programmets kapacitet.

Stridsvagnstornet är avrundat, relativt lågt och har en låg temperatur. Dock har luckorna till tornet något högre signatur och temperaturen vid tornkransen är högre. Detta är beroende på omgivningstemperaturen och temperaturen i vagnen.

Uppifrån är det framförallt avgasutblåset samt plåtar ovanför utblåset som ger stora signaturbidrag. Hela bakkroppen på stridsvagnen är varm och har som varmkörd en avvikande temperatur från övriga delar på stridsvagnen, Figur 14.



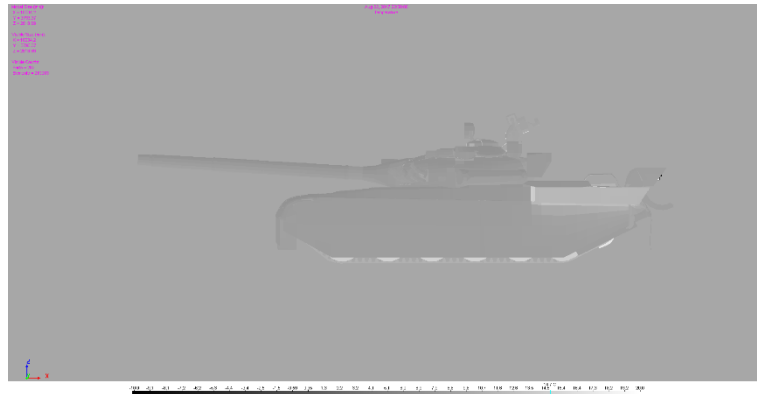
Figur 14. Temperaturen hos okamouflerad varmkörd T-72 stridsvagn sett ovanifrån beräknad med TAIthermIR.

4.2.2 Stridsvagn T-72 med MCS

Signatursimulering av T-72 stridsvagn med MCS kamouflage genomfördes för natt och sen kväll situationen som i exemplen med stridsvagn utan MCS. Bilderna från simuleringarna visar temperaturen och inte strålningsnivån för respektive våglängdsområde som används i IR-kamerorna. Detta då det är lättare att få en känsla för variationen i temperatur än i strålningsnivå.

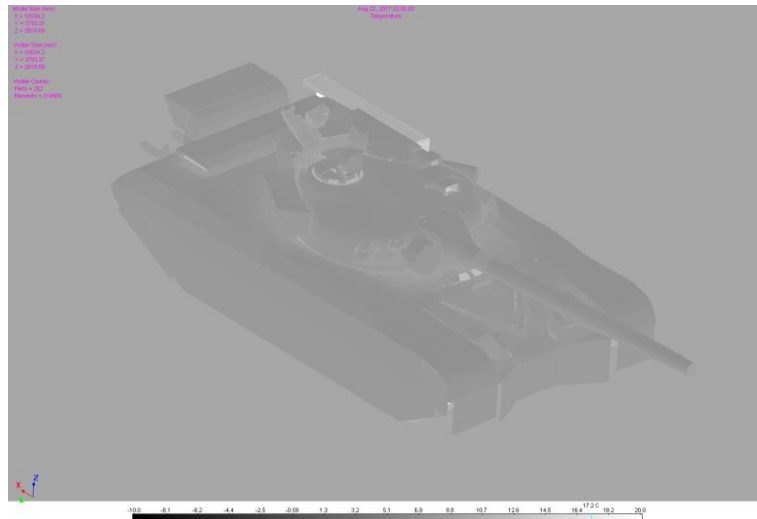
MCS simuleringen genomfördes med exakt samma T-72 modell i botten med alla materialegenskaper, tjocklekar, initialtemperaturer etc. men med den skillnaden att MCS modellen är placerad över T-72 modellen. Detta har förändrat temperatursignaturen till både karaktär och storlek.

Stridsvagnens vänstersida har en betydligt lägre temperatur (speciellt maxtemperatur) och lägre strålningsnivå då det heta avgasröret med omgivande plåtar samt den bakre delen av stridsvagnskarossen (med motor och drivlinor) inte syns som fallet utan MCS, se Figur 15. Det förlängda MCS-avgasröret med isoleringen har värmts upp betydligt men bildar inte alls en sådan extrem strålkälla som ytorna hos den okamouflerade stridsvagnen, vars temperatur låg flera hundra grader högre än övriga delar. Mindre delar av bärhjulens syns under MCS panelerna på sidan, men det är inte säkert att dessa skulle synas i verkliga fallet.



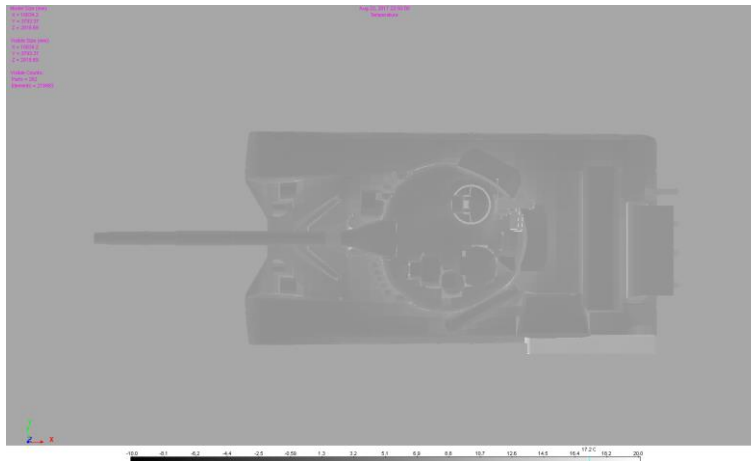
Figur 15. Temperaturen hos med MCS kamouflerad varmkörd T-72 stridsvagn sett från vänster sida, beräknad med TAIthermIR.

Snett uppifrån är effekten av den klara natthimlen så att signaturen blir påverkad av utstrålningen från alla fria ytor, speciellt där det tunnare material är betydligt kallare. De vertikala ytorna och ytor vars normal pekar mot andra ytor visar högre temperatur.



Figur 16. Temperaturen hos med MCS kamouflerad varmkörd T-72 stridsvagn sett snett ovanifrån på höger sida, beräknad med TAIthermIR.

IR-signaturen för T-72:an är markant annorlunda när MCS är monterat än utan. Detta gäller även för signaturen sett uppifrån. De i normalfallet (utan MCS) med tydligt uppvärmda ytorna över avgasrör och avgasutblås är i stort sett maskerade och kvardröjande skillnader är betydligt mindre och fördelade över en större yta.



Figur 17. Temperaturen hos med MCS kamouflerad varmkörd T-72 stridsvagn sett ovanifrån, beräknad med TAIthermIR.

Den simulerade T-72 stridsvagnens signatur sett framifrån visar upp två tydliga fläckar mellan nedhängande paneler som uppkommer då spännhjulens axlar har en hög temperatur, se Figur 18. Dessa axlar har ca 7-8°C högre temperatur än omgivningen. Bilderna av stridsvagnen från signaturmätningen (speciellt MWIR) antyder att delarna kan ha relativt höga temperaturer, se Figur 20.

Avgasröret uppvisar tydligt en högre temperatur än omgivande delar, ca 5-6°C högre, se Figur 17 och Figur 18. Den effekten syns inte så tydligt vid signaturmätningarna, se avsnitt 4.3.3. Signaturmätningarna visar tydligt effekten av utströmmande avgas som värmer detaljer nära avgasutblåset.

I övrigt visar tornkranen, prismor och siktessöppningar en högre temperatur även om temperaturen inte är kraftigt förhöjd.



Figur 18. Temperaturfördelning beräknad med TAIthermIR för varmkörd T-72 stridsvagn med MCS, t.v. framifrån samt t.h. bakifrån. (Skalan är densamma som tidigare figur).
Anm. Markörer för varmluftsblås ligger tyvärr kvar i figuren

Den beräknade temperaturen bakifrån visar att avgasutblåset är betydligt varmare än varmluftsutblåset. Dessutom syns värmen kring drivaxlarna och drivhjulen tydligt samt de övre delarna av larvbanden.

4.3 Resultat från IR-signaturmätningar, Skövde

Signaturmätningar av Stridsvagn T-72 med och utan kamouflage uppsättningen MCS genomfördes av FMV och Saab Barracuda (med stöd från FOI) under perioden 22-24

augusti 2017 på Skaraborgs regemente P4 övningsfält, ca 5,2 km sydost om Skövde centrum (järnvägsstationen). Vid signaturmätningarna filmades och stillbilda registrerades, med visuella samt mellanvågs- och långvågs infraröda kameror (MWIR samt LWIR kameror) från marknivå samt från eleverad-nivå, stridsvagnarna med och utan MCS. Här visas resultat från kvällen den 22 augusti.

Mätningar genomfördes med väl uppvärmda stridsvagnar vid olika tider på dygnet för att ge möjlighet att se signaturen vid olika temperaturer och belysningsförhållanden. Innan mätningarna började genomfördes en uppvärmning av vagnarna genom att de antingen kördes från garaget till övningsfältet eller genom varmkörning på en plats i närheten av mätplatsen. Varmkörning genomfördes antingen som 30 min körning på 3-4 växeln (av 7 växlar) alternativt som 15 + 15 min körning med 15 min vila emellan passen (samma pådrag och samma växlar).

4.3.1 Mätuppställning och kameror

Signaturmätningarna genomfördes med visuella och infraröda kameror, både långvågig och mellanvågsinfraröda våglängder. IR-kamerorna var monterade på en korg till Sky-lift vilket gjorde att bilder kunde registreras från 0° till ca 40° i elevationsled. Känsligheten hos båda IR-kamerorna ligger i närheten av 20 mK.

Den långvågiga infraröda (LWIR) kameran som användes har beteckningen FLIR T1030SC. Kameran är känslig inom våglängdsområdet 7,5 - 14 μm med ett totalt synfält på 28° × 21° och antalet effektiva detektorelement är 1024 × 768 (pixlar) vilket ger en rumslig upplösning av 0,47 mrad.

FLIR X 6540 SC-kameran användes för mellanvågsinfraröda våglängderna 3-5 μm (MWIR). MWIR-kameran har smalare synfält, 11° × 8,8°, men också ett mindre antal pixlar (640 × 512) vilket ger en rumslig upplösning av 0,60 mrad.

4.3.2 Väder

Vädret var i stort sett s.k. fint augustiväder under hela fältförsöket, med klar luft och inledningsvis molnfritt men med spridda moln på eftermiddagen, dock inte någon högsommarvärme. Även nätterna var klara vilket gjorde att temperaturen sjönk tydligt under natten.

Den 22 augusti skilde sig inte betydligt från de övriga dagarna. Klar luft med bra sikt som bröts delvis av vissa spikar, vilka eventuellt kan hänföras till rökpuffar från stridsvagnarna. Solen skymdes delvis av spridda moln under eftermiddagen. Temperaturen nådde upp till 17°C mitt på dagen men sjönk till halva den temperaturen under natten. Det vara svag till måttlig sydvästlig vind under dagen som avtog efter solnedgången.

Väder och solinstrålning mättes under hela fältförsöket och dessa data kommer att redovisas i kommande rapporter [5].

4.3.3 IR signaturmätningar

Signaturmätningarna redovisas inte fullständigt i denna rapport då målsättningen för mätningen var flerdimensionell. Här kommer endast några infraröda bilder att visas som jämförelse med signaturberäkningarna. Dessutom kommer endast bilder med MCS utrustningen visas, då signaturen för stridsvagn utan MCS har diskuterats i tidigare rapport, se [4].

4.3.3.1 MWIR signaturer

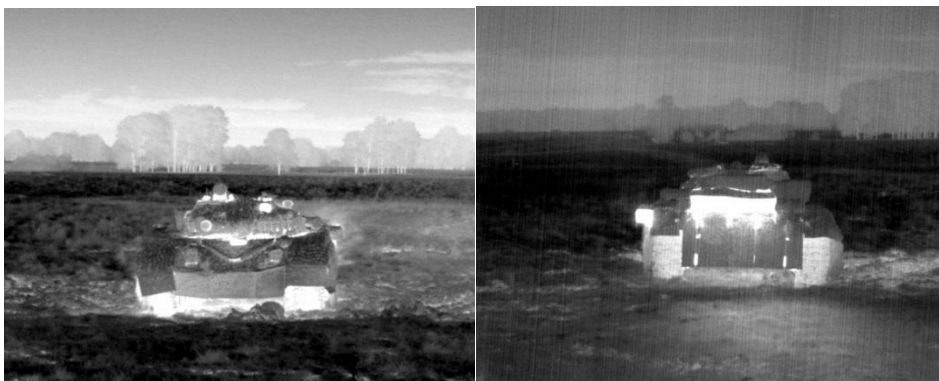
Signaturbilderna från MWIR-kameran saknade kalibreringsdata vilket betyder att dessa inte kan översättas till temperaturer och inte heller kan absoluta strålningsvärden avläsas.

Inte helt förvånande är att den MCS maskerade T-72 stridsvagnen har en signatur inom MWIR-våglängdsområdet som är dämpad i jämförelse med den omaskerade stridsvagnen. MCS-panelerna uppträder som täckande förutom vid skarvar och intag samt utblås. Omaskerade delar som sikten och prismor visar avvikande temperaturer men är relativt begränsade till fysisk storlek och strålningsnivåer.



Figur 19 MWIR- signatur av varmkörd T-72 stridsvagn med MCS, överst visas höger sida, undre bilden visar vänster sida.

MCS täcker de underliggande varma delarna av stridsvagnen väl speciellt sett uppifrån men sett framifrån eller bakifrån syns banden och uppvärmda delar från transmissionen, se Figur 20. De simulerade bilderna, se Figur 18, visar något sämre täckning, d.v.s. mindre glipor visades vid mätningen. Då panelerna har viss böjlighet kan graden av täckning variera.



Figur 20. MWIR- signatur av varmkörd stridsvagn med MCS, t.v. visas T-72 framifrån, t.h. visas T-72 bakifrån.

I Figur 20 har stridsvagnen varit stillastående på platsen under en kort tid med motorn igång. Här syns dess uppvärmning av marken tydligt. Signaturbilderna i Figur 21 visar också uppvärmningen av marken kring stridsvagnen. Detta är speciellt tydligt kring bakre delarna av stridsvagnen d.v.s. nära motorn, utblås och avgasutsläpp.



Figur 21. MWIR- signatur av varmkörd stridsvagn med MCS. Marken har värmts upp kring vagnen, speciellt bakom.

4.3.3.2 LWIR

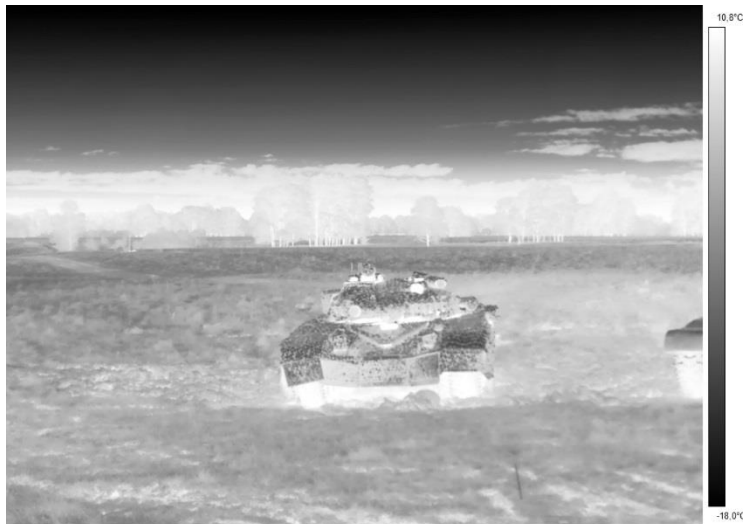
MCS kamouflerad stridsvagn T-72 uppmätt med kamera i LWIR-våglängdsområdet visar liknande IR-signatur som för MWIR-kameran. Den kamouflerade vagnen smälter in mycket bra med bakgrunden. Det finns dock en tendens att reflektera omgivningens temperatur i högre grad.

Ytterst täcks MCS av två lager av kamouflage-material var av det yttersta har ett stansat mönster som är fäst vid MCS-panelerna men som viker upp sig på grund av vinden. Detta bryter upp de onaturligt släta ytorna men exponerar delar av isoleringen med hög-emissiva ytor. Som en följd av detta kommer den kalla himlen att delvis reflekteras liksom den varma marken, se Figur 22.



Figur 22. LWIR- signatur från varmkörd stridsvagn sett från höger sida.

LWIR-bilden med stridsvagnen sett framifrån, se Figur 23 är registrerad vid samma tillfälle som Figur 20. Markens något högre irradians, jämfört med MWIR bilderna, gör att T-72 signaturen är något mer anpassad till omgivningen.



Figur 23. LWIR- signatur från varmkörd stridsvagn sett framifrån.

Bakifrån har stridsvagnen med MCS fortfarande ett par tydliga strålningskällor, se Figur 24. Dessa källor utgörs av den uppvärmda bakåtriktade varmluftutblåset samt avgasröret.



Figur 24. LWIR- signatur från varmkörd T-72 stridsvagn sett bakifrån, i stort sett samma skala som i föregående bild.

De varma delarna av stridsvagnen som syns igenom gliporna mellan MCS-panelerna i bakpartiet kommer inte att vara så starka i jämförelsen med varmlufts- och avgasutblåsen. Dynamiken i Figur 24 är kraftigt begränsad vilket gör att varmluftsutblåset och avgasutblåset ser nästan lika varma ut, vilket inte är fallet.

5 Modellering och simulering – radar

Här presenteras en metodik för beräkning av radarmålarean från ett godtyckligt stridsfordon beklätt med s.k. *Mobile Camouflage System* (MCS). Detta arbete beskrivs även i en separat rapport [7]. Metodiken är en vidareutveckling av tidigare arbete som redovisades i FoT-SAT 2013-2015 [6]. En väsentlig skillnad mot föregående modell är att geometrin för MCS-materialets garnering har laser-scannats istället, för som tidigare, skattats från mätningar via en elektromagnetisk modell. För att kunna validera metoden mot både lab-mätningar och mätningar på ett riktigt stridsfordon har metodik att bygga upp en detaljerad CAD-modell utifrån laser-scanning och foton av ett reellt objekt vidareutvecklats.

Den utvecklade elektromagnetiska modellen i kombination med metodik för framtagning av detaljerad CAD-modell, har validerats mot radarmålareamätningar. Valideringen har gjorts inom 8-12 GHz (X-Band) på ett antal plattor beklädda med olika sampel av MCS-material, samt mot en Östtysk stridsvagn av typen T-72, med och utan MCS-material. I detta arbete har även studerats hur MCS-materialets spridningsegenskaper påverkas av sömmar genom absorbenten och krökning av absorbenten. Studien visar att påverkan av sömmar och krökning utgör en för stor effekt på absorbenten absorptions- och spridningsegenskaper för att kunna ignoreras. Detta gäller speciellt då ett objekt med låg signatur bekläds med MCS-material

5.1 Metodbeskrivning av elektromagnetisk beräkningsmodell för MCS-material

Projektet syftar till att utveckla metodik för att kunna beräkna radarsignaturen för fordon beklädda med MCS vid 8-12 GHz (X-Band). MCS-materialet består av tre delar, garnering, se Figur 25, backning och en radarabsorbent. Backningen är enligt Saab Barracuda icke-ledande och beaktas inte i detta arbete. Med stor sannolikhet har dock backningen en relativ permittivitet ϵ_r som skiljer sig från de kringliggande materialen, vilket ger en elektromagnetisk påverkan som blir en osäkerhetsfaktor i modelleringen. Denna faktor skulle dock till stor del kunna kompenseras för vid skattningen av ϵ_r , för absorbentens distansmaterial, vilket dock inte görs i detta arbete.



Figur 25. MCS-materialets garnering med en inlagd tumstock.

För att kunna beräkna radarsignaturen för fordon som är beklädda med MCS vid X-band så krävs, p.g.a. beräkningskomplexitet, att s.k. asymptotiska elektromagnetiska beräkningsmetoder används. Vår ansats blir precis som i förra projektet [6] att använda geometrisk optik (GO) i kombination med fysikalisk optik (PO) för att beräkna refleksionsegenskaperna för MCS-materialet. Tidigare visade vi att PO i kombination med GO var en användbar metod för att kunna beräkna radarmålarea för objekt med MCS-material. Det beräkningsprogram som FOI, använder för GO/PO-beräkningar är SE-WORKBENCH EM från Oktal [8]. Den framtagna elektromagnetiska modellen förutsätter att beräkningsprogrammet kan hantera s.k. ”bump-mapping”. Den elektromagnetiska spridningsmodellen för ytor i SE-WORKBENCH EM har en funktionalitet för att hantera spridning från en ojämn yta, som kallas bump-mapping. Funktionaliteten är inspirerad av en teknik som används inom datorgrafik för att med hjälp av texturer introducera illusionen av att modellen innehåller en mer detaljerad geometrisk struktur än den i själva verket gör [8].

Modellen som utvecklats i detta projekt kan beskrivas i följande steg:

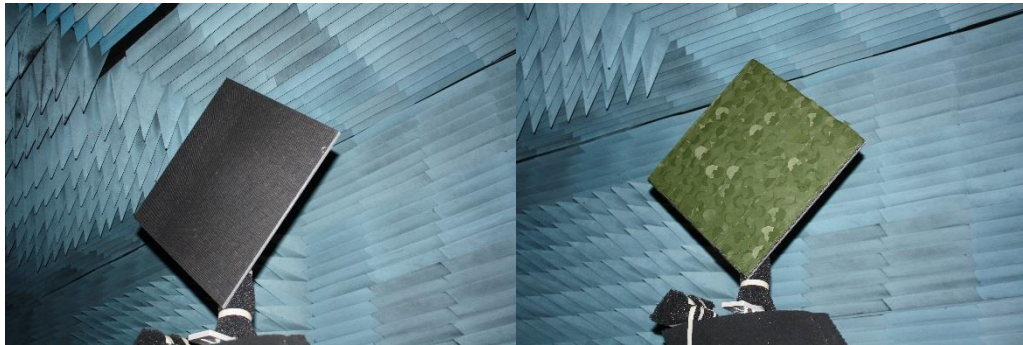
- Utföra laserscanning av ett antal oberoende sampel av garneringen (gärna > 10 för att få statistiskt underlag).
- Konvertera laserskannade sampel av garneringen till texturer, som kan användas i SE-WORKBENCH EM.
- Beklä beräkningsobjektets ursprungliga CAD-modell med radarabsorbent, se exempelvis Figur 10.
- Använd s.k. ”bump-texturering” för att texturera absorbenten med framtagna garneringstexturer. CAD-modellen med absorbent behålls och sparas separat.
- Beräkna spridningen koherent från objektet beklätt med absorbent. Endast bidrag från absorbenten inkluderas. Dock inkluderas direktskuggningseffekter av den ursprungliga modellen.
- Beräkna spridningen från garneringen och interaktioner mellan garnering och det obeklädda objektet. Här ingår även synliga delar av den ursprungliga CAD:en. Absorbentens spridningsbidrag ingår inte. Samma CAD-geometri som för absorbenten används men med en bump-textur på absorbenten. Här tas samtliga spridare med i PO-bidraget.
- Addera koherent det spridda fältet för absorbenten till spridda fältet för garnering och icke-beklätt originalobjekt. Resultatet för absorbenten multipliceras med garneringens tvåvägs transmissionsfaktor som betraktats som vinkeloberoende för denna typ av garnering.

Den framtagna modellen har stora likheter med den som utvecklades i FoT-SAT 2013-2015 [6] och kan därför ses som en vidareutveckling av denna. De stora skillnaderna mellan dessa metoder rör främst hur man hanterar garneringen. Tidigare laserskannades inte garneringen utan dess ytstruktur antogs vara slumpmässig med isotrop gaussisk höjdfördelningsfunktion och korrelationsfunktion. Korrelationslängden och höjdvariansen skattades via en matematisk spridningsmodell från radarmålareamätningar på MCS-materialet. En annan skillnad är att garnering och absorbent betraktades som *ett* objekt i föregående modell. Luftgapet mellan garnering och absorbenten ansattes till ett konstant värde som då var noll. Detta kan tolkas som att reflektionskoefficienten för MCS-materialet svarade mot en absorbent som låg klistrad mot garneringen. Denna ansats visade sig att fungera mycket väl, men utveckling av laserskanningsmetoder och CAD-modellering de senaste åren har möjliggjort att garnering kan CAD-modelleras i detalj. Detta har i sin tur möjliggjort en vidareutveckling av den förra modellen som innebär att mer generella och icke-isotropa garneringsstrukturer kan hanteras på ett mer noggrant sätt.

5.2 Validering

5.2.1 Validering mot mätningar på platta

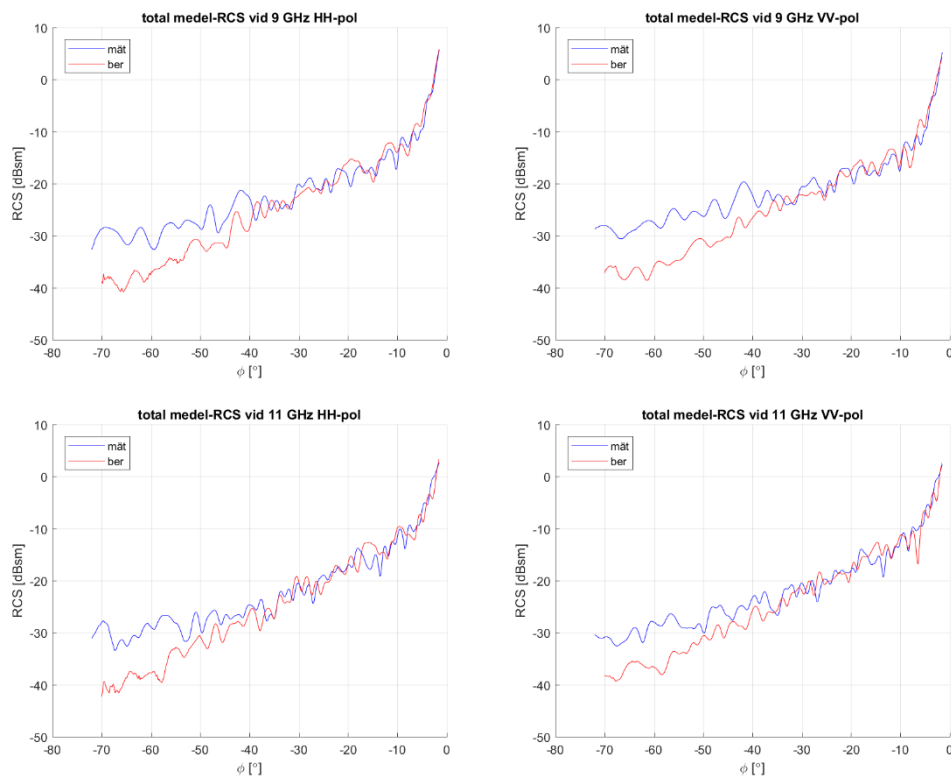
För validering av modellen har mätningar utförts på en plan platta med och utan MCS, se Figur 26. Mätningarna är utförda av Saab Dynamics. Mätningarna är gjorda i både HH- och VV-polarisation i frekvensbandet 7-13 GHz. För att få statistik från garneringen har radarmålarean mätts upp för 12 olika MCS-sampel.



Figur 26 (a)-(b). Visar den metalliska plattan beklädd med absorbent (a) och med garnering (b). I nedkant av figur (b) syns pylonen och stag på vilken plattan är monterad. Dessa är beklädda med radarabsorberande material. Foto Saab Dynamics.

Mätkonfigurationen är semi-monostatisk och mätningarna utförs i plattans Fraunhofer-närfält [9] vilket gör att skillnader fås jämfört mot plattans monostatiska radarmålarea vilken definieras i plattans fjärfält. För att ta hänsyn till detta görs beräkningarna enligt samma geometri som mätningarna.

I Figur 27 ses resultat från mätningar och beräkningar. Vinkeln $\phi = 0^\circ$ svarar mot vinkelrätt infall mot plattan. Man noterar från Figur 27 att en mycket god överensstämmelse fås för vinklar på ϕ som är större än -40° . Naturligtvis noteras vissa mindre skillnader som härrör från statistiska fluktuationer mellan mättillfälle och laserskanning. Exempel på dessa är att ingen markering av MCS-materialets orientering gjorts vid mätningen. D.v.s. det finns ingen dokumentation av vad som var upp - ner, höger - vänster på samplen. Sedan har garneringen "rufsats" till mellan laserskanning och mättillfälle.



Figur 27. Resultat från mätningar (blå kurva), jämförda med beräkningar (röd kurva) vid 9 GHz (övre diagrammet) och 11 GHz (undre diagrammet) för HH-pol och VV-pol i vänster respektive höger bild.

5.2.2 Validering mot T-72

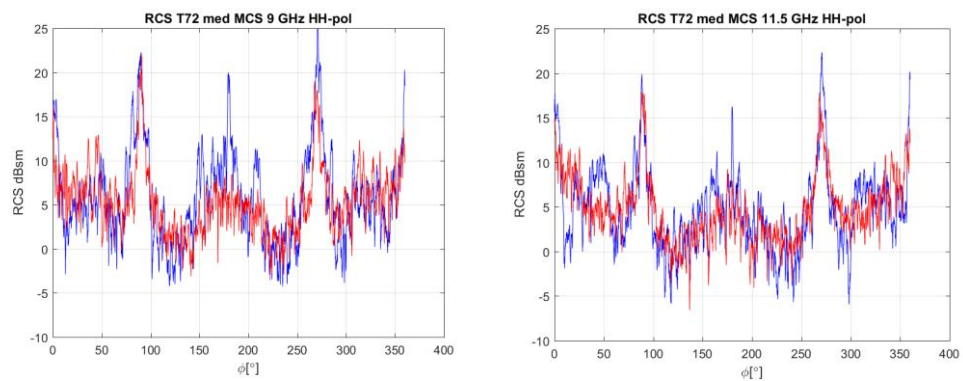
För att validera den framtagna beräkningsmetodiken med ett reellt stridsfordon valideras metodiken mot mätningar på en stridsvagn av typen T-72. I denna validering inkluderas MCS-materialets spridningsmodell, CAD-modellering och laserinmätning av valideringsobjektet. Mätningarna av radarsignaturen på T-72 stridsvagnen utfördes på FOI radarmätplats "Lilla Gåra". Vid mätningarna placerades stridsvagnen på mätplatsens stora vridbord och mätningarna utfördes från huvudbyggnaden utmed mätplatsens markmätsträcka se Figur 28. Mätningarna görs på marken medan beräkningarna görs i frirymd. För att minska markens påverkan placerades plåtskärmar på två ställen utmed sträckan. Dessa var vinklade så att radarsignalen som träffar dessa till stor del reflekteras bort. Höjden på skärmarna justerades så att siktlinjen från radarantennerna till vridbordet hamnar precis ovanför skärmarna. Reflexer från skärmarnas sidokanter minskades med absorberer.



Figur 28. Bild på Lilla Gåra, stridsvagn på vridbordet samt bild av stridsvagn med mobil maskering (MCS).

5.2.2.1 Jämförelse mellan uppmätt och beräknad RCS T-72 med MCS

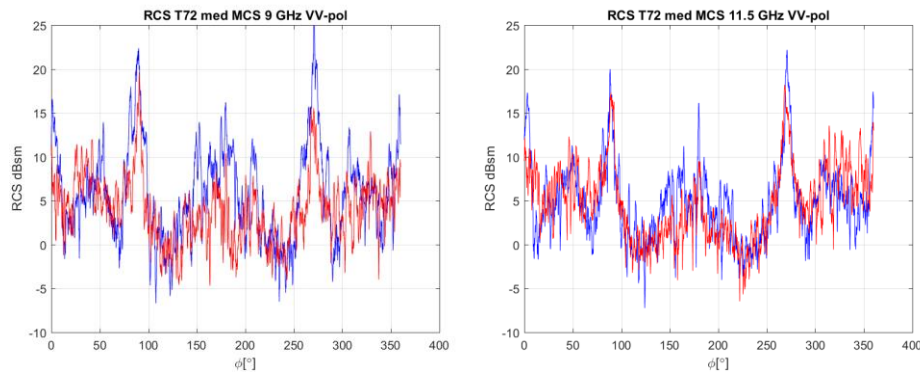
I nedanstående figurer visas radarmålarean och ISAR-bilder som funktion av azimutvinkel. I alla figurer motsvarar $\phi=0^\circ$ att stridsvagnen belyses rakt bakifrån. Högersidan motsvaras av $\phi=90^\circ$.



Figur 29. Visar radarmålarean, HH-polarisation, för MCS-beklädd T-72 vid 9 och 11,5 GHz som funktion av azimutvinkel. Röda kurvor visar mätningar och blå kurvor beräkningar.

I Figur 29 och Figur 30 jämförs radarmålarean från mätningar och beräkningar för HH- och VV-polarisation vid frekvenserna 9 och 11.5 GHz. För att få överskådliga figurer samt för att minska påverkan av inriktningsfel i mätningarna presenteras resultaten i form av flytande medelvärde över 1° . Man noterar från Figur 29 Figur 29en överlag god överensstämmelse mellan mätningar och beräkningar, även om beräkningarna överskattar mätningarna då stridsvagnens belyses rakt från höger eller vänster d.v.s då $\phi = 90^\circ$ och

270°, samt i området $160^\circ \leq \phi \leq 200^\circ$. Detta beror troligen till stor del på att i dessa vinklar syns stora MCS-ytor som ger höga distinkta spikar. Eftersom MCS-beklädnaden är modellerad utifrån foton kan ”felpekning” på ett par grader av dess normalriktning ge flera dB skillnad. Om MCS materialet hade tagits bort och satts dit igen hade förmodligen riktningen på ytorna ändrat sig och således också radarmålarean. Skillnaden mellan mätningar och beräkningar i detta område anses därför bero på statistisk variation i MCS materialets orientering.

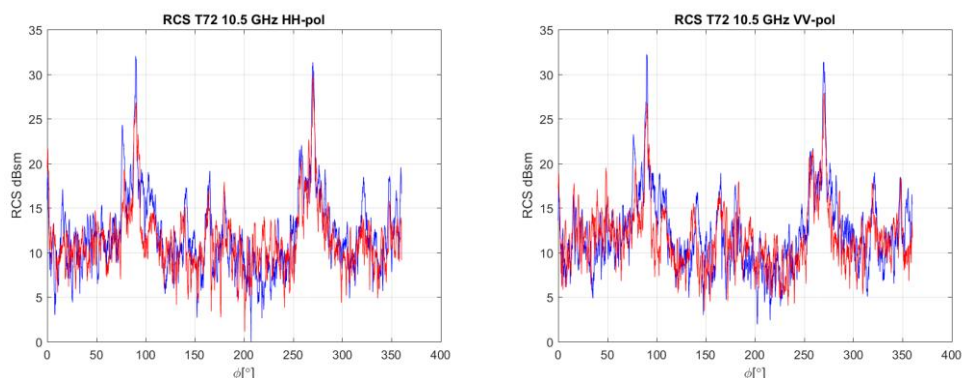


Figur 30. Visar radarmålarean, VV-polarisation, för MCS-beklädd T-72 vid 9 och 11,5 GHz som funktion av azimutvinkel. Röda kurvor visar mätningar och blå kurvor beräkningar.

Man noterar att samma kommentarer som gäller för HH-polarisation också gäller för VV-polarisation. Nivåerna är nästan desamma oberoende av polarisation vilket intuitivt stämmer eftersom absorberens dämpning är relativt oberoende relativt normalriktningen vid små infallsvinklar. Multipelspridningsbidrag dämpas ut och multipelspridare som drivband täcks till stor del av absorbern. Skillnaden mellan mätningar och beräkningar är dock något större för VV-polarisation vilket illustreras i Figur 32.

5.2.3 Jämförelse mellan uppmätt och beräknad RCS för T-72 utan MCS

För att undersöka hur bra får laserskannings- och CAD-modelleringsmetodik är jämförs radarmålarean för den obeklädda vagnen d.v.s. då hele vagnsytor kan betraktas som metalliska. Detta presenteras i Figur 31.



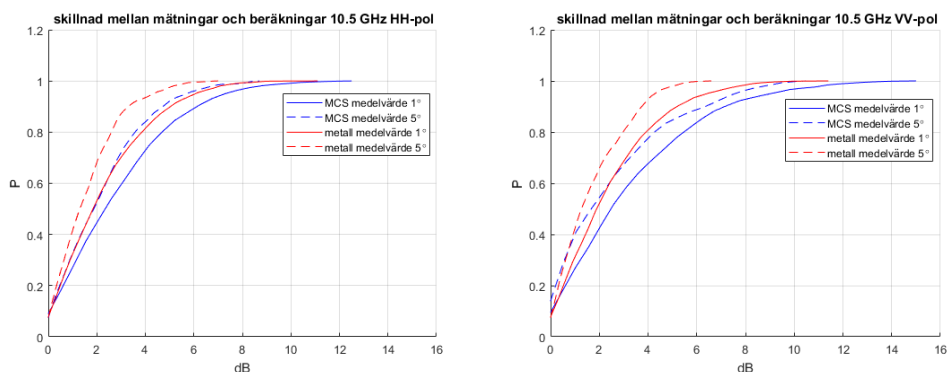
Figur 31. Visar radarmålarean för HH (t.v) och för VV-polarisation (t.v), för T-72 vid 10.5 GHz som funktion av azimutvinkel. Röda kurvor visar mätningar och blå kurvor beräkningar.

Vi ser i Figur 31 att väldigt bra överensstämmelse fås mellan mätningar och beräkningar för båda polarisationerna. Det man noterar är att beräkningarna ger högre målarean jämfört med mätningar då $\phi=180^\circ$ och 270° , d.v.s. när stridsvagnen belyses från sidorna. Detta

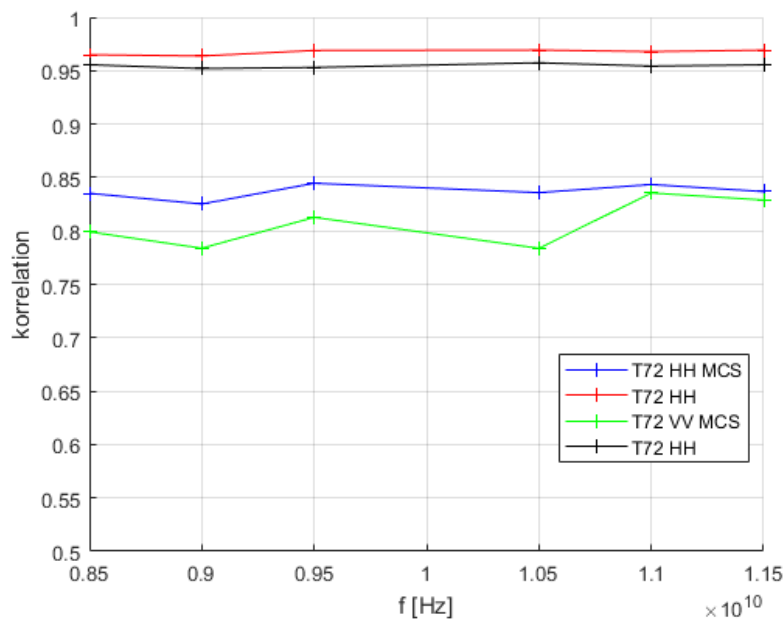
beror till stor del på att stänkskärmarna som täcker en stor del av drivbanden, i CAD-modellen är ”slätare/planare” än de verkliga skärmarna. Initialt modellerades skärmarna som helt plana strukturer vilket gav en ökning på ca 6 dB jämfört med beräkningsresultat då skrovligheten modellerats från punktmolnet. En annan osäkerhet som finns i beräkningarna är att skärmarna är av gummi vars tjocklek och permittivitet är okända. Istället användes ett typvärde av gummi för permittivitet och tjockleken skattades grovt utifrån foton. För enskilda frekvenser kan detta starkt påverka dämpningen av radarvägen genom interferenser inne i materialet, precis som för absorbenten. Vidare kan en del skillnader beror på flervägsutbrednings som förekommer i mätningarna.

5.2.4 Jämförelse mellan mätningar och beräkningar i representerade som korrelation och kumulativ sannolikhetsfördelning.

Det kan vara svårt att objektivt avgöra om överensstämmelsen mellan två kurvor är bra eller inte. Ofta görs en subjektiv bedömning baserat på erfarenhet för att avgöra om så är fallet. I detta avsnitt görs ett försök till en mer objektiv bedömning huruvida data stämmer väl överens. Detta görs genom att jämföra skillnaden, i dB, mellan mätningar och beräkning för varje vinkel och enskild frekvens. Skillnaden översätts sedan till en kumulativ fördelningsfunktion där sannolikheten att skillnaden skall understiga en viss nivå ges i Figur 32. Detta är dock inte ensamt ett tillräckligt bra mått av vad en god överstämmelse är, eftersom man då endast tar hänsyn till en nivåskillnad och inte, entydigt, likheten i kurvorna. För att inkludera även detta korskorreleras, i vinkelledd, mätningar mot beräkningar för ett antal diskreta frekvenser. Korrelationen görs genom att använda funktionen *xcorr* i Matlab. Resultatet visas i Figur 33. Vi ser att mycket hög korrelation fås för T-72 och hög korrelation fås för T-72 med MCS. Detta gäller för båda polarisationerna, men HH- är lite mer korrelerat än VV-polarisation.



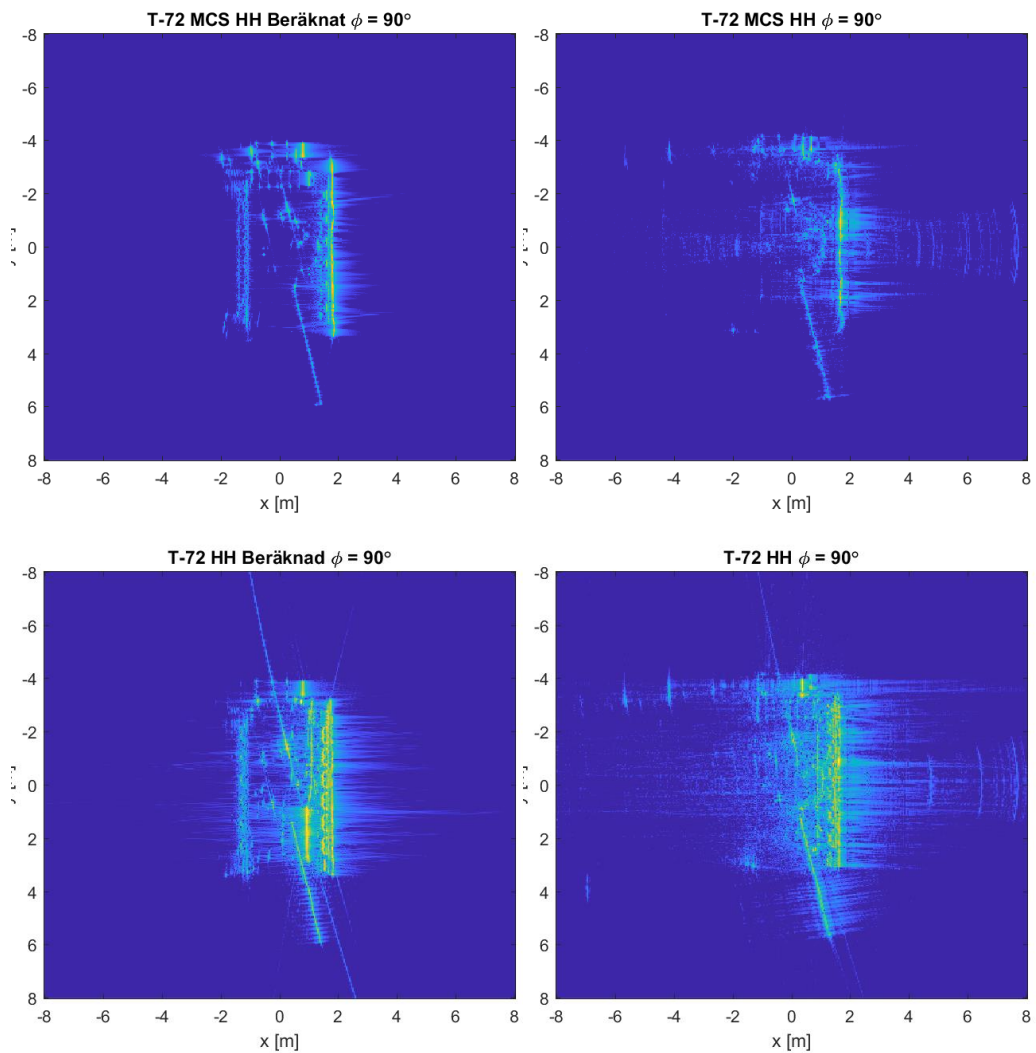
Figur 32. Visar sannolikheten att skillnaden, i dB, mellan resultaten från mätningar och beräkningar överstiger ett visst värde vid 10.5 GHz. Blå kurvor visar beräkningar, röda mätningar. RCS:en är medelvärdesbildad med 1° (heldragen) respektive 5° (streckad) innan skillnaden beräknats. Vänster figur visar HH- och höger figur VV-polarisation.



Figur 33. Visar max-korrelationen mellan uppmätta och beräknade data för ett antal diskreta frekvenser

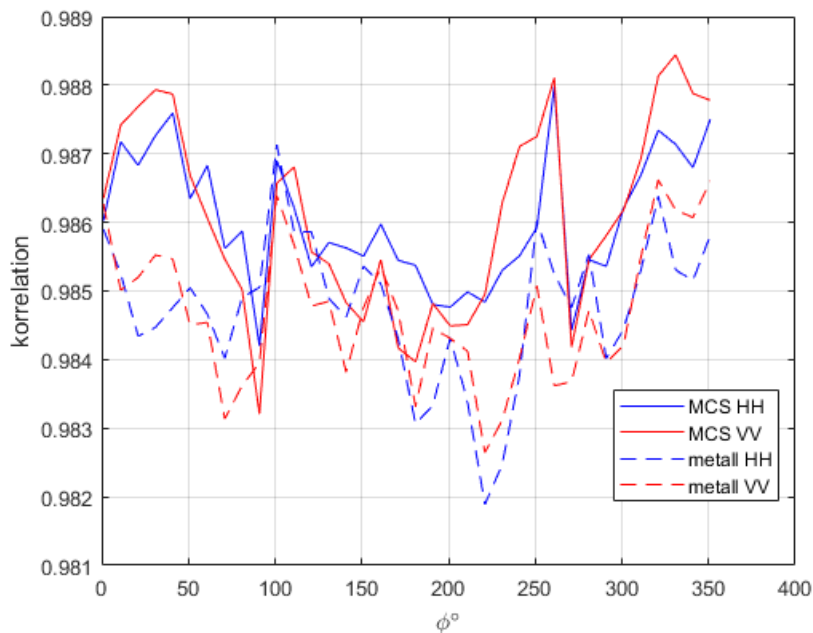
5.2.5 Jämförelse mellan ISAR-bilder genererade utifrån beräknade och uppmätta resultat

För att validera hur vår metodik fungerar mot en modern högupplösande SAR- eller ISAR-radar som ger en radarbild över objektets spridningscentra, jämförs ISAR-bilder genererade från beräknade respektive uppmätta resultat för T-72 med och utan MCS-material, se Figur 34. Man noterar att en mycket god överensstämmelse fås mellan uppmätta och beräknade bilder. Mindre skillnader noteras i form av de ränder som syns i mätdata, framförallt framför stridsvagnen i radarns belysningsriktning, samt att uppmätta bilder är något mer ofokuserade. Kombinationen av att man vid mätningarna har en markbakgrund och ett ofrånkomligt fasbrus kan ge detta. Det man kan notera är att vissa spridningscentra skiljer sig i åt i intensitet men att positionerna för dessa är desamma.



Figur 34. Visar beräknade (t.v) och uppmätta (t.h) ISAR-bilder av T-72 med (övre) och utan MCS (nedre) vid $\phi=90^\circ$. Upplösningen i bilden är ca 4 cm i både x- och y-led. Dynamiken i bilden är 50 dB.

För att göra en mer generell jämförelse mellan ISAR-bilder har sådana beräknats i 10-graders steg för båda polarisationerna, med och utan MCS och för både mätningar och beräkningar. En mer objektiv jämförelse än den som görs med ögat av resultaten från mätningar och beräkningar görs genom att mät- och beräkningsdata korreleras mot varandra i 2-dimensioner. Resultatet av detta visas i Figur 35.



Figur 35. Visar korrelations mellan uppmätta och beräknade ISAR-bilder för T-72 med (heldragen) och utan (streckad) MCS-material för HH- (blå) och VV-polarisation (röd). ISAR-bilderna är beräknade i steg om 10° .

Korrelationen visar, precis som de visuella ISAR-bilderna i Figur 34, att överensstämmelsen mellan beräknade och uppmätta bilder är mycket god. Korrelationen för samtliga fall är $> 98\%$. Värt att notera är att korrelationen för T-72 med MCS är större än korrelationen för den metalliska T-72, samt att någon större avvikelse mellan HH- och VV-polarisation inte finns. Detta var inte fallet när radarmålarean jämfördes för ett antal frekvenser. En förklaring till detta kan vara att T-72:ans geometri förenklas när den bekläs med MCS vilket gör att detaljer försvinner, något som i sin tur ger ”renare bilder”. Dessutom undertrycks vissa mätfelseffekter som inriktningsfel, kalibreringsfel och flervägsutbredning genom ISAR-processeringen, vilket resulterar i en bättre överensstämmelse med beräknade data.

5.3 Inverkan av sömmar på radarsignaturen för MCS

Inverkan på radarsignaturen av sömmar och avbrott i radarabsorbenten har undersökts genom att beräkna den monostatiska radarmålarean för kvadratiska plattor med längden 18 cm, för några olika typer av sömmar eller avbrott. Detta arbete beskrivs närmare referens i [7]. Nedan följer några slutsatser. Sömmar genom MCS komprimerar distansmaterialet lokalt. Detta förändrar absorbentens dämpningsegenskaper. Generellt sett, visar resultaten att både sömmens bredd och djup har betydelse, ju större deformationen är desto sämre blir dämpningen vilket resulterar i en högre radarmålarea. Störst är inverkan för polarisationsriktningar tvärs över sömmarna. Man ser i vissa fall kraftigt en försämrad radarabsorption (högre radarmålarea) jämfört med ett slätt material utan sömmar. För vinkelrätt infall förbättras absorptionen för några av sömmarna, detta beror på interferensfenomen och är frekvensberoende.

5.4 Inverkan av böjd absorber runt kanorr

Då kamouflagingsystemet böjs för att appliceras på ett underlag som inte är plant förändras absorptionsegenskaperna och därmed radarsignaturen. Exempel på ett sådant fall är då kamouflaget böjs runt kanorrret på en stridsvagn så som t.ex. T-72. En mindre, generisk studie för att undersöka detta har genomförts [7]. Slutsatser från detta är att då en radarabsorber böjs runt exempelvis kanter på en stridsvagn eller rundade strukturer såsom ett kanorr, kan dess absorptionsegenskaper kraftigt förändras jämfört med en plan absorber. Vidare bör man vara medveten om att en absorber kan ha god dämpning i det monostatiska fallet men vara dålig i andra spridningsriktningar

5.5 Sammanfattning och slutsatser

I detta arbete har en elektromagnetisk beräkningsmetod samt metodik för att beräkna radarsignaturen från ett godtyckligt fordon beklätt med s.k. *Mobile Camouflage System* (MCS) utvecklats. Den elektromagnetiska beräkningsmetoden är en vidareutveckling och utökning av en tidigare metod som presenterades i [FoT-2013-2015]. Den nya modellen inkluderar till skillnad från tidigare modell anisotropier i MCS-materialets garnering och baseras på att dess geometri har laser-scannats.

För att kunna validera metoden mot mätningarna har en metodik utvecklats som från laser-scannat data och foton översätter både garnering och mätobjekt till en textur och CAD-modell. Metodiken är generell och kan även tillämpas på andra objekt.

Den utvecklade elektromagnetiska modellen i kombination med utvecklad metodik har validerats mot radarmålreanmätningar inom 8-12 GHz (X-band) på ett antal plattor beklädda med olika samplar av MCS-material samt mot en stridsvagn av typen T-72 med och utan MCS-material. Jämförelse mellan resultaten från mätningar och beräkningar visar att, för en enskild frekvens, är sannolikheten att skillnaden mellan resultaten från mätningar och beräkningar skall understiga 4 dB ca 85%. Vid jämförelse av beräknade och uppmätta ISAR-bilder är likheten mellan bilderna större än 98%. Detta visar på en mycket god överstämmelse mellan data baserade mätningar respektive beräkningar.

I detta arbete har även en studie gjorts på hur de sömmar som fäster MCS-materialet garnering i dess absorber och hur en krökning av absorbenten påverkar dess spridnings- och absorptionsegenskaper. Studien visar att dessa effekter ibland kan vara signifikanta och göra så att absorbenten inte uppfyller de absorptionskrav som ställts på den. För lågsignaturobjekt är dessa effekter för stora för att kunna ignoreras.

6 Terrtex

Terrtex är ett programverktyg för utvärdering av signaturanpassningsåtgärder och är ursprungligen utvecklat av FOI. I projektet har BAE-Systems Bofors vidareutvecklat programmet och tagit fram en manual. I början av projektet har BAE och FOI haft ett möte med diskussion kring vidareutveckling av Terrtex. Vi har haft ett resultat/summeringsmöte, där FOI har tagit del av BAEs arbete och av vad de har kommit fram till.

Vid mötet diskuterades såväl begränsningar som möjligheter. Programvaran begränsas av för lite exempeldata. Framst saknas bilder på kamouflage i relevanta miljöer och avstånd. Ett framtida användningsområden skulle kunna vara t.ex. inom Nato gruppen SCI 287 (se 3.1) där syntetiska bilder kommer att genereras. Dessa skulle kunna användas för att bidra till att avhjälpa denna brist.

7 Deltagande i SAT-symposium

FOI deltog i SAT-symposiet som arrangerades av FMV 2018-05-03. FOI bidrog med ett föredrag ”Fördel sensorerna?”, ett försöksobjekt i form av en modell av MIG-plan samt följande sju postrar:

- Graphene – Signature Management
- Infrared signature simulation of combat vehicles with camouflage
- FOI participation in ALOMAS
Advanced Low Observables Materials & Structures
- Radarmätplats Lilla Gåra
- Military utility of camouflage
An international cooperation project on signature assessment in operational context
- Radarsignaturmodellering
- Metod för kamouflagemönster

8 Slutsatser

Projektet har på flera sätt bidragit till utvecklingen inom signaturområdet

Inom signaturmodelleringsområdet har beräkningar gjorts av radar- och IR-signaturen för en stridsvagn beklädd med mobilt maskering s.k. MCS. För radarområdet har detta krävt utveckling av ny beräkningsmetodik. Jämförande beräkningar och mätningar visar på mycket goda resultat.

Tidigare utvecklad metodik för framtagning av maskeringsmönster har dokumenterats.

Vidare har projektet bidragit i flera forskningssamarbeten inom signaturområdet både nationellt och internationellt.

9 Referenser

- [1] Christopher M Bishop, "*Pattern Recognition and Machine Learning*". Springer 2006.
- [2] "*Final report. Specification for European camouflage*", EDA rapport B-0722-ARM-GP, 2015
- [3] ThermoAnalytics product description, "*TAIThermIR*", www.thermoanalytics.com/products/taithermir, [Accessed 2018-10-03].
- [4] Ove Gustafsson, Tomas Hallberg, Jan Fagerström, Jimmy Berggren, Kristian Petterson, Niklas Wellander, "*Simulering av markfordons IR-signatur*", FOI-RH--1807--SE, 2017.
- [5] Ove Gustafsson, Pär Glendor, FOI-rapport i manuskript.
- [6] M. G. et.al., "*Modellering och simulering radar FoT SAT 2013-2015*," Saab Barracuda, Ra10776, 2015.
- [7] Magnus Gustavsson, Åsa Andersson, Pär Glendor, Rolf Jonsson, Mikael Karlsson, Nils Karlsson "*Metodutveckling för radarmålyteberäkning av objekt med mobilt maskeringssystem, MCS*", FOI-RH--2008--SE.
- [8] M. Gustafsson, "*Utvärdering bump-mapping i SPECRAY EM*", Linköping FOI-R--2271--SE, 2007.
- [9] A. Balanis Contantine, "*Antenna Theory Analysis And Design*", 2:nd ed: John Wiley & Sons, 1997.

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



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
164 90 Stockholm

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

www.foi.se