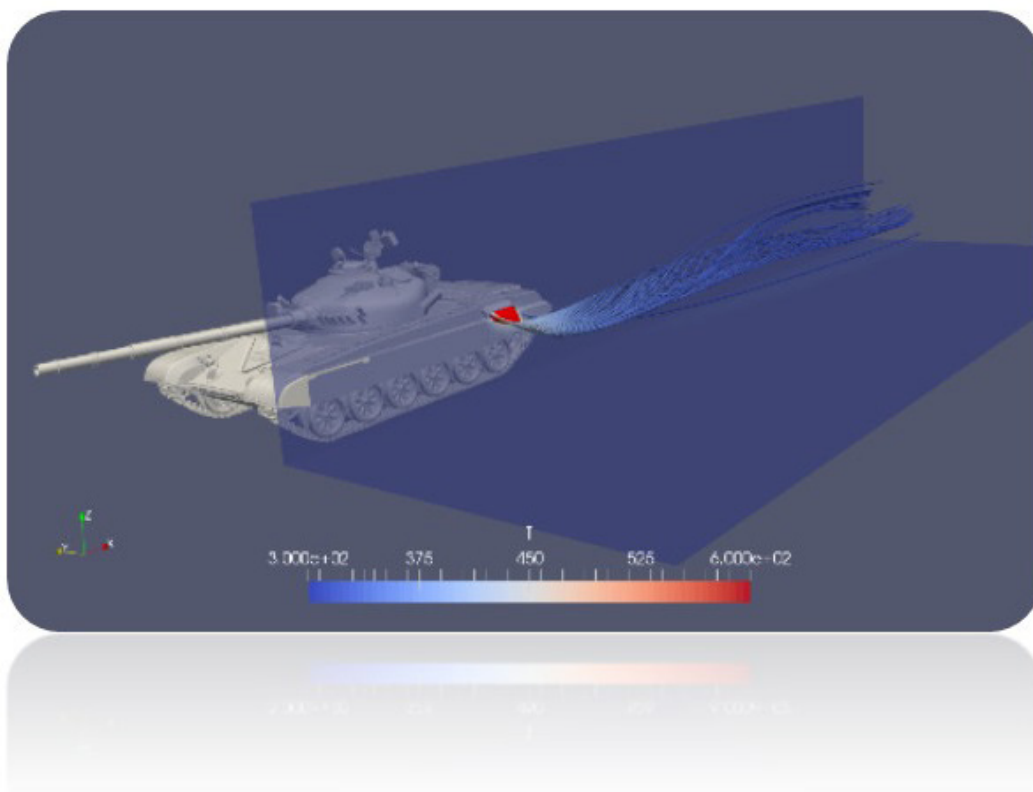
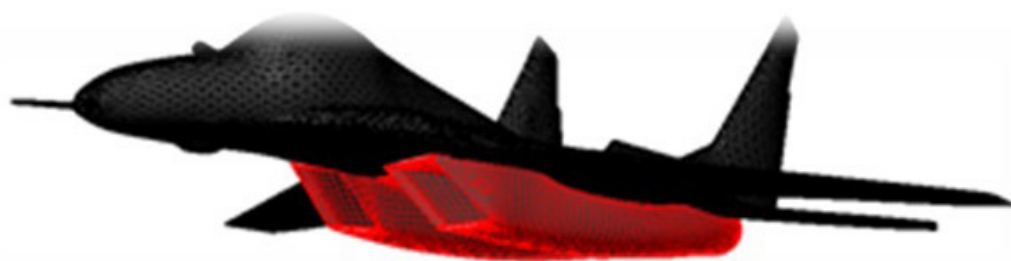


TOMAS HALLBERG, ÅSA ANDERSSON, STEFAN BJÖRKERT, MATS DALENBRING,  
PÅR GLENDOR, OVE GUSTAFSSON, MAGNUS GUSTAVSSON, ROLF JONSSON,  
NILS KARLSSON, ROLAND LINDELL, OSKAR PARMHED, ANNA POHL,  
NIKLAS WELLANDER, ERIK ZDANSKY



Tomas Hallberg, Åsa Andersson, Stefan Björkert,  
Mats Dalenbring, Pär Glendor, Ove Gustafsson,  
Magnus Gustavsson, Rolf Jonsson, Nils Karlsson,  
Roland Lindell, Oskar Parmhed, Anna Pohl,  
Niklas Wellander, Erik Zdansky

# Signaturmodellering 2017 – 2019

Slutrapport

Titel	Signaturmodellering 2017 – 2019: Slutrapport
Title	Signature Modeling 2017 – 2019: Final report
Rapportnr/Report no	FOI-R--4878--SE
Månad/Month	December
Utgivningsår/Year	2019
Antal sidor/Pages	40
ISSN	1650-1942
Kund/Customer	FM
Forskningsområde	Sensorer och signaturanpassning
FoT-område	Sensorer och signaturanpassningsteknik
Projektnr/Project no	E72763
Godkänd av/Approved by	Christian Jönsson
Ansvarig avdelning	Ledningssystem

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

Detta arbete har gjorts inom Försvarmaktens samlingsbeställning för forskning och teknikutveckling inom Sensorer och signaturanpassning (FoT SoS, AT.9220419).

Denna slutrapport sammanfattar aktiviteter och resultat under åren 2017–2019 inom projektet *Signaturmodellering*. Projektet har huvudsakligen varit inriktat mot att utveckla, utvärdera och genom mätningar validera metoder och metodik, fysikaliska modeller och modelleringsverktyg för signaturmodellering inom både radar- och EO/IR-området.

Målet är att kunna beräkna signaturen för hela objekt i naturliga bakgrundsmiljöer. Detta är nödvändigt för att kunna lämna tillförlitliga signaturdata inom tillämpade projekt, såsom sensorvärdering, måligenkänningsstudier och/eller duellsimuleringar i syfte att öka skydds- och/eller sensor-prestanda. Projektet har vid flera tillfällen för detta ändamål bidragit med signaturdata av olika typer av plattformar, både sådana som vi har tillgång till och andra.

En stor del av projektets uppdrag har varit av mer långsiktig karaktär, med kompetens- och resursuppbyggnad och vidareutveckling av metodiken. Projektet har även övervakat den internationella utvecklingen på området, medverkat vid konferenser och publicerat resultat i vetenskapliga tidskrifter samt medverkat i både nationella och internationella samarbeten.

Exempel på forskningsfokus inom radarmodellering är utveckling och validering av beräkningsmetoder för radarmålearea med s.k. *hybridmetodik*. I ett omfattande arbete har vi tagit fram modelldata för en skalenlig flygplansmodell genom laserskanning och generering av en CAD-modell med efterföljande radarsignaturberäkningar. Beräkningarna validerades därefter genom mätning av radarsignaturen vid radarmätplats utomhus. Dessutom har vi medverkat i utvecklingen av en elektromagnetisk beräkningsmodell för skrovliga ytor och inhomogena material som ger upphov till spridning av strålning, såsom t.ex. klotter och kompositmaterial.

Inom EO/IR-området har insatser gjorts för att kunna beräkna signaturen för en hel plattform, inklusive flamma eller avgasplym och dess bakgrund. Vi har bl.a. utvecklat metodiken att utgå från en CAD-modell av objekt från laserskanning av en fullskalig stridsvagn, till beräkning av dess IR-signatur och validerande mätningar i fältmiljö. Dessutom har vi utvecklat och implementerat en ytspridningsmodell som tar hänsyn till ljusets polarisation och ljusspridning (s.k. BRDF), tillsammans med materialmätningar av olika ytor, för att bemöta hotet från polarimetriska sensorer.

Exempel på kommande förbättringsbehov inom radarberäkningar gäller bl.a. att ytterligare förbättra hybridmetodiken med beräkningsmässigt komplicerade delstrukturer, samt att vid behov kunna inkludera en realistisk bakgrund och beräkning av avancerade materialytor och inhomogena material. För IR-beräkningar behövs fortsatt satsning på att inkludera validerade beräkningsresultat av avgasplymer till skrovsignaturen, hur plymen ger avtryck på bl.a. skrovradiansen och dess närmaste bakgrund samt att inkludera specifika materialrelaterade signatureffekter till beräkningarna såsom polarisation för att möta nya sensorhot.

Nyckelord: Modellering, beräkning, radarsignatur, elektrooptisk signatur, infraröd-signatur, EO/IR-signatur, mål och bakgrund, elektromagnetisk spridning, polarisation, mätning och validering

## Summary

This work has been funded by the Swedish Armed Forces R&D programme for Sensors and low observables (FoT SoS, AT.9220419).

This final report summarizes activities and results for the project *Signature modeling* during the years 2017–2019. The project has mainly focused on development and evaluation and by measurements to validate methods and methodology, physical models and modeling tools for signature modeling, both for the radar and EO/IR waveband regions.

The objective was to calculate signatures for entire objects in natural background environments. This is necessary in order to deliver reliable signature data for more applied projects, like for example sensor assessment, target recognition studies and/or duel simulations in order to increase protection and/or sensor performance. On several occasions the project has delivered different types of platform signature data, both such available for measurements and validation and platforms with limited access.

A significant part of the project had a more long-term ambition to increase competence and further develop methodology. The project has also followed the international development in the research area, participated at conferences as well as published results in scientific journals, and participated in national and international collaborations.

Examples of main research activities within radar modeling is development and validation of radar cross-section calculation methods using so-called *hybrid methods*, where we within a rather extensive work have generated model data for a to-scale airplane model by the process of laser scanning and generation of a CAD model, followed by radar signature calculations. These calculations were validated by measurements of the radar cross-section on the airplane model at an outdoor measurement facility of FOI. We are also participating in the development of an electromagnetic calculation model for rough surfaces and inhomogeneous materials that give rise to scattered radiation, such as, e.g., clutter and composite materials.

For the EO/IR region efforts was on developing signature modeling of a full platform, including flame or exhaust plume and its background. We have for example developed the methodology to go from a CAD model achieved by laser scanning of a full-size battle tank, to calculations of its IR signature and followed by field trial measurements for validation. Also, efforts was put on the development and implementation of a surface scattering model that takes into account the polarization and scattering properties (so-called BRDF), together with measurements of material properties of different kind of surfaces, in order to meet the growing threat from polarimetric sensors.

Some examples of future improvement needs within the area of radar signature modeling are, e.g., to further improve the hybrid radar calculation methods of a full object with complicated structures, including a realistic background environment if necessary, including more advanced material surfaces and inhomogeneous materials. In the field of IR modeling, we need to continue our attention on validated modeling methods of exhaust plumes in addition to the main body signature, and the plume impingement on the hull and the near background environment. Additionally, we should also continue the work on specific material related signature effects, such as polarization, in order to meet new sensor threats.

Keywords: modeling, calculations, radar signature, electro-optical signature, infrared signature, EO/IR signature, target and background, electromagnetic scattering, polarization, measurement and validation.

## Innehåll

<b>1</b>	<b>Inledning .....</b>	<b>7</b>
1.1	Frågeställningar .....	7
1.2	Aktiviteter och resultat .....	8
1.3	Mät- och beräkningsresurser .....	11
<b>2</b>	<b>Polarimetri och materialmodellering .....</b>	<b>12</b>
2.1	Modell för polarimetrisk signaturkod.....	12
2.2	Spridning i skrovliga ytor och inhomogena material.....	14
2.3	Kvantifiering av osäkerheter .....	15
2.4	Optisk materialkaraktisering .....	17
<b>3</b>	<b>Modellering av IR-signatur inklusive flammor och plymer .....</b>	<b>22</b>
3.1	Nationell signaturkod SAFIR .....	22
3.2	Metodik för högupplöst IR-signatur.....	26
3.3	Inkludering av CFD-beräkningar.....	28
3.4	Plymmodellering för stridsvagn .....	29
3.5	Mätning och validering: Fältförsök i Skövde.....	32
<b>4</b>	<b>Radarsignatur för flygande plattform .....</b>	<b>35</b>
4.1	Hybridmetodik .....	35
4.2	Radarmålareberäkningar för S-kaviteten .....	36
<b>5</b>	<b>Radarsignatur för objekt i bakgrund.....</b>	<b>38</b>
<b>6</b>	<b>Slutsatser .....</b>	<b>39</b>
<b>7</b>	<b>Publikationer.....</b>	<b>40</b>



# 1 Inledning

Den här slutrapporten presenterar FoT-projektet *Signaturmodellering*, ett av Forsvarsmaktens projekt inom samlingsbeställningen. Projektet genomfördes under åren 2017–2019. Rapporten sammanfattar verksamheten och uppnådda resultat.

Att med tillräckligt stor precision kunna modellera signaturogenskaper hos olika typer av objekt eller plattformar i sin naturliga bakgrund är av stor betydelse för en rad olika behov och tillämpningar, såsom t.ex. sensorvärdering, telekrig, duellsimulering, måligenkänning, modifiering och nyutveckling av materiel. Fördelar med att modellera framför att mäta signaturen är att betydligt fler olika scenförhållanden kan genereras, med bl.a. olika aspektvinklar, varierade driftförhållanden för fordon, bakgrundsmiljöer, väderförhållanden och sensorparametrar. Mätningar av alla dessa scenförhållanden skulle snabbt skapa orealistiskt omfattande mätkampanjer. Dessutom har man via modellering möjligheten att beräkna signaturer för objekt som man inte har direkt tillgång till, såsom fiendliga plattformar, system under utveckling eller existerande system som ska användas i nya miljöer och bakgrunder.

Det är samtidigt av största vikt att kunna tillhandahålla signaturdata genom modeller som är validerade, vilket dock kräver en relativt omfattande mätverksamhet. Inom projektet har vi därför möjlighet att mäta signaturer på både fullstora och skalade objekt på mätplats utomhus, i ekofritt utrymme samt mätning av materialparametrar på mindre provytor i lab. Vid olika mätkampanjer har vi möjligheten att samla in mätdata för olika plattformar i sin naturliga bakgrundsmiljö.

För att sammanfatta projektets huvudsakliga uppgift så är det att utveckla metodik och fysikaliska modeller för beräkning av signaturer, både inom radar- och elektrooptiska/infra-röda (EO/IR) området. Målet är att kunna leverera validerad signaturdata för hela objekt i naturliga bakgrunder genom modellering. Detta är helt nödvändigt för att kunna lämna tillförlitliga signaturdata till tillämpade projekt, bl.a. hos FMV, FLSC och FOI Telekrigvärdering.

Vi sammanfattar projektets konkreta mål, som har varit:

- att komplettera uppsättningen av signaturmodellingsverktyg
- att bevaka den internationella utvecklingen inom området
- att utvärdera och validera de modeller och verktyg som används
- att kunna beräkna signaturdata för objekt i sin bakgrund.

## 1.1 Frågeställningar

Projektet har följande övergripande frågeställningar som vi i denna rapport avser att besvara:

1. Vilken metodik bör användas för att integrera signaturberäkningar utförda med olika metoder (hybridmetoder), gäller (t.ex. kavitets+skrov, antenner+skrov, plattform-bakgrund, plattform+klotter, plattform+flamma)?
  - för IR-signaturer, se kapitel 3
  - för radarmodellering, se kapitel 4.
2. Hur stor är osäkerheten (felmarginalen) i beräkningsresultaten (t.ex. p.g.a. geometrifel, modelleringsförenklningar, osäkerhet i indata m.m.)?
  - se kapitel 2.3.
3. Vilken metodik är lämpligast för att beräkna IR-signaturer från plymer och flammor?
  - se kapitel 3.
4. Vilka metoder är lämpliga för att modellera målsignaturer för kommande sensorer (polarisationskänsliga, hyperspektrala m.m.)?
  - se kapitel 2.1.

Projektet har tagit sig an frågeställningarna genom att skapa olika arbetspaket som vart och ett har fokuserat på specifika arbetsuppgifter inom området signaturmodellering. Resultaten



har rapporterats i interna rapporter, genom vetenskapliga artiklar och konferensbidrag, samt vid muntliga presentationer vid flera tillfällen. Resultaten presenteras i korthet med hänvisningar till publikationer.

## 1.2 Aktiviteter och resultat

### 1.2.1 Signaturmodellering inom EO/IR

Inom EO/IR-området är det av stor betydelse att kunna beräkna signaturer för hela objekt i sin bakgrund. Dessa beräkningar är komplexa då många olika delar, exempelvis externa strålningskällor, bakgrunden och atmosfären samverkar på olika sätt med målsignaturen. Inte sällan kan objektets avgaspolymer eller flamma vara en mer eller mindre dominerande del av signaturen, varför det är av stor vikt att även inkludera detta i signaturmodellen. Metodik för modellering av polymer och flamma har studerats, både med en egen nationell signaturberäkningskod (se kapitel 3.1) och en kommersiell beräkningsprogramvara som har införskaffats för beräkning av gasströmningsfältet (se kapitel 3.4), för generering av radiansten hos avgaspolymer för missiler, flyg, landfordon och fartyg.

En annan viktig och tämligen komplicerad del av signaturen är att inkludera hur flamma och polymer växelverkar med såväl objektet och omgivningen samt hur termiska flöden över skrovet påverkar signaturen. Vi har bl.a. studerat hur vindflöden påverkar polymers utbredning efter en stridsvagn för olika vindhastigheter (se kapitel 3.3). Möjligheten att validera dessa och liknande beräkningar har möjliggjorts genom att projektet delfinansierades och medverkade vid fältmätningar i Skövde (juni 2019) då fordonsignaturer registrerades med bl.a. olika IR-sensorer (se kapitel 3.5).

Högupplösta signaturberäkningar inom IR-området används för att generera olika fordonsignaturer. Metodiken har utvecklats inom projektet för att sedan generera signaturdata för olika plattformar som används inom mer tillämpade projekt som ingångsvärden i t.ex. scenmodelleringprogramvaror. CAD-modeller av fordon kan köpas in om de finns kommersiellt tillgängliga eller genereras av oss själva via laserskanning av objektet. Inom projektet har vi t.ex. utvecklat metodik för beräkning av signaturen hos en stridsvagn T-72 (se kapitel 3.2). Metodik för att förenkla bestämning av parametervärden för ljusspridning eller s.k. BRDF (bidirectional reflectance distribution function) till IR-signaturberäkningsprogramvara har dessutom utvecklats inom projektet (se kapitel 2.4.1).

I takt med att polarimetriska sensorer utvecklas och görs mer robusta så innebär de ett allt större hot för upptäckt av plattformar och andra tillverkade objekt. Inom projektet har vi tidigare utvecklat en polarimetrisk BRDF-modell med vilken ytors polarisationsegenskaper kan modelleras. Modellen har nu implementerats i MATLAB och nödvändiga förbättringar har utförts i koden (se kapitel 2.1). Målet är i första hand att den ska kunna användas tillsammans med andra signaturberäkningskoder för att komplettera med polarisation inom EO/IR. Vi har dessutom tillsammans med andra FoT SoS-projekt experimentellt studerat vilka yt- och materialegenskaper som styr den polarimetriska signaturen (se kapitel 2.4.2).

### 1.2.2 Radarsignaturmätningar

Projektet har arbetat med utveckling och validering av beräkningsmetoder för radarmålarea (RCS, Radar Cross Section). S.k. hybridmetodik används för att koppla samman resultat med olika beräkningsmetoder för olika delar av ett objekt, såsom vingframkanter, kaviteter, antenner, etc.

Ett betydelsefullt och större arbete har varit att med en skalenlig modell av en MIG-29:a jämföra beräkningar och mätningar av RCS (se kapitel 4.1). Arbetet omfattade moment såsom att måla en befintlig modell med en elektriskt ledande färg, laserskanning med efterföljande generering av CAD-modell, beräkningar av RCS baserade på modellen samt mätningar på radarmätplats. Jämförelsen visar att det råder mycket god samstämmighet mellan beräknade och uppmätta RCS-data. Arbetet har varit viktigt för att utarbeta metodik att

kunna både mäta och modellera utifrån en skalenlig modell, vilket exemplifierar framtagandet av signaturdata för plattformar som vi inte direkt har tillgång till och som kan utgöra underlag för t.ex. duellsimulering eller telekrig. Vi presenterar även beräkningsresultat på signaturen hos en S-formad kavitet (se kapitel 4.2).

Metodik för RCS-beräkningar som utvecklats inom projektet har dessutom kommit till användning inom flera tillämpade projekt och beställningar. Metodiken har därmed varit avgörande för att kunna leverera data i dessa uppdrag.

### 1.2.3 Elektromagnetiska beräkningar

En beräkningsmodell har utvecklats tillsammans med Lunds tekniska högskola för att beräkna elektromagnetisk spridning i ytor och inhomogena material (se kapitel 2.2). Metoden är viktig för signaturberäkningar av verkliga objekt i realistiska bakgrunder där olika typer av inhomogeniteter exempelvis skapar klotter orsakat av regn, rök, remsmoln eller spridning från skrovliga ytor. Dessutom kan metoden användas för att utföra beräkningar på kompositmaterial och IR-signaturen hos avgasplymer. Målet för fortsatt arbete är bl.a. att använda numeriska data från validerande mätningar. Vi har i angränsning till detta även studerat osäkerheter i beräkningsresultat i en litteraturstudie kring kvantifiering av osäkerheter (se kapitel 2.3).

### 1.2.4 Internationell samverkan, konferenser och presentationer

Ett bra sätt att bevaka forskningsfronten inom området är att delta i olika typer av samarbetsprojekt, såsom NATO-grupper, EDA-samarbeten, bilaterala samarbeten, workshops och samarbeten med UoH samt andra forskningsinstitut. Resultat från projektet kommuniceras ut till kund, andra intressenter och forskarsamfundet genom medverkan i seminarier, konferenser, m.m. Projektets medverkan i sådana sammanhang summeras kort nedan:

- **NATO SET-252 (Development of a validation model of a stealth UCAV)**
  - Projektperiod 2017–2020. Medverkan sedan 2018.
  - Samverkan med FoT Flygteknik.
  - Medverkat vid möten och diskussioner.
  - Gruppens huvudsyfte är att utveckla och tillverka en valideringsmodell av en signaturanpassad UCAV (*Unmanned Combat Aerial Vehicle*). Utvecklingen stöds av radarsignaturberäkningar och hotanalys av ett specifikt uppdrag. Formen på modellen bestäms av den UCAV som tagits fram i tidigare arbeten. Modellen kommer i huvudsak att tillverkas i PEC-material men för att minska radarsignaturen kommer områden som t.ex. luftintag och vingkanter att beläggas med radarabsorberande material. Validering av olika modelleringsmetoder planeras.
  - Projektets medverkan i gruppen har hittills bestått i att delta i diskussioner, dels rörande beräkningsresultat som har tagits fram inom gruppen, dels kring hur en fysisk modell kan framställas utifrån en CAD-modell i syfte att möjliggöra mätningar. FOI avser att delta i gruppens fortsatta arbete, möjligen med både beräkningar och mätningar.
- **NATO SET-203 (Ship radar signature management system – accuracy, sensitivity and confidence level)**
  - FOI deltog i möten under 2017<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Å. Andersson, M. Wilow, E. Zdansky, *Redogörelse för FOIs deltagande i Nato SET-203, Ship radar signature management system accuracy, sensitivity and confidence level*, FOI Memo 6250, Linköping, 2017.

- Fokus på modeller och system med uppgiften att stötta bedömningen av sannolikheten för att ett fartyg ska kunna upptäckas, klassificeras, identifieras och följas med radar. Denna grupp har avslutats och den nya gruppen SET-251 *Ship Radar Signature Management Benefit to Ships* har startats, i vilken dock FOI inte har deltagit p.g.a. annan prioritering.
- **NATO AVT-281 (Cross domain platform EO signature prediction)**
  - Medverkan i möten och i arbetet med plym- och flammmodellering.
  - Samverkan med FoT Flygsystem (projekt Modelleringsteknik och prestandaanalys).
  - För resultat se kapitel **Error! Reference source not found.**
- **NATO SET-234 (Environmental limitations of fielded EO-TDAs)**
  - Delfinansiering med FoT SAT och Värdering av intelligenta sensorsystem.
  - Deltagande i möten.
  - Gruppen startade under 2016 med konsolidering och diskussioner om verksamheten och kommer att avslutas under våren 2020. En fortsättning av verksamheten inom området planeras inledas senare under 2020.
  - Sammanfattning av genomfört arbete: Planering och genomförande samt inledande analys av fältprov i White Sand, US; Detektionsmetrik, insamling av data samt genomförande av försöksverksamhet kring signatur-simulerings- och mätobjektet CUBI.
- **EDA-workshop Radar Signatures and EM Benchmarks**
  - Deltagande i möten och aktiviteter.
  - Associerad med NATO SET-252.
  - Round robin-mätningar av RCS på en trunkerad kon, där våra resultat har jämförts med andra forskningsinstitut.
  - S-kavitetsberäkningar (se kapitel 4.2).
- **Konferenser med presentationsbidrag (helt eller delvis finansierat av projektet):**
  - SPIE D+CS, Anaheim, CA, USA (april 2017).
  - Equadiff 2017, Bratislava, Slovakien (juli 2017).
  - Metamaterials 2017, Marseille, Frankrike (augusti 2017).
  - SPIE S+D, Warszawa, Polen (september 2017).
  - Swedish Microwave Days, Lund (maj 2018).
  - Metamaterials 2018, Espoo, Finland (augusti 2018).
  - SPIE S+D Berlin, Tyskland (september 2018).
  - International Symposium on Electromagnetic Theory, (EMTS 2019), San Diego, CA, USA (maj 2019).
  - SCI-319 Symposium on Signature Management, Brno, Tjeckien (maj 2019).
  - SPIE S+D Strasbourg, Frankrike (september 2019).
- **Samarbete med Lunds tekniska högskola (LTH):**
  - utveckling av EM-modell.
  - seminarier och möten.
- **Bilateralt samarbete med Storbritannien**
  - FMV och Dstl ansvarar för samarbetet.
  - Möten ett par gånger per år.
  - Delfinansiering med FoT SoS/Signaturmaterial, round robin-mätningar av BRDF och spektral DHR med konferensbidrag (SPIE S+D 2019).
- **Projektsamarbeten**
  - Projekt inom FoT SoS
    - Signaturmodellering
    - Avancerade spaningssensorer
    - Intelligenta spaningssystem
  - Projekt inom FoT Flygsystem
    - Modelleringsteknik och prestandaanalys

- FMV T-projekt
  - FoT SAT 16-18
- **Kundseminarium för FM och FMV**
  - 2018-12-05 på FMV.
  - IR-modellering flygande objekt inkluderande heta gaser.<sup>2</sup>
- **SAT-dagen på FMV, Stockholm (3 maj 2018)**
  - Modell av MIG-29:a uppvisades.
  - Posters.

### 1.3 Mät- och beräkningsresurser

Projektet finansierar mät- och beräkningsresurser (s.k. *anläggningsobjekt* inom FOI). Dessa innehåller teknisk utrustning, mätinstrument, datorer och beräkningsprogramvaror som regelbundet används av projektet. Programvaror för modellering är naturligtvis vitalt för att kunna utföra signaturberäkningar liksom tillgång till datorer med tillräcklig beräkningskapacitet. Utrustningar och instrument för experimentell verksamhet med laboratorier och mätplatser, t.ex. för att mäta RCS, bildupplöst optisk signatur, materialegenskaper inom ett brett frekvensområde (optiska till mikrovågsfrekvenser), används bl.a. för att validera beräkningsdata. Nedanstående resurser har finansierats inom projektets budget (ca 10–15 % av budget):

- Lilla Gåra (mätplats för mätning av RCS på fullstora objekt)
- SprissLab (optiska labinstrument, handhållna fältspektrometrar, datorer och programvaror för IR-modellering)
- Optronik (avbildande optisk fältutrustning och fältspektrometer, m.m.)
- MSSLab (datorer och beräkningsprogramvaror för radar och EO/IR)
- 3D Lasersensorer (laserskanner, m.m.)
- Beräkningskluster Grindsjön (för beräkning av CFD, m.m.).

---

<sup>2</sup> Redovisning av milstolpe 2018 för projekt Signaturmodellering, AF.9220418 Sensorer och signaturanpassning, FOI Memo 6574.

## 2 Polarimetri och materialmodellering

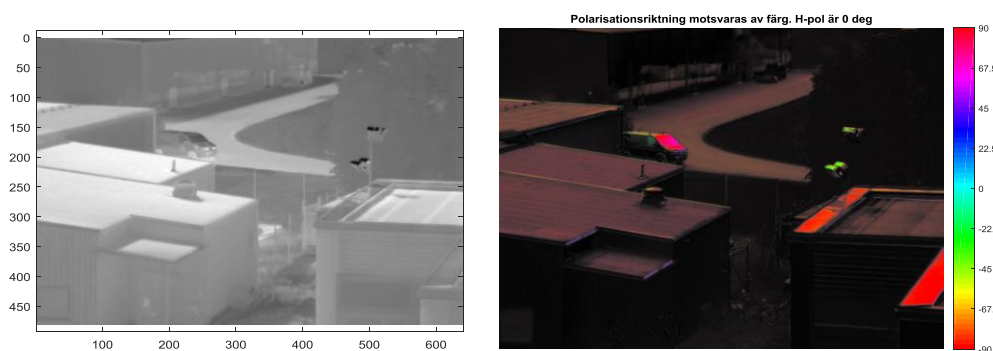
I detta kapitel sammanfattas resultat avseende signaturmodellering med egenutvecklade modelleringskoder som exempelvis kan används för signaturberäkning av skrovytor och inhomogena material. Utveckling sker med en kod, *PolSig*, som beräknar polarimetrisk signatur. Detta för att bemöta det relativt nya sensorhotet med polarimetriska sensorer. Vi beskriver även en elektromagnetisk beräkningsmetod som har utvecklats i samarbete med Lunds tekniska högskola. Syftet är att kunna beräkna elektromagnetisk spridning i skrovliga ytor och inhomogena material, vilket beräkningstekniskt är mycket krävande och svårt att modellera. Kompositmaterial, som är vanliga både i bärande strukturer i fordon och exempelvis som radarabsorbenter, är standardexemplet på ett inhomogent material. Skrovliga ytor förekommer överallt, t.ex. asfalt, gräsmattor, havsvågor och betongväggar för att nämna några. Vi har även gjort en litteraturstudie kring kvantifiering av osäkerheter. Vi studerar polarisation och andra optiska materialegenskaper genom mätningar på material och ytbeläggningar för att förstå vilka egenskaper som ligger till grund för bl.a. polarimetrisk signatur och ljusspridning (BRDF) samt för att erhålla mätdata för validering av beräknade resultat.

Arbetet har varit inriktat mot att svara på frågeställningarna:

- Vilka metoder är lämpliga för att modellera målsignaturer för kommande sensorer (polarisationskänsliga, hyperspektrala, m.m.)?
- Hur stor är osäkerheten (felmarginalen) i beräkningsresultaten (exempelvis p.g.a. geometrifel, modelleringsförenklningar, osäkerhet i indata m.m.)?

### 2.1 Modell för polarimetrisk signaturkod

Inom radarområdet har man under en längre tid utnyttjat den elektromagnetiska strålningens polarisations-egenskaper för spaningsändamål, medan man inom det passiva optiska området inte på samma sätt har kunnat utnyttja den möjligheten. Det är först under senare tid som man har kunnat applicera polarisationsfilter direkt på pixlarna i optiska sensormatriser för att få ett snabbt och robust sensorsystem för polarimetrisk avbildning. I takt med att sådana polarisationskänsliga sensorer kommer ut på marknaden och blir allt mer tillgängliga kan de utgöra ett allt större hot för upptäckt av framför allt olika typer av plattformar. I Figur 1 ser vi exempel på bild i LWIR och polarimetrisk bild inom samma våglängdsområde, som visar att den polarimetriska signaturen förstärks för vissa ytsegment (t.ex. fordonets vindruta och motorhuv samt takplåtar).



Figur 1. T.v. en bild inom långvågs-IR (8–12  $\mu\text{m}$ ) och t.h. en polarimetrisk bild inom samma våglängdsområde, där färgerna anger olika riktningar hos polariserat ljus som förstärker signaturen från vissa ytsegment hos fordon och byggnad.

Inom våglängdsområdet VIS-SWIR (SWIR: short-wave IR) är det framför allt den opolariserade solinstrålningen som blir polariserad vid reflektion i relativt släta ytsegment på tillverkade föremål, såsom byggnader och fordon. Inom IR-området är det termisk emission från motsvarande typer av ytor som ger upphov till polariserad strålning (radians). Skillnaden mellan vanliga sensorer och polarimetriska sensorer är att polarisationen under vissa

observationsvinklar och förhållanden förstärker kontrasten i bilden mot en bakgrund (vegetation) som är opolariserad. Eftersom det är fråga om tillverkade ytor som denna förstärkta kontrast kan uppkomma är det t.ex. ytsegment hos olika plattformar som lättare kan upptäckas. Framför allt har vi erfarenhet av att skylda objekt bakom skogsridåer och maskeringsnät lättare kan upptäckas, men det finns även studier som visar att polarisationsinformationen förbättrar sikten genom rök och dimma. Störst nytta av polarimetriska sensorer får vi i kombination med konventionella sensorer, då det endast är under vissa förhållanden som nyttan med polarimetri kan erhållas.

Kommersiella IR-simuleringskoder saknar idag kapacitet att hantera polarisations-egenskaperna i en scen. För att möta detta behov har projektet tagit fram och utvecklat en polarimetrisk signaturkod som går under arbetsnamnet *PolSig* (POLarimetric SIGnature code). Koden baseras på en polarimetrisk BRDF-modell (pBRDF) som har utvecklats på FOI under en längre tid och beskriver ytors polarisationsegenskaper statistiskt.<sup>3</sup> PolSig-koden är utvecklad med målsättningen att få tillgång till en signaturkod

- 1) som kan hantera polarimetriska ytegenskaper och som är hyperspektral, dvs. inte bara giltig i ett specifikt våglängdsband
- 2) för att pröva och utvärdera olika algoritmer
- 3) som kräver liten processorkraft men som är förankrad i fysiken.

Syftet är dock inte att koden ska bli en ersättning till kommersiella koder för IR-modellering, såsom t.ex. TAIthermIR eller SE-Workbench. Den är snarare ett komplement där nya algoritmer kan testas, dvs. mer som en laborativ miljö där specifika fenomen och egenskaper kan studeras. Sålunda har vi inte som främsta mål att kunna simulera en scen utan enbart enskilda objekt.

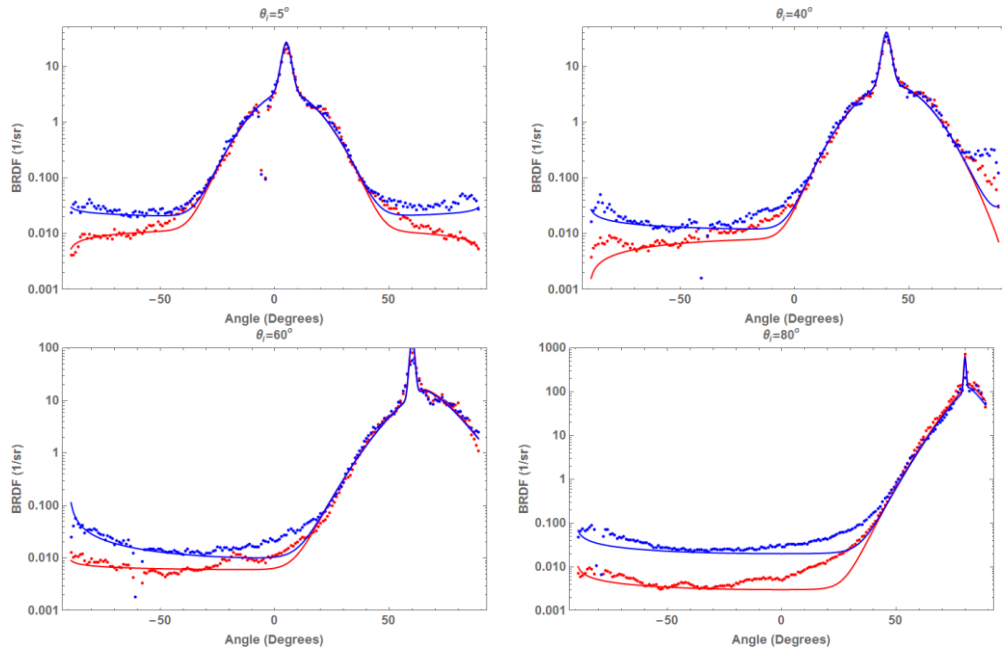
En termisk modell samt en enkel atmosfärmodell finns implementerade sedan tidigare. Till detta har FOI:s pBRDF-modell implementerats och validerats på låg nivå. Denna validering har gjorts mot uppmätta BRDF-data på ett antal olika ytor. Figur 2 visar resultatet av denna lågnivå-validering där modellen ger ett mycket gott resultat för en blåstrad aluminiumyta. Notera att skalan på y-axeln är logaritmisk.

Ett stort arbete har lagts ned under de senaste åren för att göra pBRDF-modellen mer generell och definierbar så att egenskaperna hos olika materialytor kan parametersättas i en materialdatabas till en CAD-modell. Vi har tidigare beslutat att implementera obj-filformatet för att läsa in och spara 3D-objekt. Detta är ett filformat som har ett mycket brett stöd hos många CAD-program men som dock saknar materialinformation för ett objekts ytor. Därför kommer filformatet för en materialdatabas att tas fram för att överbrygga denna begränsning. Filformatet kräver dock att modellen generaliseras för att kunna parametersättas.

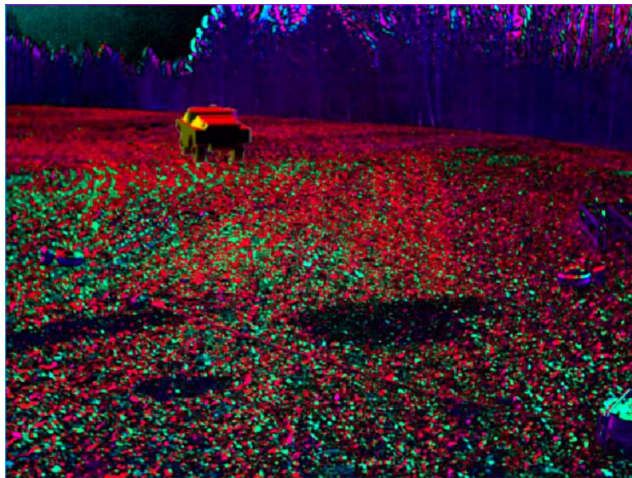
För att generera bilder av objekt med PolSig behövs en renderingsmotor med någon form av strålföljningsalgoritm. Detta arbete har påbörjats men är ännu inte slutfört. En möjlig lösning är att ett simulerat objekt adderas till en riktig bakgrundsbild, tagen med en polarisationskänslig kamera. Vi har testat detta koncept genom att använda en hybridmetod med uppmätt bakgrund och simulerat objekt (se Figur 3). Detta för att inte behöva rendera hela scenen utan bara själva objektet som ska studeras. Inom kommande projekt kommer vi att ta fram en strålföljningsalgoritm som ger en tillräckligt bra realism hos objekten men som inte kräver så mycket processorkraft.

---

<sup>3</sup> I. G. E. Renhorn, T. Hallberg, and G. D. Boreman, *Efficient polarimetric BRDF model*, Optics Express, 23(24), 31253-31273 (2015).



Figur 2. Lågnivåvalidering av pBRDF-modellen mot en blåstrad aluminiumyta. Heldragna linjer är data från modellering och cirklar från mätdata. Från överst till vänster och medsols visas BRDF (1/sr) för 5°, 40°, 60° och 80° infallsvinkel för polariserat ljus med våglängden 633 nm. Blå kurva är s.k. s-polarisation (vinkelrätt mot infallsplanet) och röd kurva är p-polarisation (parallellt med infallsplanet).



Figur 3. Simulerat fordon i en uppmätt scen tagen inom LWIR med en polarisationskänslig kamera.

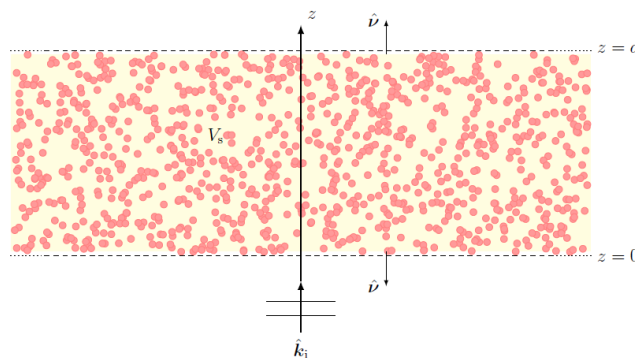
## 2.2 Spridning i skrovliga ytor och inhomogena material

När en elektromagnetisk våg, exempelvis från en radar, träffar en skrovlig yta eller en spridningskomplex miljö som ett heterogent material, t.ex. ett kompositmaterial, en svärm av drönare eller en skog, kan vi i praktiken inte lösa ekvationerna som beskriver hur radarvågen reflekteras upprepade gånger mellan de olika ytorna. Vi kan formulera problemet men dagens datorer är för små, även om vi har tillgång till de största existerande datorerna i världen. Det finns olika approximationer och tekniker som löser vissa fall. Om våglängden i vågen är mycket större än de finskaliga geometriska dimensionerna i t.ex. en komposit så kan man ersätta det heterogena materialet i beräkningen med ett homogent material som i medeltal beter sig ungefär som originalmaterialet.

I det generella spridningsfallet kan man inte göra så. Om vi är intresserade av det koherenta fältet som transmitteras eller reflekteras genom ett moln av spridare med känd statistisk rumsfördelning, så går det att lösa problemet numeriskt med ganska svaga antaganden. Relevanta tillämpningar för Försvarsmakten är hur radarpulser reflekteras av eller transmitteras genom regn, svärmar av drönare, fågelflockar, insektsmoln, etc.

Den enklaste geometrin består av en oändlig skiva med tjocklek  $d$ , enligt Figur 4. I skivan har vi en slumpmässig fördelning av elektromagnetiska spridare där vi känner till statistiken för dess form, materialegenskaper och fördelning i rummet. För att beräkna det koherenta transmitterade och reflekterade fältet använder vi oss av s.k. T-matriser med vars hjälp den elektromagnetiska växelverkan mellan alla partiklarna i skivan kan beskrivas. Genom medelvärdesbildning och utnyttjande av den så kallade *kvaskristallina* approximationen får vi en 1-dimensionell integralekvation som löses numeriskt.

I ett generellare fall som har analyserats är plattan av ett annat material än omgivningen. Det ger upphov till multipla reflexioner i fram- och bakkant av plattan som alla växelverkar med partiklarna i plattan. Den elektromagnetiska analysen blir mycket svårare och den integralekvation som man då får kan inte förenklas till ett 1-dimensionellt problem. Analysen finns rapporterad<sup>4</sup>.



Figur 4. Skiva med stokastiskt fördelade spridare, fördelade i samma typ av material som omgivningen.

### 2.2.1 Numerisk implementering

Det första fallet med samma material i skivan som i omgivningen är numeriskt implementerad<sup>5</sup>. Vid Lunds universitet pågår arbete med att skriva en kod för att numeriskt lösa fallet då bakgrundsmaterialet skiljer sig från omgivande medium. Lösaren är viktig, dels för att validera beräkningsmodellerna mot experimentella data, dels för att kunna modellera material med slumpmässigt fördelade inklusioner. Materialproven som ska mätas kommer att bestå av många spridare som är fördelade i en matris som har andra elektromagnetiska egenskaper än det omgivande mediet (luft i normalfallet).

## 2.3 Kvantifiering av osäkerheter

I de flesta fall av elektromagnetisk beräkning finns det osäkerheter i modellen. Det kan vara materialegenskaper som inte är fullt kända, eller geometriska variationer hos en farkost.

<sup>4</sup> Gerhard Kristensson, Niklas Wellander, Multiple scattering by a collection of randomly located obstacles Part III: Theory - slab geometry (2017) In Technical Report LUTEDX/(TEAT-7252)/1-67/(2017) TEAT-7252.

<sup>5</sup> Magnus Gustavsson, Gerhard Kristensson, Niklas Wellander, Multiple scattering by a collection of randomly located obstacles – numerical implementation of the coherent fields, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, Volume 185, 2016, Pages 95-100, ISSN 0022-4073, <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2016.08.018>.



Detta är svårt att hantera numeriskt och skiljer sig från uppskattningen av numeriska fel, som beror på diskretisering av geometrier och valet av basfunktioner. Ambitionsnivån i projektet har varit att bevaka den internationella utvecklingen inom området.

Det finns flera sätt att angripa frågeställningen. Om osäkerheterna har en känd statistisk fördelning så kan man använda sig av *Monte Carlo*-beräkningar, där man upprepar sina beräkningar många gånger. Mellan varje beräkning slumpas en stokastisk variabel från den statistiska fördelning som beskriver osäkerheten. Med många beräkningar kan man sedan ta ensemblemedelvärden för uppskattning av väntevärde och standardavvikelse av önskade egenskaper hos lösningarna, t.ex. radarmålarean. Normalt är detta inte en möjlig väg att gå för beräkning av radarmålareor. Radarmålareaberäkningar är ofta numeriskt sett stora problem och tar lång tid att köra, även på stora datorer. För att få ett bra mått på väntevärdet av radarmålarean måste man göra många beräkningar, kanske många tusental. Beräkningsmässigt kan man med dagens datorarkitektur kanske behöva vänta i tusen år eller längre på sina resultat.

Det finns andra sätt att angripa problemet. Ett sådant sätt är att använda sig av stokastiska polynom. Det finns olika typer av polynom som med stigande grad är sinsemellan ortogonala, givet en generaliserad inre produkt definierad som produkten av två funktioner integrerad över dess definitionsmängd och viktad med en vikt ( $W$ ) som väljs enligt Tabell 1.

Tabell 1. Olika typer av polynom med vikt  $W$  och med angivna intervall.

Fördelning	Polynom	Vikt ( $W$ )	Intervall
Likformig	Legendre	1	$[-1,1]$
Normalfördelning	Hermit	$e^{-\frac{x^2}{2}}$	$(-\infty, \infty)$
Beta	Jacobi	$(1-x)^\alpha (1+x)^\beta$	$[-1,1]$
Exponentiell	Laguerre	$e^{-x}$	$[0, \infty)$
Gamma	Generalized Laguerre	$x^\alpha e^{-x}$	$[0, \infty)$

De stokastiska polynomen kan användas på flera sätt. Om vi till exempel har ett material vars elektromagnetiska egenskap (den dielektriska konstanten) följer en känd normalfördelning så projicerar man denna på Hermitpolynom, upp till en på förhand bestämd grad. Här väljer man hur väl expansionen av dielektricitetskonstanten ska följa normalfördelningen. På liknande sätt expanderar vi de ännu så länge okända lösningarna till vår ekvation både i de vanliga rumsbaserna och i den stokastiska variabeln. Vi får då flera obekanta att lösa i den numeriska koden, men om antalet stokastiska variabler är litet så kan man klara sig med ganska låg ordning på sin stokastiska bas. Det numeriska problemet blir lite större men kan fortfarande lösas med rimlig insats. Två exempel som beskriver metoden tillämpad på elektromagnetisk vågutbredning i atmosfären ges i två vetenskapliga rapporter.<sup>6,7</sup>

<sup>6</sup> Enstedt M and Wellander N, A Spectral Expansion Based Fourier Split-Step Method for Uncertainty Quantification of the Propagation Factor in a Stochastic Environment, Radio Science, Vol. 51, 1783--1791, 2016. <http://dx.doi.org/10.1002/2016RS006064>.

<sup>7</sup> Enstedt M and Wellander N, Uncertainty Quantification of Radio Propagation Using Polynomial Chaos, Progress In Electromagnetics Research M, Vol. 50, 205-213, 2016. <http://www.jpier.org/pierm/pier.php?paper=16062101>.

Ett alternativt sätt är att projicera sin beräknade kvantitet, t.ex. RCS, beräknad med en vanlig deterministisk lösare, på stokastiska polynom. Integralen i projektionen beskriven ovan löses med en numerisk kvadratur som evaluerar integranden i ett antal punkter i den stokastiska definitionsmängden. För att göra denna numeriska integration måste vi lösa vår deterministiska ekvation för precis dessa värden av den stokastiska variabeln. Många evalueringspunkter höjer noggrannheten på estimatet av osäkerheten. Till skillnad från *Monte Carlo*-metoden så slumpar man inte fram vilka realiseringar som skall beräknas. Den senare metoden har fördelen att man inte behöver skriva om den numeriska beräkningskoden.

## 2.4 Optisk materialkaraktisering

Mätverksamheten är som tidigare nämnts av central betydelse inom projektet för att validera beräkningsresultat. Dessutom behövs för modellering med semiempiriska beräkningsmetoder mätdata från t.ex. lackade ytor och andra material för att kunna utföra realistiska signaturberäkningar. Dessa mätningar kan t.ex. innefatta total och diffus spektral reflektans vid olika infallsvinklar och BRDF (dvs. mått på ljusspridning) från relevanta ytor. Hur olika materialytor påverkar den polarimetriska signaturen är av intresse för att möta ett kommande hot från polarisationskänsliga sensorer med lämplig signaturanpassning, men även för hur man kan använda polarimetri för upptäckt av tillverkade objekt. Inom polarimetri och signaturanpassning har vi samverkat med projekten *Signaturmaterial* och *Avancerade spaningsensorer*. Mätverksamhet kräver dock god kännedom och kunskap kring materialfysik, mätmetodik och tillförlitlighet hos mätresultaten. Vi har inom ett bilateralt informationsutbyte med Storbritannien, tillsammans med *QinetiQ Ltd* och *Malvern Optical Ltd*, gjort jämförande labmätningar av spektral reflektans med integrerande sfär och BRDF och kan på så sätt kvalitetssäkra våra resultat och rent generellt vår förmåga att göra sådana här mätningar.

### 2.4.1 Förenklad metodik för optisk signaturmodellering

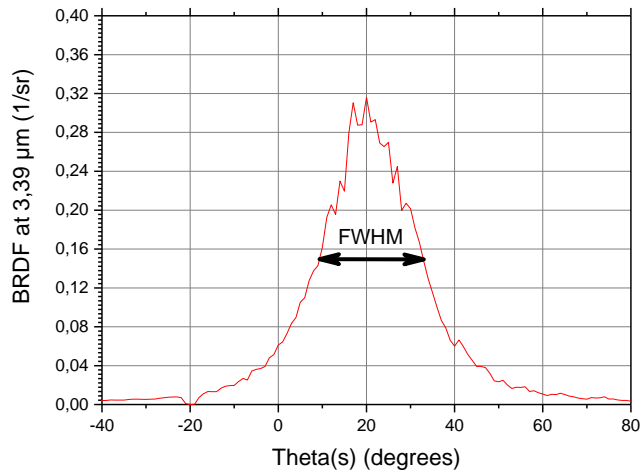
Scensimuleringar och signaturberäkningar för EO/IR med signaturkoder kräver ofta olika parametriserade mätdata från ytor och beläggningar för att åstadkomma realistiska beräkningsresultat. Några av de viktigaste parametrarna används för kodens ytspridningsmodell och fås via mätning av reflektans och BRDF. Reflektansmätningar i form av spektral *direktionell hemisfärisk reflektans* (DHR) med spektrometer och integrerande sfär är något som man kan mäta i de flesta välutrustade optiklab, medan mätning av BRDF med reflektometer är mer komplicerat och finns mer sällan tillgängligt.

I denna undersökning (se konferenspublikation<sup>8</sup>) har vi dock kommit fram till att nödvändig BRDF-data kan fås direkt via spektrala DHR-mätningar, för modellering med koder som använder den s.k. *Sandford-Robinson* (S-R) BRDF-modellen. För denna modell behövs från en BRDF-mätning endast halvvärdesbredden (FWHM) av spridningsloben från materialytan, mätt vid en viss våglängd. Enheten för BRDF är  $(1/\text{sr})$  vilket innebär att låga BRDF-värden fås för diffust reflekterande ytor medan höga värden ges för speglande (spekulärt spridande) ytor. Dessutom fås ett lågt och konstant värde för helt diffusa ytor, s.k. *Lambertska* ytspridare. Exempel på mätresultat med markerad halvvärdesbredd för en BRDF-plot ses i Figur 5.

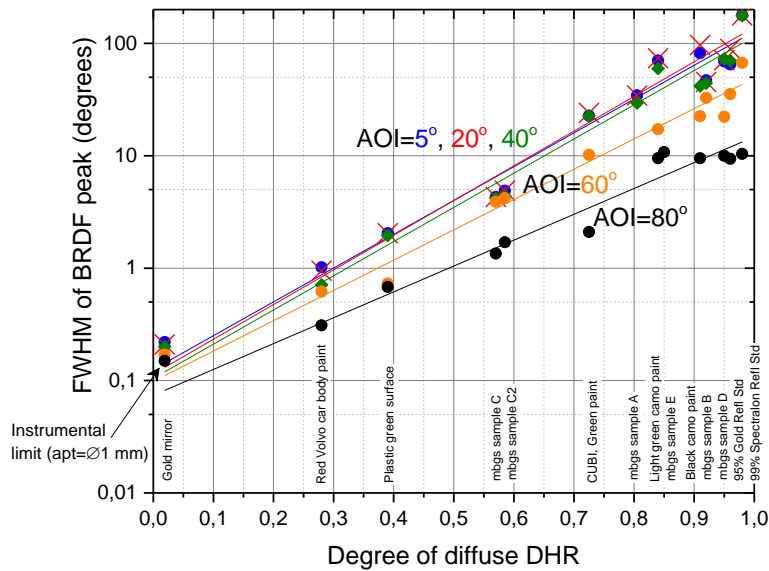
Med en integrerande sfär kan man oftast mäta både total och diffus reflektans (DHR) och kvoten dem emellan definierar vi som graden av diffus reflektans, DoDR (Degree of Diffuse Reflectance), vilket ger ett mått (mellan 0 och 1) på hur pass diffust ljuset sprids från ytan. Genom att studera en rad olika provytor med olika beläggningar, från guldspegel till diffust spridande färg, har vi hittat ett logaritmiskt samband mellan DoDR och FWHM av BRDF-

<sup>8</sup> T. Hallberg, A. Pohl, J. Fagerström, *Simplifying BRDF Input Data for Optical Signature Modeling*, Proc. SPIE Volume 10206: Disruptive Technologies in Sensors and Sensor Systems, June 2017 (FOI-S--5781--SE).

spridningsloben. Sambandet är plottat i Figur 6. Genom att utnyttja detta samband räcker det alltså att göra en enklare mätning i spektrometer med integrerande sfär istället för med en mer avancerad mätmetodik med spridningsmätare. Sambandet varierar något för olika infallsvinklar av ljuset och gäller för en viss våglängd. Nästa steg är att göra motsvarande undersökning för andra våglängder än vid 3,39  $\mu\text{m}$ .



Figur 5. Plot av BRDF som funktion av azimutvinkel ( $\theta$ ) för spritt/reflekerat ljus med markerad halvvärdesbredd (FWHM). Ljusets infallsvinkel för mätningen är  $20^\circ$  och vid samma (motstående) reflektionsvinkel fås den spekulära delen av reflektionen med en viss spridningslobbredd.



Figur 6. Förhållandet mellan graden av diffus reflektans (DoDR) och halvvärdesbredden av BRDF-spridningsloben för olika infallsvinklar (AOI=Angle of Incidence), vid våglängden 3,39  $\mu\text{m}$ . Sambandet mellan DoDR och halvvärdesbredden av BRDF ger oss möjligheten att från en relativt enkel mätning av DoDR bestämma halvvärdesbredden av ljusspridningsloben. Den vertikala texten i figuren utmed nedre horisontell axel betecknar de olika provytorna, från guldspiegel (lågt DoDR-värde) till nära-Lambertska diffus yta (DoDR-värde nära 1).

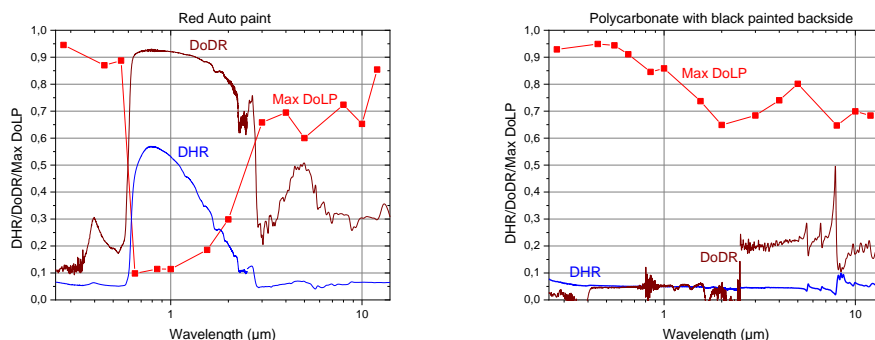
### 2.4.2 Optiska polarisationsegenskaper hos olika ytor

Vi har studerat vilka faktorer som har betydelse för uppkomst av polariserat ljus och termisk utstrålning. Det kan handla om olika materialegenskaper, såsom reflektans och ytojämnhet,

eller geometriska förhållanden, såsom infallsvinkel och observationsvinkel, även i förhållande till solinstrålning. Genom att förstå vilka materialegenskaper som påverkar den polarimetriska signaturen kan vi bättre signaturanpassa våra plattformar mot detta sensorhot. Förståelse för vilka geometriska förhållanden och observationsvinklar som inverkar ger kunskap om hur vi taktiskt kan uppträda i förhållande till ett visst hot i en viss hotriktning för att minska risken för upptäckt.

Våra resultat (se konferenspublikationer<sup>9,10</sup>) visar att ju högre reflektion en yta har (eller ju högre emissivitet ytan har inom IR) desto lägre blir den polarimetriska signaturen, och vice versa. Exempel på detta ses i Figur 7. Ljusets polarisationsgrad uttrycks med beräknat DoLP-värde (Degree of Linear Polarisation) som kan anta värden inom intervallet 0–1, där 0 är helt opolariserat och 1 är helt polariserat.<sup>10</sup> Det finns ett linjärt samband mellan inversen av reflektansen ( $1/\text{DHR}$ ) och maximalt DoLP-värde.<sup>11</sup> Eftersom det även finns ett samband mellan graden av diffushet (DoDR) och polarisationsgraden kan detta samband ha olika riktningkoefficienter, vilket ses i Figur 8.

En annan intressant slutsats är att eftersom t.ex. de flesta målade ytor har hög reflektion inom när-IR och kortvågs-IR (NIR-SWIR) kan man räkna med att den polarimetriska signaturen är lägre sedd med den typen av sensorer.

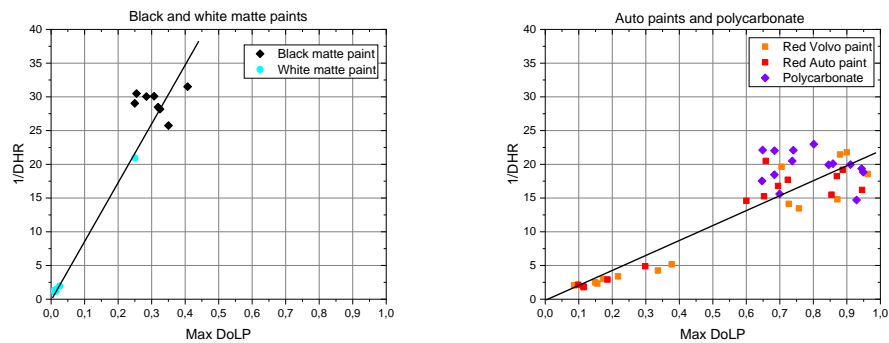


Figur 7. Maximal polarisation (DoLP), spektral reflektans (DHR) och DoDR (graden av diffus reflektans) för de olika provytorna röd billack (t.v.) och polycarbonat med svartmålad baksida (typ "vindruta") som funktion av våglängd inom ett brett våglängdsintervall (UV–IR). Resultaten visar att låg reflektans ger ett högt maximalt DoLP-värde, men att även ytans diffushet (ljusspridning) kan påverka.

<sup>9</sup> C. Åkerlind, T. Hallberg, J. Eriksson, H. Kariis, D. Bergström, *Optical polarization: background and camouflage*, Proc. SPIE 10432, Target and Background Signatures III, 1043204 (2017); doi: 10.1117/12.2278767 (FOI-S--5780--SE).

<sup>10</sup> T. Hallberg, J. Eriksson, S. Björkert, H. Kariis, *Optical polarization and the dependence of angle of incidence for different surfaces: comparison between different wavelengths from UV to IR*, Proc. SPIE 10794, Target and Background Signatures IV, 107940U (2018); doi: 10.1117/12.2327022 (FOI-S--5886--SE).

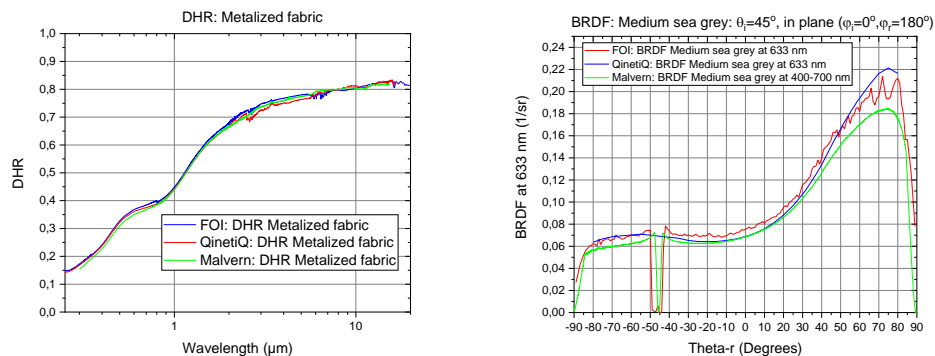
<sup>11</sup> Polarisationen får ett maximalt värde vid en viss infallsvinkel, den s.k. Brewstervinkeln.



Figur 8. Ett linjärt samband gäller mellan inversen av reflektansen ( $1/DHR$ ) och maximalt polarisationsvärde (DoLP). För kraftigt diffust spridande ytor har dock det linjära sambandet en annan riktningskoefficient jämfört med ytor som är mindre diffust spridande, vilket ses i dessa plottar för matt svart och vit färg (t.v.) jämfört med relativt blanka ytor av billack och polykarbonat (t.h.).

### 2.4.3 Jämförelse av BRDF-mätningar

Tillsammans med projektet *Signaturmaterial* har vi i samarbete med två forskningsinstitut i Storbritannien, QinetiQ Ltd och Malvern Optical Ltd, gjort jämförande mätningar (s.k. round robin-jämförelse) mot några olika referensytor. Detta har skett inom ett bilateralt samarbetsavtal med Storbritannien som leds av FMV och Dstl.<sup>12</sup> Resultaten finns som en konferenspublikation.<sup>13</sup>



Figur 9. Exempel på mätresultat från round robin-jämförelsen vid FOI, QinetiQ och Malvern Optical: t.v. spektral DHR för metalliserad textilväv och t.h. BRDF vid 633 nm för gråmålad yta vid infallsvinkeln  $45^\circ$  i infallplanet.

Tre provytor med olika yt- och materialkaraktistik (gråmålad yta, svartmålad blank yta och metalliserad textilväv) valdes ut. Jämförande mätningar av spektral DHR (dvs. med integrerande sfär) vid en viss infallsvinkel och BRDF vid ett par olika våglängder och olika geometriska mätförhållanden utfördes av respektive organisation. Slutsatsen av jämförelsen är att mätresultaten från de tre olika forskningslaboratorierna stämmer väl överens med varandra. För de spektrala reflektansmätningarna var inte skillnaden större än de enskilda spektrometrarnas mätfel och för BRDF-mätningarna var överensstämmelsen mycket bra för diffust spritt ljus men kunde ibland skilja sig åt för starkare spekulära reflexer, vilket dock

<sup>12</sup> Defence Science and Technology Laboratory, Storbritannien.

<sup>13</sup> T. Hallberg, D. A. Pearce, P. Raven, C. J. Baker, R. P. Moore, H. Kariis, *Round robin comparison of BRDF measurements*, Proc. SPIE 11158, Target and Background Signatures V, 111580I (2019); doi: 10.1117/12.2534675 (FOI-S--6090--SE)

har en eller flera rimliga förklaringar (bl.a. att val av rätt aperturstorlek vid utrustningens detektor kan vara avgörande). Exempel på mätresultat ges i Figur 9 för spektral DHR och BRDF.

Ett fortsatt samarbete, där förmodligen även Saab Barracuda kommer att ingå, är under beredning och där vi planerar att göra jämförande mätningar på mer tillämpade materialytor.

### 3 Modellering av IR-signatur inklusive flammor och plymer

I detta kapitel sammanfattas resultat avseende signaturmodellering för signaturberäkning av skrov inklusive flamma och plym. Sedan tidigare finns den egenutvecklade nationella koden *SAFIR* vilken kontinuerligt utvecklas i syfte att kunna utföra modellering på helt objekt med olika framdrivningssystem för flygtillämpningar. För markfordon finns behovet att modellera IR-signaturer hos hela objekt med relativt hög upplösning. Tillämpningen är att inkludera realistiska objekt i en scen med bakgrund för att generera ett visst scenario eller för att träna måligenkänningsalgoritmer på olika fordonstyper. Inom vissa våglängdsområden kan avgasplymen från fordon dominera och även växelverka med skrov och bakgrund samt påverkas av vind eller fordonets hastighet. Detta är något som projektet har haft som uppgift att skapa förutsättningar för att kunna modellera. Här är det även av stor vikt att kunna verifiera modelleringsdata, varför datainsamling har skett genom mätning av olika fordonsignaturer i fältmiljö.

Det är viktigt att behärska metodiken för hela denna process, dvs. från laserskanning och generering av CAD-modell av markfordon till IR-modellering för skrov, plym och bakgrund samt efterföljande validering via mätningar. Metodiken har utvecklats inom projektet för att generera signaturdata för olika plattformar som används inom mer tillämpade projekt (t.ex. *Intelligenta spaningsensorer*) som i t.ex. scenmodellerings-programvaror. Samverkan har till viss del även skett med projektet FoT SAT, speciellt beträffande modelleringsmetodik för laserskanning, generering av CAD-modell och IR-modellering av mobilt kamouflage-system.<sup>14</sup> Ett liknande arbete har även utförts inom radarområdet.<sup>14,15</sup>

Resultat inom detta arbete har varit inriktat mot att svara på frågeställningarna:

- *Vilken metodik är lämpligast för att beräkna IR-signaturer från plymer och flammor?*
- *Vilken metodik bör användas för att integrera signaturberäkningar utförda med olika metoder (hybridmetoder) t.ex. gällande plattform+bakgrund, plattform+klotter och plattform+flamma?*

#### 3.1 Nationell signaturkod SAFIR

SAFIR beräknar IR-signaturer för flygande plattformar. Signaturen är vanligtvis uppdelad i kropp, kaviteter, avgasplym och bakgrund. Koden ägs gemensamt av FOI och Saab Dynamics. Utvecklingen av SAFIR var fram till 2015 behovsstyrd och har med stöd från FMV historiskt definierats av användargruppen bestående av representanter från FOI, Saab och GKN (f.d. Volvo Aero).<sup>16</sup>

Vid modellering av IR-signaturer för flygande plattformar används normalt flödesdynamiska beräkningsmetoder (s.k. CFD: Computational Fluid Dynamics),<sup>16,17</sup> se ingående delar i Figur 10. Gasinnehållet kommer att påverka gasstrålnings- och gastransmissionsdelen. I

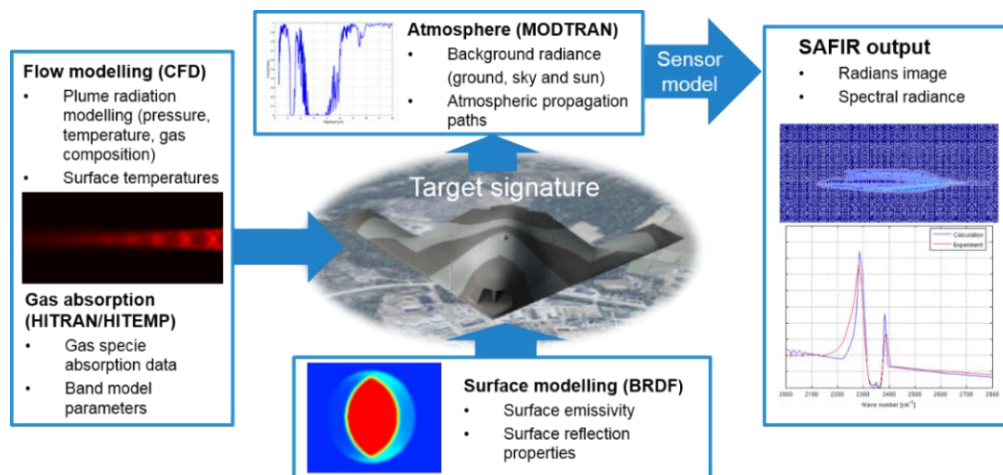
<sup>14</sup> Nils Karlsson, Åsa Andersson, Lars Bohman, Pär Glendor, Ove Gustafsson, Magnus Gustavsson, Rolf Jonsson, Hans Kariis, Mikael Karlsson, Steven Savage, Niclas Wadströmer, Erik Zdansky, Christina Åkerlind, *Slutrapport FOT SAT 16-18*, FOI-R--4637--SE.

<sup>15</sup> M. Gustavsson, Å. Andersson, P. Glendor, R. Jonsson, M. Karlsson, N. Karlsson, "Metodutveckling för radarmålyteberäkning av objekt med mobilt maskeringssystem, MCS", FOI-RH--2008--SE, (2018).

<sup>16</sup> *SAFIR v.2.1 - Users Guide*, FOI MEMO 3501, 2011

<sup>17</sup> Edge Theoretical Formulation, Issue 5.3, FOI dnr 03-2870, April 2014

enkla fall räcker det med att använda en tvågasmodell för att termodynamiskt modellera blandningen av den förbrända motor- och omgivningsgasen. I andra fall, t.ex. vid modellering av raketmotorer behövs hänsyn tas till de kemiska reaktionerna i flammen. Designprocessen för att minimera IR-signaturen involverar utformning och analys av utloppsgeometri, mixning och kylning av heta delar. För egenemissionsdelen på grund av aerodynamisk uppvärmning blir ytans reflektionsegenskaper avgörande. Signaturanpassning hanteras här genom applicering av kamouflagefärg med multispektrala materialegenskaper som ibland även behöver tåla höga temperaturer. Slutligen beräknas IR-signaturen vid sensorn med hänsyn till dämpningen eller transmissionen genom atmosfären. Två våglängdsintervall beräknas normalt: mellanvågsintervallet 3–5  $\mu\text{m}$  (MWIR) och långvågsintervallet 8–12  $\mu\text{m}$  (LWIR).



Figur 10. Ingående delar i IR-beräkningskoden SAFIR.

Användning och utveckling av SAFIR sker i samarbete med projektet *Modelleringsteknik och prestandaanalys* inom FoT Flygsystem. Projektet har samplanerat vissa delar av verksamheten där synergier finns. Under projektiden har vi bl.a. påbörjat arbetet med att förbättra BRDF-modellen för att modellera reflektion och strålning samt polarisation i IR. Detta medför t.ex. att uppmätta materialdata direkt kan användas för beräkningar i SAFIR. Huvudfokus har dock varit förbättrade och validerade modeller för uppskattning av signaturen från flyg- och raketmotorer.

### 3.1.1 Utveckling flammodellering

Verksamheten har under perioden inriktats mot modellutveckling där flammor förekommer i strömningsfältet kring flygande farkoster. Projektet finansierar deltagande i NATO-gruppen AVT-281 inom Applied Vehicle Technology (AVT). Det sista året för AVT-281 är 2019 men en ny grupp kommer att fortsätta arbetet under nästkommande 3-årsperiod med start 2020. Validering av plym- och gasmodellering har gjorts med hjälp av IR-signaturmätningar på två typer av objekt (se Figur 11):

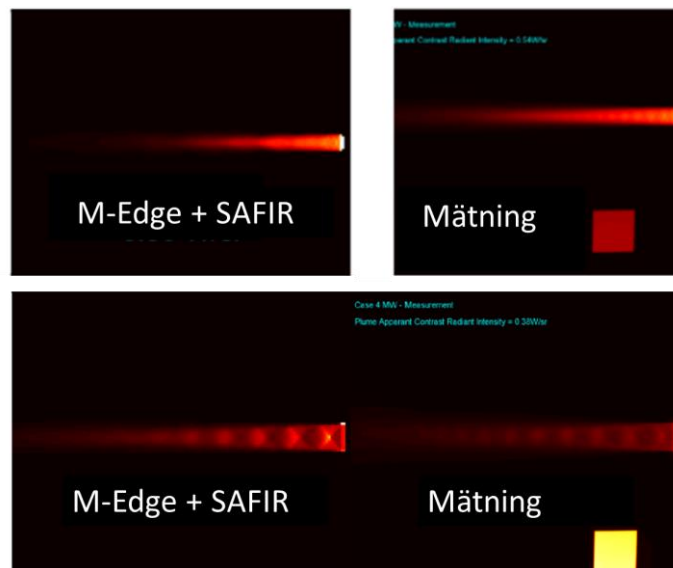
- GETL-fallet: En Rolls-Royce Gnome gasturbin levererad av *S&C Thermofluids Ltd* med stöd av Dstl (Storbritannien).
- CRV7-fallet: DRDC (Kanada) har erbjudit uppmätta data på en fastbränsleraket (Canadian Rocket Vehicle, CRV)





Figur 11: GETL-fallet från S&C Thermofluids Ltd (vänster bild) samt CRV7 från DRDC (höger bild, <https://en.wikipedia.org/wiki/CRV7>)

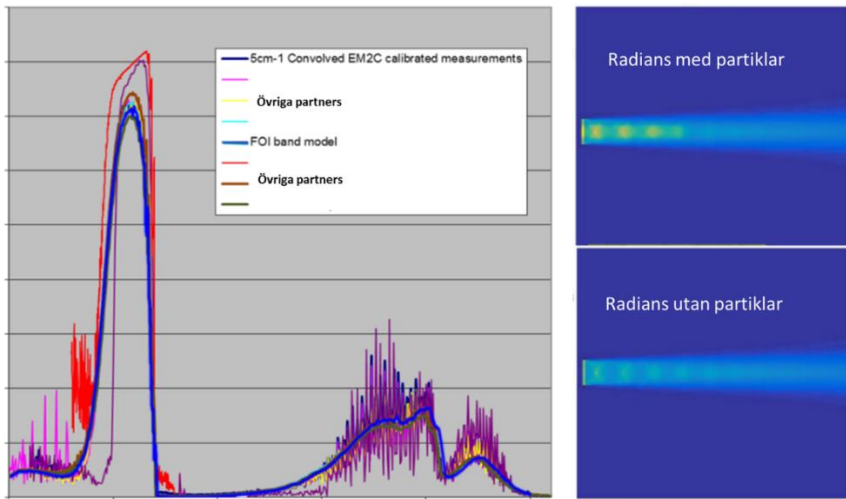
FOI har i samarbete med Saab Dynamics, som också deltar i gruppen, stöttat delen som handlar om det så kallade GETL-fallet i den Saab-FOI-gemensamma utvecklingen av SAFIR. NATO-gruppen har tillsammans tagit fram nödvändiga indata för modellering av experimentet, noggrant uppmätta i form av: testgeometri, driftspunkter, strömnings-randvillkor (sot- och motorgasinnehåll) samt uppställning av motortestriggen och positioner för mätinstrument.



Figur 12. Jämförelse mellan radiansberäkningar med SAFIR och uppmätta data. Övre två bilder för cirkulär dysa, nedre för rektangulär dysa.

Figur 12 visar resultatet från simulering med SAFIR + M-Edge av GETL-fallet med cirkulär respektive rektangulär dysa. IR-resultatet är direkt beroende av CFD-lösningens kvalitet, i detta fall M-Edge som utför dessa beräkningar. Parametrar som påverkar är beräkningsmodellens upplösning samt valet av turbulensmodell. SAFIR-resultatet från den cirkulära dysan ger en för kort flamma jämfört med uppmätta radiansdata. Flammen från den rektangulära dysan ger ett kraftigare stötmönster med något högre radians än uppmätta data.

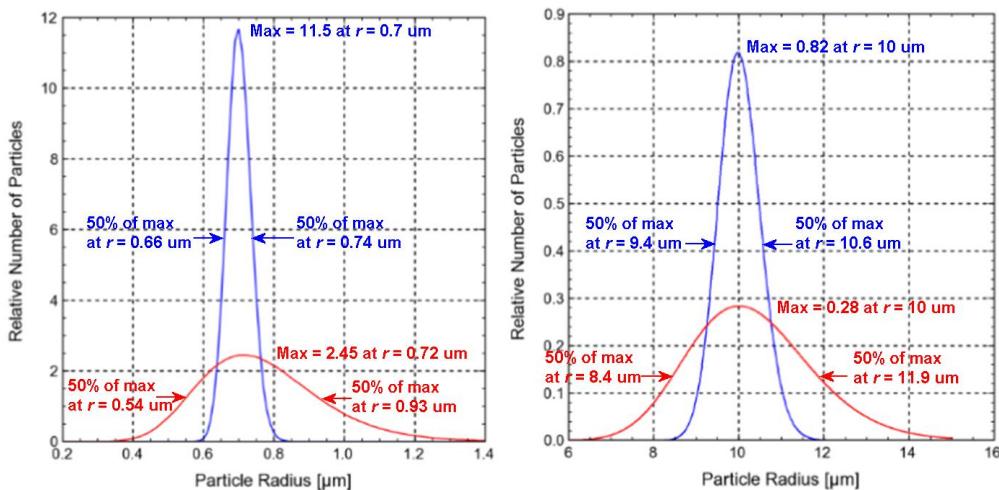
Förbättrad modellering av IR-signaturer för raketmotorer med och utan aluminiumpartiklar är ett annat område som studeras inom NATO-gruppen och som även prioriteras av FOI. Kanadensiska DRDC erbjuder uppmätta data från CRV (Canadian Rocket Vehicle) som har används i valideringssyfte under 2019. Den högra bilden i Figur 13 visar ett exempel på förhöjd radians vid flamberäkningar med aluminiumpartiklar, som ofta används för att höja effekten i krutmotorer.



Figur 13. Jämförelse mellan radiansberäkningar med SAFIR och uppmätta data för metangas-flamma samt exempelsimulering visande skillnad mellan flamma med och utan aluminiumpartiklar (t.h.).

### 3.1.2 Implementering av Mie-spridning

I plymer från raketmotorer får man ett bidrag till IR-signaturen som kommer från Mie-spridning. Mie-spridning sker då partikelstorleken är av samma storleksordning som den spridda våglängden. Vilka partiklar som, i fallet med raketmotorer, sprider strålningen är oklart men aluminiumoxid är en stark kandidat (förmodligen olika varianter av oxider). I Figur 14 visas beräkningsresultat för två olika partikelstorlekar (radien 0,7 µm och 10,0 µm) med två olika log-normalfördelningar (smal och bred) av storleken. Detta är resultat som också har utarbetats inom NATO-gruppen AVT-281.



Figur 14. Liten (t.v.) och stor (t.h.) partikel med smal respektive bred log-normalfördelning av storleken.

Via resultaten av dessa storleksfördelningar har vi beräknat extinktions-, absorptions- och spridningsparametrar (dvs.  $C_{\text{ext}}$ ,  $C_{\text{abs}}$  och  $C_{\text{scat}}$ ) för  $\text{Al}_2\text{O}_3$  med programvaran MiePlot<sup>18</sup>.

<sup>18</sup> <http://www.philiplaven.com/mieplot.htm>

Dessa resultat överensstämmer dessutom väl med andra resultat som beräknats med en annan programvara vid DLR (German Aerospace Center). Resultat från beräkningar av dessa parametrar kommer att implementeras i SAFIR-koden för att kunna modellera plymens radiansbidrag från raketmotorer. SAFIR är ursprungligen utvecklad för att endast hantera flammor från jetmotorer.

## 3.2 Metodik för högupplöst IR-signatur

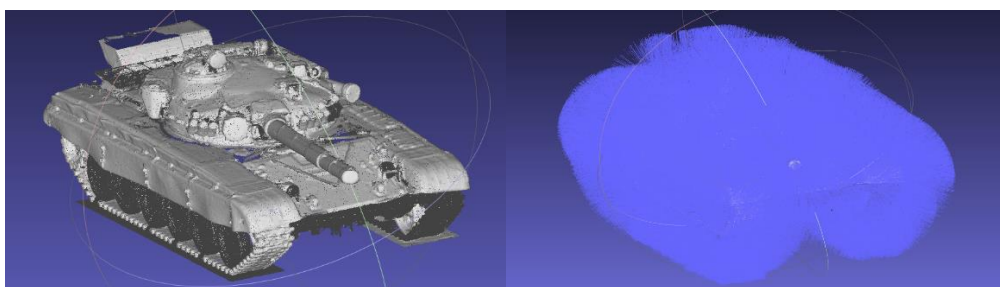
### 3.2.1 Modelleringsmetodik

Metoden att modellera markfordon förändrades under perioden där mer tonvikt lades på laserskannade data från ett verkligt fordon jämfört med tidigare arbeten som byggde mer på kommersiella CAD-modeller, ursprungligen gjorda för spel- och filmindustrin. Nackdelen är att denna metod förutsätter tillgång till verkliga objekt.

CAD-modelleringen har genomförts med hjälp av data från laserskanningen i två steg. I den första fasen skapas ett referensunderlag som sammanställs genom bearbetning av material från laserskanningen. I denna fas används programvaran RiSCAN PRO<sup>19</sup> och MeshLab<sup>20</sup>. I en andra fas modelleras stridsvagn T-72 mot referensmaterialet med Autodesk Maya-programmet, vilket beskrivs i detta avsnitt. Här diskuteras även möjliga felkällor.

T-72:an placerades på ett vridbord och laserskannades med hjälp av en LIDAR-utrustning från Riegl. Vridbordet förenklade processen genom att möjliggöra en 360°-skanning av objektet. Skanningen kompletterades också med stillbilder från detta tillfälle. Fotona användes sedan som visuell referens under modelleringsprocessen i Autodesk Maya<sup>21</sup>.

Riegl RISCAN PRO-mjukvaran användes för att kompilera data från de olika laserskanningarna på T-72:an. De olika punktmolnen orienterades och synkroniserades mot varandra varefter punktmolnen filtreras med ett så kallat Octree-filter<sup>22</sup>. För att använda informationen från punktmoln som en modelleringsreferens i Autodesk Maya användes punktmoln i nätverktyget MeshLab för att skapa en geometri. I verktygen används olika filer för att reducera antalet punkter i punktmolnet samt för att skapa en tät ytmodell (se Figur 15) utan extra ytor.



Figur 15. Normalriktningsberäkningen för punktmolnet i Meshlab (t.v.) och resultatet i form av en ytmodell (t.h.).

Den slutliga modellen i Meshlab exporterades i två olika upplösningar i obj-format för användning i Autodesk Maya. Upplösningen i den ena modellen är 3,6 miljoner polygoner och

<sup>19</sup> Riegl, "RiSCAN PRO 2.0." Tillgänglig: [www.riegl.com](http://www.riegl.com) [Accessed 2018-10-09].

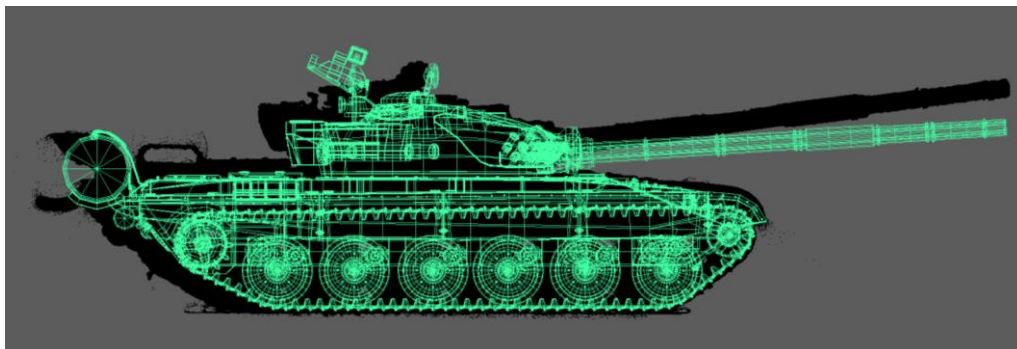
<sup>20</sup> MeshLab, "Color Enhancement for 3d," Tillgänglig: [www.meshlab.net](http://www.meshlab.net) [Accessed 2018-10-09].

<sup>21</sup> Autodesk, "Maya" Tillgänglig: <https://www.autodesk.se/products/maya> [21 september 2018]

<sup>22</sup> Wikipedia, "Octree" Tillgänglig: <https://en.wikipedia.org/wiki/Octree>, [21 september 2018].

i den andra 2 miljoner polygoner. Den mindre detaljerade upplösningsmodellen befanns vara tillräckligt detaljerad för att användas som referensmodell i Autodesk Maya.

Den tidigare inköpta och använda kommersiella CAD-modellen från TurboSquid av stridsvagnen T-72 jämfördes i Maya med modellen som genererats vid laserskanningen. Även om den inköpta modellen bibehöll en god detaljnivå saknades fortfarande formell likhet med den skannade modellen (se Figur 16).



Figur 16. Den inköpta modellen (grön) har felaktiga dimensioner jämfört med den skannade modellen (svart).

Efter en inventering av den köpta modellens delar gjordes ombyggnader, re-modellering och komplettering av saknade komponenter. Vissa delar var dock av tillräcklig god kvalitet för att kunna återanvändas genom omfördelning eller mindre justeringar.

Metoden för modellering av den återstående delen av vagnen baseras främst på tillgången till goda fotoreferenser insamlade vid tillfället för laserskanningen. Därefter reducerades antalet detaljer; exempelvis så gavs drivbanden en enklare form på länkarna och bultar i modellen, som inte bedömdes påverka IR-signaturen, plockades bort. Dessa förändringar genomfördes för att minska antalet polygoner, vilket också innebar en minskning av beräkningstiden vid simuleringen.

### 3.2.2 Mobilt kamouflage system på T-72

Signatursimuleringar i IR-området för ett tungt militärt stridsfordon med kamouflagessystem har genomförts och presenterats vid en konferens.<sup>23</sup> Det mobila kamouflaget från SAAB Barracuda, benämnt Mobile Camouflage System (MCS) Sverige, modellerades med samma metodik som beskrivits i kapitlet ovan (3.2.1). Modellen bygger på laserskanning av MCS monterat på en stridsvagn. Vid simuleringen genomfördes beräkning av värmeutveckling, värmeöverföring och värmetransport samt strålningsemittering för fordonet med MCS, varefter emitterad strålningen för utvalda våglängder beräknades. IR-simuleringarna genomfördes med ThermoAnalytics Inc. programvara TAIthermIR.<sup>24</sup> Modellerade signaturer jämfördes med resultat från signaturmätningar vid ett fältprov i Skövde, som genomfördes den 21–24 augusti 2017 av FMV och SAAB Barracuda med stöd från FOI.

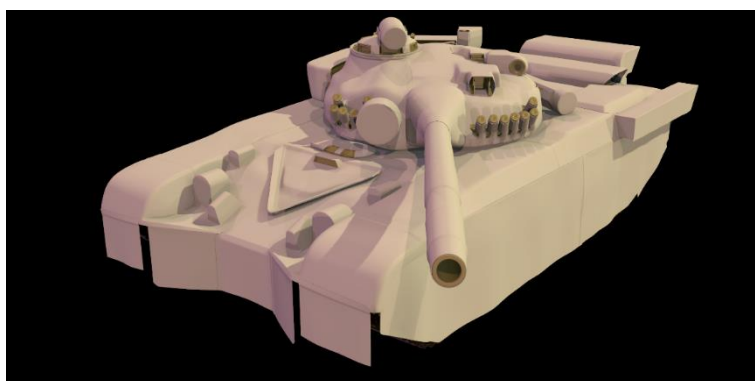
TAIthermIR är en termisk modelleringsprogramvara som används för att förutsäga temperaturfördelningen hos strukturer, markbaserade fordon, fartyg, flygplan, byggnader eller människor. Med programvaran kan de stationära eller dynamiska termiska förhållandena,

<sup>23</sup> Ove Gustafsson, Pär Glendor, "Infrared signature simulations of a mobile camouflage for a heavy military vehicle," Proc. SPIE 11158, Target and Background Signatures V, 111580D (17 October 2019); doi: 10.1117/12.2533452.

<sup>24</sup> ThermoAnalytics Inc, "Product description TAIthermIR", [www.thermoanalytics.com/products/taithermir](http://www.thermoanalytics.com/products/taithermir), [accessed 2018-10-03].

till exempel för markbaserade fordon, beräknas. Programmet använder skalmodeller med endimensionella beskrivningar av material, även ibland även benämnda 2.5D. TAIThermIR beskriver värmeavledning inom modellens underdelar (polygoner) men också värmeöverföring mellan delar inom modellen, med energiflöden mellan modellen och dess omgivningar. Modellen simulerar värmeöverföring som sker med konvektion, ledning och strålning.

Ursprungligen genomfördes IR-signatursimulering för stridsvagnen utan kamouflage. Senare (inom FoT SAT-projektet) utfördes motsvarande signatursimulering för samma typ av tank men med kamouflage monterat på modellen. Det mobila kamouflaget består av ett antal paneler där varje panel består av flera lager, av bl.a. isolerande material, som är fästa vid stridsvagnen. Dessa paneler täcker alla stridsvagnens synliga ytor med undantag för utblickar och prismor, samt delar av drivband. Under inloppet av friskluft och utloppet av varmluft och avgaser byggdes olika strukturer som döljs med motsvarande paneler. Figur 17 visar den färdiga modellen med MCS.



Figur 17. Modell av det mobila kamouflaget (MCS) på stridsvagn.

Modelleringen fokuserade på att återskapa panelerna i kamouflaget och att placera sömmarna och skarvarna mellan panelerna på rätt plats. Kamouflaget består av ett ganska tjockt och styvt material och dess egenvikt gör att en mängd veck uppstår. Dessa veck modellerades inte fullt ut, inte heller att de verkliga panelerna gled isär något under körning av den kamouflerade stridsvagnen på övningsfältet. För detaljer kring modelleringsresultaten se tidigare rapportering.<sup>14,23</sup>

### 3.3 Inkludering av CFD-beräkningar

#### 3.3.1 Avgasspågenerering från stridsvagn T-72

Ett fordon's IR-signatur består av egenstrålning och reflekterad strålning. Egenstrålningen kommer från själva fordonet men även från dess avgaser och kyl Luft. Fordonssignaturer ställs vanligtvis i relation till dess omgivning, det vill säga förgrund och bakgrund. I vissa fall kan även avtryck i omgivningen uppfattas som en signatur som kan avslöjande närvaro och aktivitet, då exempelvis spår och uppvärmning av omgivning kan visa närvaro och position. I detta sammanhang är därför avgasemissionen från fordon av intresse då emitterade avgaser kan uppfattas av bildalstrande IR-sensorer, men även för dess betydelse som spårbildare. I studien har stridsvagn T-72 använts som exempel.

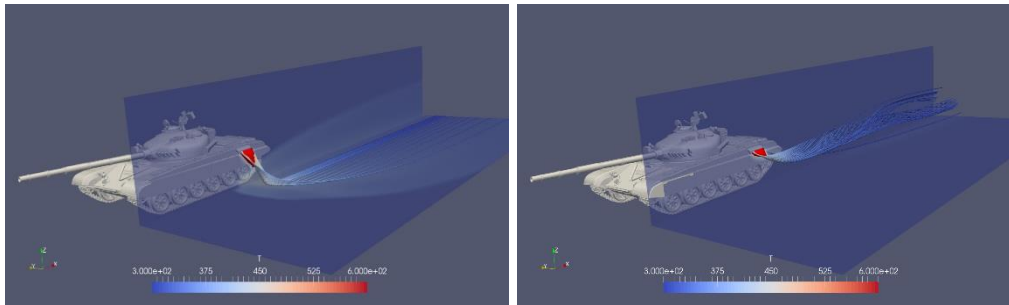
Mängden avgaser som emitteras från olika typer av stridsvagnar, exempelvis T-72 och T-90, uppskattades utifrån bränsleförbrukning och typ av motor. Gasflödet ur avgasröret beräknades därefter utifrån uppskattad tvärsnittsarea. Utifrån dessa beräkningar har CFD-simuleringar genomförts med angivet avgasflöde och olika simulerade hastigheter. Bilder från dessa CFD-simuleringar har studerats.



Flödessimuleringar genomfördes med CFD-beräkningsprogrammet *Open Foam*, med hjälp av applikationen *rhoSimpleFoam*. Simuleringarna baseras på så kallad RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes), vilket innebär att lösningen antas bestå av ett medelströmfält med en kringliggande turbulent variabilitet.

Vid beräkningarna antogs att gashastigheten ut från avgasröret är ca 18 m/s, utgående från storlek på avgasrör samt avgasmängd enligt texten ovan. Avgastemperaturen antogs inledningsvis vara 450 K, men antogs senare vara 600 K. Den verkliga avgastemperaturen från en T-72:a har ännu inte kunnat mätas.

Den verkliga avgasplymen från T-72:an innehåller stora mängder partiklar och uppfattas som smutsig med dålig förbränning. Motortillståndet har stor betydelse för genereringen av partiklar, exempelvis vid kallstarter och accelerationer då motorn tillförs mer bränsle än vad den klarar av att förbränna, vilket skapar stora rökmoln. Motorn har inte heller något partikelfilter. Vi har inte inkluderat partiklar i CFD-simuleringarna av avgasplymen. Beräkningarna gjordes med en mycket förenklad fordonsgeometri i form av en box. I Figur 18 visas dock T-72:an för att ge en geometrisk relation till avgasplymen.



Figur 18. Avgasplym från T-72:a beräknad med dubbel beräkningsdomän. I bilden t.v. är vindfältet, dvs. fartvinden, 5 km/h och i bilden t.h. är den 20 km/h. Avgastemperaturen är 600 K i båda fallen.

CFD-simuleringarna av avgasplymen visar (se Figur 18) att vid låga vindhastigheter (5 km/h respektive 10 km/h) kommer plymen att nå marken och ju lägre hastigheten är desto mer avgaser når marken. Vid hastigheter kring 20 km/h kommer knappt någon del av avgasplymen att nå marken. Även för en T-72:a som kör i terrängen eller på ett fält kan hastigheten överstiga 20 km/h, vilket skulle indikera att avgasen normalt inte borde värma upp marken vid förflyttning.

Svårigheter med att bestämma avgasplymens höjd vid IR-signaturmätningar av T-72:an kan delvis förklaras med att det inte var avsikten med mätningarna då de utfördes (fältprov i Skövde, den 21–24 augusti 2017). Dessa genomfördes för att mäta IR-signatur av skrov men har vid detta senare tillfälle använts för att analysera data för att avgöra avgasplymens egenskaper.

Sålunda indikerar CFD-simuleringarna att marken normalt inte värms upp vid förflyttning, speciellt vid högre hastigheter. Men samtidigt kan tidigare IR-mätningar tolkas som att det just är marken som värms upp och lämnar ett spår efter fordonet. En slutsats är att det inte går att entydigt avgöra huruvida det är markuppvärmning eller avgaserna som ger ett spår under vissa förutsättningar. För att avgöra denna fråga planerar vi inom kommande projekt att analysera mätdata från de senaste fältförsöken (se kapitel 3.5).

## 3.4 Plymmodellering för stridsvagn

### 3.4.1 Bakgrund

Det har tidigare nämnts att högupplöst IR-signaturmodellering för olika typer av objekt utförs med programvaran TAIThermIR. Resultat från dessa beräkningar kan sedan användas

för scenmodellering i programvaran SE-Workbench från OKTAL-SE,<sup>25</sup> exempelvis för att utvärdera olika sensorer och signalbehandlings-algoritmer eller för att generera större mängder data för att träna algoritmer för automatisk måligenkänning (ATR) för robotar och UAV:er.<sup>26</sup>

Här ges exempel sådan typ av scenmodellering med SE-Workbench med fordon modellerade i TAIThermIR. Figur 19 visar stillbilder av två MT-LB-vagnar och en stridsvagn T-72 ur filmsekvenser som tagits med en CCD-kamera i det visuella våglängdsområdet och en IR-kamera i 8–9  $\mu\text{m}$ -bandet. I figuren är det vänstra bildparet från mätningar<sup>27</sup> och det högra bildparet är från en simulering. I den uppmätta IR-bilden ses ett spår av heta avgaser efter T-72:an medan avgasspåret i den simulerade bilden inte är fysikaliskt korrekt simulerat utan bara manuellt inlagt efteråt för att likna mätfallet. Någon annan möjlighet att inkludera avgasplymer har hittills inte funnits, men nedan beskriver vi kort möjligheten med en nyförvärvad programvara som kan användas i kombination med TAIThermIR och SE-Workbench.



Figur 19. Stillbilder av två MT-LB och en T-72:a (i mitten) från en filmsekvens tagen vid fältförsök (t.v.) och motsvarande simulerade scen (t.h.). De övre bilderna är i LWIR och de nedre i det visuella området.

### 3.4.2 Plymmodellering för T-72:an

För att inkludera värmeöverföring från en gas krävs plymmodellering. Denna innehåller två komponenter:

- en flödesdynamisk beräkning (CFD-beräkning)
- en radiansberäkning.

<sup>25</sup> [<http://www.oktal-se.fr>]

<sup>26</sup> Näsström, F., Allvar, J., Deleskog, V., *Simulation framework for research of "intelligent" reconnaissance systems*, NATO Military Sensing Symposium, 2017. (Parallell publishing FOI-S--5811--SE.)

<sup>27</sup> Mätningar från fältförsök i Kvarn, 2004-09-11

Exempel på koder för CFD-beräkningar är OpenFoam<sup>28</sup>, M-EDGE<sup>29</sup> och PLUMES<sup>30</sup>. Vi har testat OpenFoam, som dock bedöms vara allt för komplicerad för våra ändamål. M-EDGE är en kod för höga flödeshastigheter, så den är inte heller lämplig. PHOENICS är också en alltför sofistikerad metod medan PLUMES från S&C Thermofluids är en förenklad variant av PHOENICS. Vi har därför valt att arbeta med programvaran PLUMES och har med den gjort inledande modellering av stridsvagn T-72.

För radiansberäkningar används PLUMES i kombination med SE-Workbench. Andra möjligheter finns för att utföra radiansberäkningar, såsom med SAFIR<sup>31</sup> och MuSES<sup>32</sup> från ThermoAnalytics. Vi har dock inte tillgång till MuSES utan denna programvara måste i så fall köpas in. Vi har även planerat att undersöka möjligheten att med hjälp av företaget S&C Thermofluids anpassa PLUMES till TAIThermIR, för att kunna beräkna plymradiansen och dess strålningpåverkan (eng. *impingement*) till skrovsigaturen.

Med PLUMES har S&C Thermofluids löst problemet med hur gaser blandas och strömmar, vilket är något som måste beräknas innan man går vidare och utför en radiansberäkning. Beräkningar av radians från fordonet och avgasplymen sker dock här separat. När flödesberäkningen är gjord översätts data till ett speciellt format (CGNS) för att få fram temperatur, tryck och kemisk sammansättning hos avgasplymen, som behövs för att utföra beräkning i SE-Workbench.

Spektrala data kommer från en databas med olika typer av molekyldata, där ämnena som hanteras är indelade i tre kategorier:

- Aktiva ämnen som bidrar till plymsigaturen (H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CO).
- Inaktiva ämnen som bara indirekt bidrar till plymsigaturen men tar upp volym (N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>).
- Partiklar som kräver en annan sorts hantering och kan t.ex. orsaka spridning (C).

Plymen renderas genom ett avancerat tillvägagångssätt för strålningstransport baserat på en högupplöst spektralberäkningsmetod, där gaskoncentration och atmosfäriska förhållanden används som ingångsdata.<sup>33</sup>

Figur 20 visar en radiansbild inom våglängdsområdet MWIR renderad med PLUMES och SE-Workbench, men där skrovsigaturen hos fordonet är genererad separat med TAIThermIR. "Klumpen" i änden av plymen är troligtvis resultatet av ett för litet beräkningsrutnät. Marken är inte inkluderad i den här inledande beräkningen, men det kan göras. Inom ett kommande projekt kommer vi att arbeta med att utveckla modelleringssättet med programvaran och hur vi på bästa sätt kan skapa validerade plymsignaturer, där även plymens påverkan på skrov och dess närmaste omgivning kan inkluderas till en total IR-sigatur för markfordon.

---

<sup>28</sup> <https://openfoam.org/>

<sup>29</sup> Edge Theoretical Formulation, Information and Aeronautical Systems FOI dnr 03-2870, April 2014, Issue 5.3

<sup>30</sup> <http://thermofluids.co.uk/plumes.php>

<sup>31</sup> Marlene Johansson, SAFIR v.2.1 - Users Guide, FOI MEMO 3501, februari 2011

<sup>32</sup> <https://www.thermoanalytics.com/products/muses>

<sup>33</sup> S. Perzon (GoVirtual AB, Sweden), N. Douchin, T. Cathala, A. Joly (Oktal Synthetic Environment, France), *Aircraft infrared signature, taken into account body, engine and plume contributions*, [<http://www.oktalse.fr/website/publications.php>]





Figur 20. Radiansbild inom MWIR med avgasplymen från en T-72:a genererad med PLUMES och SE-Workbench, där skrovsignaturberäkningen av T-72:an är genererad separat med TAIthermIR.

### 3.5 Mätning och validering: Fältförsök i Skövde

Vid ett fältförsök den 13–14 juni 2019 genomfördes signaturmätningar på ett övningsfält sydost om Skövde. Vid försöken mättes IR-signaturer på fem olika fordon: T-72, BTR-70, MT-LB, tankbil och en Volvo V70, som mättes både i MWIR och LWIR. Temperaturen mättes med s.k. temperaturlogger på ett antal olika punkter på fordonen under fältprovet. Väderdata samt solinstrålningen mättes i samband med signaturmätningarna ca 30 m från provbanan. Provbanan bestod av en drygt 1 km lång asfalterad raksträcka som avslutades med en sväng med ca 150 m radie. I början av raksträckan var en kranbil med IR-kameror och en mättrailer (innehållande datorer länkade med kameror och annan utrustning) uppställda.

#### 3.5.1 Genomförande

Vid signaturmätningarna varmkördes fordonen varefter de kördes på den asfalterade delen av provbanan med olika hastigheter. IR-kamerorna som var monterade på kranbilsarmen lyftes upp över provbanan på höjden 5 m alternativt 38 m (se Figur 21). I scenen längs banans längdriktning söder om kranbil och trailer placerades tre stycken temperaturreferenser för att kunna kompensera bort egenstrålningen från objektiven på kamerorna. Objektivens temperatur varierar och måste därför justeras flera gånger under dagen. Temperaturreferenserna hade temperaturerna  $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $25^{\circ}\text{C}$  och  $50^{\circ}\text{C}$ .

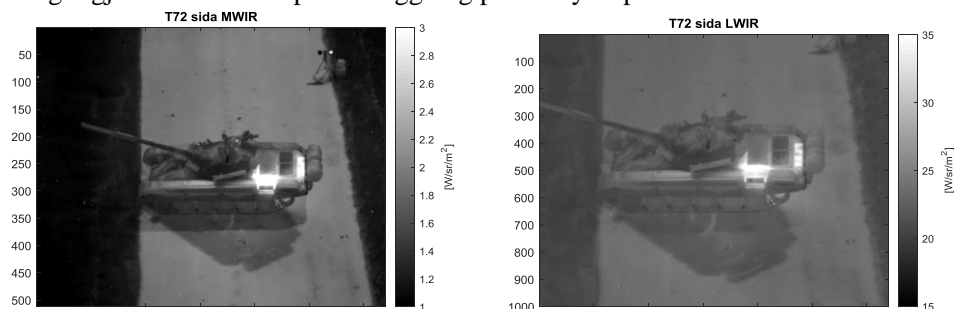
Vädret varierade under signaturmätningarna med spridda moln till täckande moln och temperaturen varierade från ca  $15^{\circ}\text{C}$  till drygt  $21^{\circ}\text{C}$ . Solinstrålningen varierade kraftigt, speciellt under tiden då molntäcket var uppbrutet, medan sikten var i stort sett god under hela signaturmätningen.



Figur 21. IR-signaturmätning vid provbanan, t.v. med IR-kamerorna i upphöjt läge och t.h. med kranarmen nedsänkt till marken för montering. Hitom kranbilen syns mättrailern.

### 3.5.2 Stridsvagn T-72

I det följande ges exempel på resultat från preliminär analys av mätningarna på stridsvagn T-72. Målsättningen med signaturmätningen vara att ta fram en del av ett utökat underlag för simulering och modellering. T-72:an används fortfarande av många länder och nyare varianter bygger på tidigare versioner av stridsvagnen. Därför finns det fortfarande intresse för IR-signaturen hos T-72:an. Bl.a. har det varit av intresse att utreda signaturbidraget från heta punkter såsom avgasutblåset, men även avgasplymens signatur. Exempel på översiktsbilder från de kalibrerade radiansmätningarna visas i Figur 22 och Figur 24. Utöver IR-mätningar gjordes också temperaturloggning på flera ytor på fordonet.



Figur 22. Radiansbild t.v. från MWIR-kamera och t.h. från LWIR-kamera, på uppvärmd T-72:a stillstående sett från sidan och snett uppfån. Den ljusa springan vid avgasröret har en radians i MWIR på ca  $13 \text{ W/sr/m}^2$ . Observera att motordelarna är överstyrda i bilden.

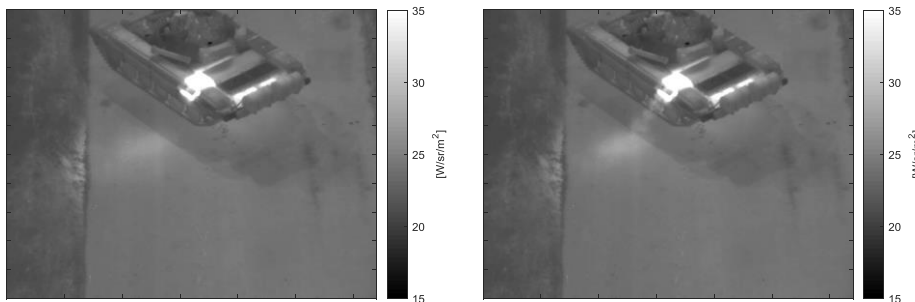
### 3.5.3 IR-signatur från avgassystem och avgasplym från T-72

Detaljbilder av exempelvis avgasröret (se Figur 23) visar att monteringen av temperaturlogger i en tjock aluminiumplåt inte var helt lyckad, då den inte tycks värmas upp på samma sätt som IR-emissionsdämparplåtarna monterade på avgasröret. Detta noterades även i data från loggern.

Under mätningarna gjordes två stickprov på avgasutblåsets luftflöde. Vid tomgång var luft hastigheten  $6,28 \text{ m/s}$  med temperaturen  $61,6 \text{ }^\circ\text{C}$ , och motsvarande vid  $1000 \text{ varv/min}$  var  $15,9 \text{ m/s}$  och  $75 \text{ }^\circ\text{C}$ . Lufthastigheten och temperaturen mättes med en handhållen vind- och temperaturmätare.

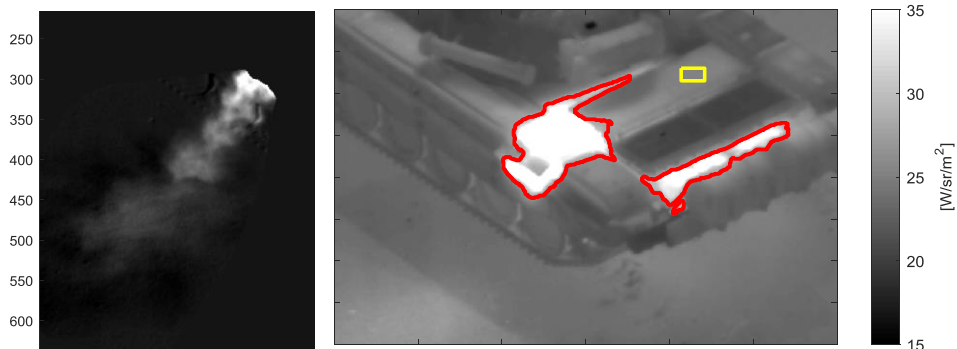


Figur 23. Närbild på T-72:ans avgasutblås inom LWIR. Notera att positionen för temperaturmätningen på avgasutblåset är ovanpå värmeskölden.



Figur 24. Radiansfördelning på T-72:an utan (t.v.) och med (t.h.) avgasplym inom våglängdsbandet LWIR. Bilderna är ur en sekvens där T-72:an varierar motorpådraget kraftigt och därmed finns exempel både med och utan plyn, men som i övrigt är mycket lika.

I Figur 24 visas en T-72:a med och utan avgasplym, vilket är möjligt då den stod stilla och varierade gaspådraget. Därmed kan plymen analyseras separerat, vilket visas i Figur 25 (vänster bild). En motsvarande separation av själva motorn är inte lika lätt, utan vi antog istället vilken strålning som härrör från motorn och vilken referensnivå som motorn skulle haft om den inte var på. Dessa radiansvärden med markerade ytreioner visas i Figur 25 (höger bild). Med detta underlag kan vi beräkna att motorns överskottsintensitet jämfört med referensnivån är 50 W/sr och ökningen som orsakas av plymen är 6 W/sr. Detta ger att avgasplymen utgör 10 % av signaturökningen när fordonet körs jämfört med stillastående, inom våglängdsbandet LWIR.



Figur 25. Bilden t.v. visar en kontrastförstärkt bild av plymen i LWIR. Bilden t.h. visar de regioner som använts vid motorberäkningarna i LWIR. De röda regionerna är positiv motorkontrast, dvs. extra strålning från motorn. Ytan i den gula rutan användes som referens med den radians som det röda området antas ha haft om motorn hade varit avstängd.

## 4 Radarsignatur för flygande plattform

Projektet har genomfört arbete kring radarsignatur-modellering för flygande plattformar. Arbetet har framförallt varit fokuserat på metodik för modellering och beräkning av radarsignaturen för objekt med beräkningsmässigt komplicerade delstrukturer. Exempel på sådana är kaviteter (i t.ex. luftintag och motorutblås), kanter, skarvar och antenner. Dessa bidrag till den totala radarsignaturen är erkänt svåra att modellera och beräkna, men de utgör inte sällan en stor del av radarsignaturen för ett modernt stridsflygplan, särskilt för smyganpassade flygplan. Nedan följer en kort sammanfattning av exempel på arbete som har genomförts inom projektet. I ett kommande signaturmodelleringsprojekt planeras fortsatt arbete kring ovanstående utmaningar.

Resultat inom detta arbete har varit inriktat mot att svara på frågeställningen:

- *Vilken metodik bör användas för att integrera signaturberäkningar utförda med olika metoder (hybridmetoder), t.ex. gällande kavitet+skrov och antenner+skrov?*

### 4.1 Hybridmetodik

Då radarsignaturen för ett stort och samtidigt komplicerat målobjekt, t.ex. ett flygplan med luftintag, vingkanter och antenner ska beräknas på ett noggrant sätt kan flera olika elektromagnetiska beräkningsmetoder behöva användas. Beräkningseffektiva och för radarsignaturberäkningar erkända högfrekvensapproximationsmetoder är nödvändiga för större skrovgeometrier. Samtidigt kan inverkan av geometriskt mindre men beräkningsmässigt svåra strukturer behöva beräknas med ”icke-approximativa”, dvs. mer tids- och minneskrävande metoder.

En praktiskt tillämpbar metodik för att hantera detta har föreslagits. För en utförlig redogörelse se rapport.<sup>34</sup> Metodiken kan sammanfattas i tre steg:

1. Beräkning av radarspridningen från komplicerade delstrukturer. Här används icke-approximativa och därmed ofta beräkningstunga metoder, t.ex. MoM (*Method of Moments*) och MLFMM (*Multilevel Fast Multipole Method*).
2. Beräkning av radarspridningen från ”huvuddelen” av målobjektet, t.ex. ett flygskrov, utan inverkan av de komplicerade delstrukturerna. Här används de approximativa metoderna, geometrisk och fysikalisk optik (GO och PO), som är hanterbara beräkningsmässigt och samtidigt fungerar mycket bra för strukturer som är mycket större än våglängden hos radarvågen. Även diffraktionsteori kan läggas till.
3. Delresultaten från 1 och 2 läggs samman koherent, dvs. med hänsyn tagen till både amplitud och fas hos elektriska fälten, samt med hänsyn tagen till eventuella skuggningseffekter för objektet. Därefter kan radarmålarean för hela objektet enkelt beräknas.

Den framtagna metodiken har testats i ett omfattande arbete genom beräkningar och mätningar av radarmålarean för en skalmodell av jaktplanet MiG-29 vars kaviteter i luftintagen är beräkningsmässigt komplicerade. Figur 26 visar bilder av skalmodellen.

---

<sup>34</sup> Å. Andersson, M. Gustavsson, R. Jonsson, N. Karlsson, ”Metodik för beräkning av radarsignatur för objekt med komplicerade delstrukturer,” FOI-rapport FOI-RH--1899--SE, Linköping, 2017.



Figur 26. Skalmmodell av MiG-29:a, t.v. illustration av geometrmodellen som användes för GO/PO-beräkningarna, rödmarkerade luftintag, t.h. ett foto av modellen (uppochnervänd) vid radarmätplatsen.

Metodikerna har validerats genom att jämföra den beräknade radarmålarean med resultat från MLFMM, en ”icke-approximativ” beräkningsmetod, här att betrakta som ”facit”. Denna beräkning är praktiskt genomförbar endast för en skalmmodell och inte för ett fullskaleobjekt. Vidare har mätningar av modellens radarmålarea utförts och beräkningsresultat har jämförts med dessa mätningar. Mycket god överensstämmelse mellan radarmålarea beräknad med den framtagna metodiken och med den ”exakta” beräkningsmetoden har uppnåtts. Signaturbidragen från kaviteterna är nu väl representerade. Vissa mindre avvikelser kvarstår. En god överensstämmelse mellan mätningar och beräkningar noteras. Metodik och resultaten redovisas i en sekretessbelagd rapport.<sup>34</sup>

Slutsatserna från dessa studier av skalmmodellen bedöms gälla även för ett fullskaleobjekt, eftersom de approximativa metoderna för samma frekvenser då ger ännu bättre resultat. Metodikens tillämpbarhet och nytta för militära plattformar bedöms vara stor. Den har redan använts i flera tillämpade projekt rörande radarsignaturberäkningar för ”skarpa” målobjekt.

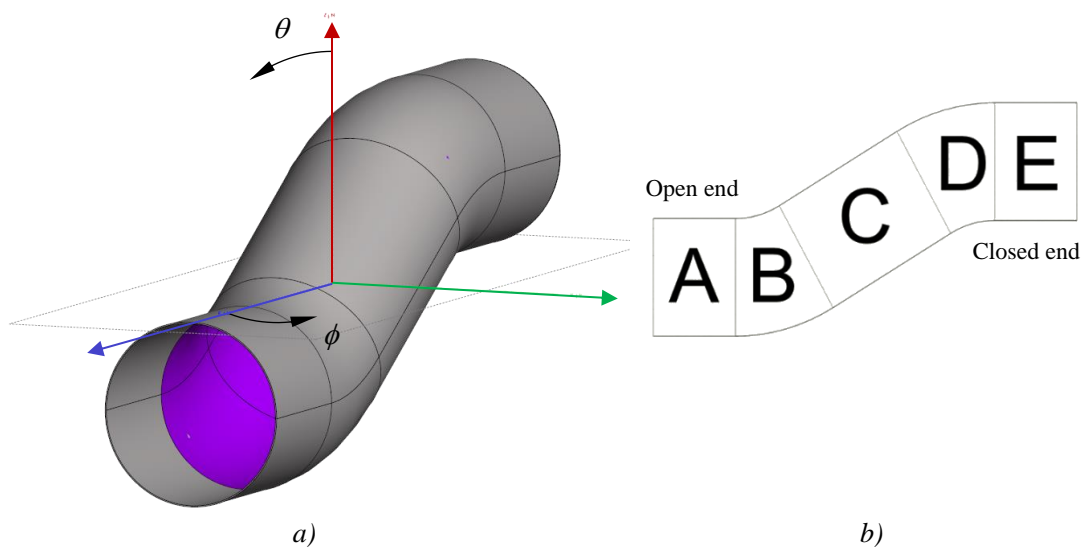
## 4.2 Radarmålareaberäkningar för S-kavitet

Inom projektet har beräkningar av monostatisk radarmålarea för en cylindrisk S-formad kavitet genomförts, där beräkningsmodellen ses i Figur 27. Just den böjda formen innebär extra utmaningar. Syftet med beräkningarna är att studera möjligheter och begränsningar med olika beräkningsmetoder. Exempel på använda metoder är MoM, MLFMM, geometrisk och fysikalisk optik samt iterativ fysikalisk optik. Kaviteten, som är stängd i bakkant, har modellerats både som helt metallisk (PEC, *Perfect Electric Conducting*) samt med insidan delvis (sektion B, C och D i Figur 27) belagd med radarabsorberande material (RAM) svarande mot FGM-U-40<sup>35</sup>.

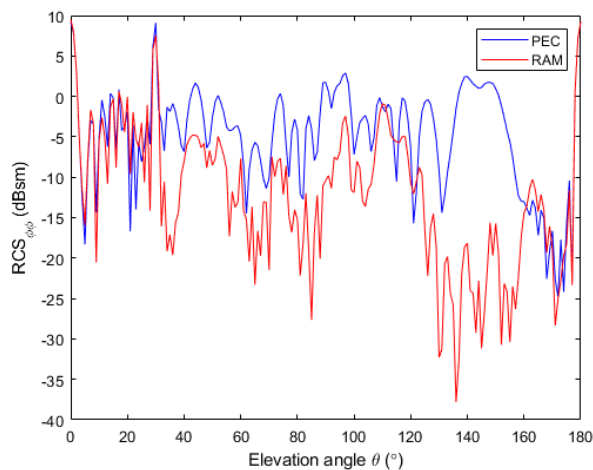
Kaviteten är 1,2 m lång och har en innerdiameter på 30 cm samt godstjockleken 2 mm. Beräkningar har utförts vid 10 GHz för vinklar tvärs över kavitetsöppningen ( $\theta = 0^\circ - 180^\circ$ , samt  $\phi = 0^\circ - 90^\circ$ ) för horisontell samt vertikal polarisation i verktyget FEKO<sup>36</sup>. I Figur 28 visas ett exempel på resultat från beräkningar av radarmålarean utan (beräkning med MoM) och med radarabsorbent (beräkning med MLFMM och ”coating 4”), vid 10 GHz, för HH-polarisation (utsänd och mottagen horisontell polarisation).

<sup>35</sup> ECCOSORB® FGM, Laird Technologies 2019. Tillgänglig: <http://www.eccosorb.com/products-eccosorb-fgm.htm> [17 oktober 2019]

<sup>36</sup> FEKO, Altair HyperWorks 2019. Altair Engineering Inc. USA, 2019. [Programvara]. Tillgänglig: <https://altairhyperworks.com/product/FEKO> [28 oktober 2019]



Figur 27. Beräkningsmodell av S-formad kavitet: a) metalliskt material i grått, radarabsorbent i lila, b) tvärsnittsvy från sidan.



Figur 28. Beräknad radarmålarea för S-kaviteten utan (blå kurva) och med RAM (röd kurva) vid 10 GHz, HH-polarisation, som funktion av elevationsvinkeln  $\theta$ , uppifrån och ner över kavitetsöppningen.

Radarabsorbentens dämpande egenskaper syns tydligt. Mätningar av radarmålarean för S-kaviteten har tidigare genomförts av FOI<sup>37</sup>. Ytterligare arbete rörande hantering av kavitetens inverkan på radarsignaturen för flygplattformar planeras.

FOI har föreslagit S-kaviteten som ett beräkningsfall för workshopen *EDA-Workshop on Radar Signatures and EM Benchmarks*, november 2019. Vidare har vi utfört beräkningar och mätningar av radarmålarea för det specificerade beräkningsfallet ”trunkerad kon” inom detta EDA-samarbete. Resultaten för S-kavitet och kon planeras att presenteras på workshopen.

<sup>37</sup> E. Zdansky, J. Rahm, A. Örbom, M. Gustafsson, M. Herberthson, ”Validation of IPO: S-duct cavity,” FOI-rapport FOI-R--3178--SE, Linköping, 2011.

## 5 Radarsignatur för objekt i bakgrund

FOI har under många år arbetat med metodik för att beräkna radarsignatur för objekt i bakgrund för mark- och sjöfallet<sup>38, 39</sup>. Detta är ett stort forskningsområde världen över med många svåra utmaningar. Projektets arbete inom området har pågått i en begränsad omfattning beroende på ett aktivt val att fokusera resurserna till arbete rörande radarsignatur för flygande plattform. Det är dock viktigt att notera att FOI har för avsikt att på sikt återuppta arbetet. Nedan följer en kort sammanfattning av arbetet inom radarsignatur för objekt i bakgrund.

FOI har utvecklat en unik facilitet för att mäta olika marktypers bistatiska radarmålarea.<sup>40</sup> Metodik för att beräkna bistatisk markspridning är under utveckling, men komplettering med den icke-koherenta spridningen behövs. Beräkningsmetoder som exempelvis iterativ fysikalisk optik kan användas vid validering. Arbete med modellering och mätning av markspridning har genomförts.

Projektet har även arbetat med metodikutveckling för beräkning av radarmålarea för fartyg med inverkan av vattenytan<sup>41</sup>. Inverkan på radarmålarean av sjötillstånd och fartygets rörelse i vattenytan har tidigare studerats generiskt. En beräkningsmetodik har tagits fram för att inkludera spridningen från en vattenyta vid flacka hotriktningar har utvecklats och använts framgångsrikt i flera ”skarpa” beräkningar<sup>42</sup>. Flera välkända svåra problem återstår dock. Detta innefattar exempelvis inverkan av kapillärvågor, kölvatten och höga sjötillstånd.

---

<sup>38</sup> J. Fagerström, Å. Andersson, S. Björkert, M. Gustafsson, M. Herberthson, R. Lindell, N. Karlsson, N. Wellander, E. Zdansky, A. Örbom, ”Plattformssignaturer. Slutrapport 2013,” FOI-rapport FOI-R--3766--SE, Linköping, 2013.

<sup>39</sup> J. Fagerström, Å. Andersson, Jimmy Berggren, S. Björkert, Ove Gustavsson, M. Gustavsson, T. Hallberg, N. Karlsson, R. Lindell, K. Pettersson, A. Pohl, I. Renhorn, N. Wellander, M. Wilow, E. Zdansky, ”Signaturmodellering 2014-2016. Slutrapport 2013,” FOI-rapport FOI-R--4357--SE, Linköping, 2016.

<sup>40</sup> M. Gustafsson, M. Herberthson, J. Rahm, E. Zdansky and A. Örbom, ”A New Methodology for Measuring the Bistatic Ground Scattering Coefficient. Comparisons With the AIEM at Large Bistatic Angles,” in IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 10, no. 5, pp. 1167-1170, Sept. 2013.

<sup>41</sup> Å. Andersson, ”Modellering av sjöytans inverkan på radarsignaturen för fartyg,” FOI-rapport FOI-R--4151--SE, Linköping, 2015.

<sup>42</sup> Å. Andersson och M. Gustavsson, ”Beräkning av radarmålarea för målfartyg A 2016. Underlag till FLSC,” FOI-rapport FOI-RH--1728--SE, Linköping, 2016.

## 6 Slutsatser

Det finns ett stort behov av modeller, data och kunskap om signaturer inom exempelvis telekrig, duellsimulering, sensorvärdering, måligenkänning, modifiering och nyutveckling av materiel. Det övergripande syftet med projektet har varit att FOI ska ha förmåga att tillhandahålla signaturdata genom validerade modelleringsmetoder. Projektet har utvecklat och upprätthållit förmågan att modellera, beräkna och värdera radar- och EO/IR-signaturer.

Projektgruppen inom signaturmodellering har under en lång tid byggt upp en hög kompetens inom beräkningsmetoder för både radar- och EO/IR-området, där man för båda fallen oftast även ska ta hänsyn till bakgrundens inverkan. Olika beräkningsmetoder och verktyg används för olika fall och tillämpningar och de har alla sina för- och nackdelar samt begränsningar i olika situationer, beträffande t.ex. noggrannhet, beräkningstid och krav på datorkapacitet.

Resultaten från projektet kommer direkt eller indirekt till Försvarsmaktens nytta via bl.a. olika tillämpade projekt som använder kompetens och signaturberäkningsmetodik utvecklad inom projektet. Exempel på denna nytta har vi presenterat här i rapporten där metodiken bl.a. har utvecklats för att skapa en objektmodell genom laserskanning på skalenliga eller fullskaliga objekt, med efterföljande framtagning av CAD-modell som används för signaturberäkningarna. Dessa beräkningar har vi sedan jämfört med mätningar på motsvarande objekt för att validera resultaten.

Specifikt inom radarområdet har vi utvecklat hybridmetodiken för att kunna beräkna signaturen för en hel plattform med komplicerade delstrukturer, där den stora skrovytan kräver approximativa beräkningsmetoder och där icke-approximativa metoder behövs för att ta hänsyn till detaljer på skrovytan som kan ge ett betydande signaturbidrag hos bl.a. signaturanpassade smygfarkoster. Beräkningsresultaten med de olika metoderna summeras sedan koherent för att erhålla en total signatur. Inom IR-området har vi bl.a. utvecklat förmågan att beräkna signaturbidraget från avgasplymer hos markfordon. Flödesberäkningar på plymer har utförts för att kunna bedöma dels hur den dels kan påverka uppvärmning av marken beroende på fordonets hastighet och dels för att beräkna radiansen hos plymen, för att sedan addera detta bidrag till skrovsigaturen. Medverkan i fältförsök där mätningar har gjorts på markfordon under olika driftsförhållanden kommer att ligga till grund för validering av beräkningar inom framtida arbete.

Medverkan i olika internationella samarbeten, såsom NATO-grupper, har varit betydande och viktig för att bevaka kunskapsfronten inom signaturmodelleringsområdet och för att skapa ett kontaktnät med andra forskare och användare av signaturberäkningsverktyg. Även deltagandet vid konferenser, seminarier och workshops har varit av stor nytta av samma skäl samt för att sprida resultat från projektet.

Det är dock viktigt att fortsätta förbättra eller komplettera beräkningsförmågan inom både radar- och EO/IR-området. Inom radarområdet gäller det bl.a. beräkningar av vingframkantar, kaviteter, antenner och mål-markinteraktion, medan det inom IR-området är nödvändigt att utveckla metodik och beräkningsförmågan kring flammor och plymer och speciellt hur plymradiansen växelverkar med skrov och bakgrund. I samtliga fall är det dessutom viktigt med bra CAD-verktyg med utvecklad användarmetodik för att ha nödvändiga förutsättningar att bl.a. utföra fasettering av skrovytor för signatur- och flödesberäkningar.

Inför kommande projekt för 2020–2022 har vi beaktat följande frågeställningar och behov och utgått från dessa i beredningen av projektet.

- Hur kan radar- och EO/IR-signaturer modelleras och beräknas för hela objekt, t.ex. skrov inklusive kaviteter, delstrukturer och flamma/plym i relevanta omgivningar.
- Vilka metoder är lämpliga för att modellera målsignaturer relevanta för kommande sensorhot (polarisationskänsliga, hyperspektrala, högupplösande radarsensorer, bistatisk radar, m.m.)?



## 7 Publikationer

Lista på projektets registrerade rapporter och memon under 2017–2019.

1. Anna Pohl, *Flamberäkningar och NATO-möte AVT-281 "Cross-Domain Platform EO-Signature Prediction"*, FOI MEMO 6233 (2017).
2. Åsa Andersson, Mathias Wilow, Erik Zdansky, *Redogörelse för FOIs deltagande i Nato SET-203, "Ship radar signature management system accuracy, sensitivity and confidence level"*, FOI MEMO 6250 (2017).
3. Tomas Hallberg, Anna Pohl, Jan Fagerström, *Simplifying BRDF input data for optical signature modeling*, FOI-S--5781--SE (2017).
4. Ove Gustafsson, Oskar Parmhed, *Avgasspågenerering från stridsvagn T-72*, FOI MEMO 6575 (2018).
5. Magnus Gustavsson, Åsa Andersson, Rolf Jonsson, Nils Karlsson, *RCS-calculation methodology tested on a scale model fighter aircraft*, FOI-S--5881--SE (2018).
6. Stefan Björkert, Anna Pohl, Mats Dalenbring, Tomas Hallberg, *Redovisning av milstolpe 2018 för projekt Signaturmodellering*, FOI MEMO 6574 (2018).
7. Anna Pohl, *Flammodellering i IR för land och sjöfarkoster*, FOI-D--0874--SE (2019).
8. Elena Cherkaev, Sébastien Guenneau, Niklas Wellander, *Forward and inverse homogenization of the electromagnetic properties of a quasiperiodic composite*, FOI-S--6073--SE (2019).

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](http://www.foi.se)