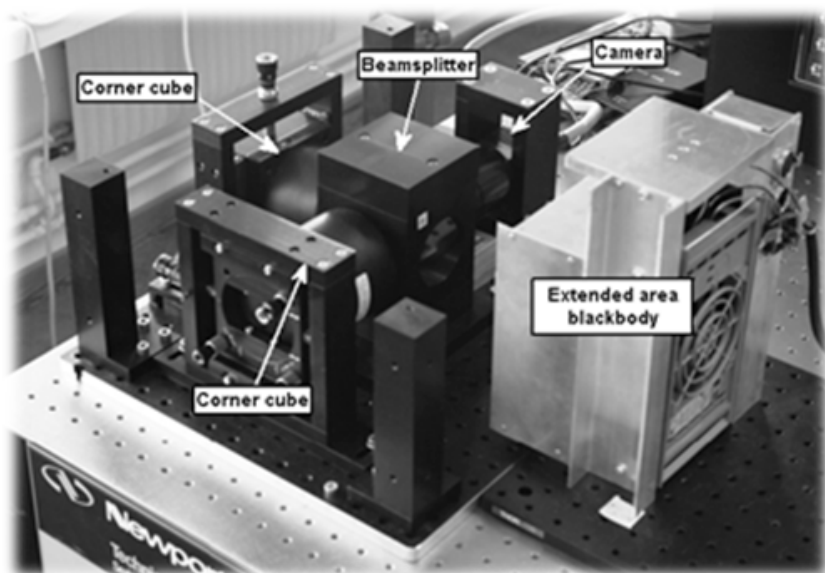
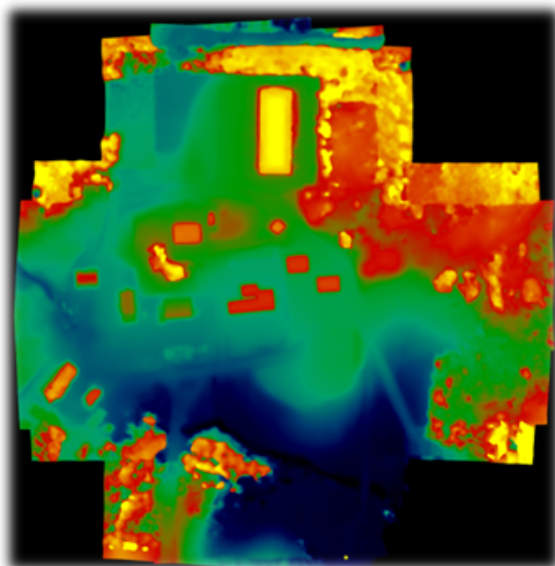
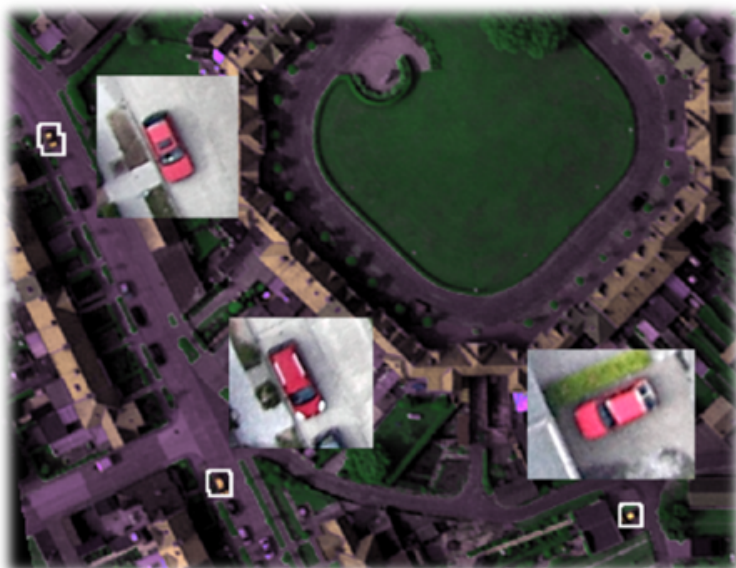


DAVID BERGSTRÖM, MIKAEL LUNDBERG, BRITTA LEVIN, THOMAS SVENSSON,  
MARIA AXELSSON, LINNÉA AXELSSON, JOHAN ERIKSSON, TOMAS HALLBERG,  
CHRISTINA ÅKERLIND, ERIKA BILOCK, JULIA HEDBORG, OLA FRIMAN OCH INGMAR RENHORN





David Bergström, Mikael Lundberg, Britta Levin,  
Thomas Svensson, Maria Axelsson, Linnéa  
Axelsson, Johan Eriksson, Tomas Hallberg,  
Christina Åkerlind, Erika Bilock, Julia Hedborg,  
Ola Friman och Ingmar Renhorn

# IR-spaning 2012-2014

Slutrapport

Titel	IR-spaning 2012-2014: Slutrapport
Title	IR-spaning 2012-2014: Final Report
Rapportnr/Report no	FOI-R--4014--SE
Månad/Month	December
Utgivningsår/Year	2014
Antal sidor/Pages	49 sidor
ISSN	1650-1942
Kund/Customer	Försvarsmakten
Forskningsområde	7. Sensorer och signaturanpassning
FoT-område	Sensorer och signaturanpassning
Projektnr/Project no	E54532
Godkänd av/Approved by	Martin Rantzer
Ansvarig avdelning	Sensor- och TK-system (STS)

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk. All form av kopiering, översättning eller bearbetning utan medgivande är förbjuden.

This work is protected under the Act on Copyright in Literary and Artistic Works (SFS 1960:729). Any form of reproduction, translation or modification without permission is prohibited.

## Sammanfattning

FoT-projektet IR-spaning har under åren 2012-2014 bedrivit fördjupade studier inom tre passiva elektrooptiska sensorteknikområden; mörkerförmåga, spektral avbildning och polarimetrisk avbildning. Områdena har identifierats som strategiskt viktiga för Försvarens framtida operativa och taktiska spaningsförmåga för såväl mark-, sjö- som luftarenorna och projektet har haft som syfte att höja kunskaps- och kompetensnivån inom dessa. Studier har varit av både teoretisk som experimentell karaktär och har haft som ambition att skapa en förståelse för hela den komplexa fenomenologikedjan från signaturer till den mänskliga operatören, med fokus på de sensornära frågeställningarna. Projektet har under perioden medfinansierat FOI:s deltagande i EDA-projektet DUCAS (*Detection in Urban scenario using Combined Airborne imaging Sensors*) samt i EU-projektet AIRBEAM (*AIRborne information for Emergency situation Awareness and Monitoring*).

Nyckelord: *spaning, övervakning, elektrooptik, mörkerförmåga, night vision, IR, polarimetri, multispektral, hyperspektral, signalbehandling, bildbehandling*

## Summary

In the years 2012 to 2014 the project “IR-spaning” has studied three passive electro-optical sensor technologies; night vision, spectral imaging and polarimetric imaging. These technologies have been identified as strategically important for the future reconnaissance capabilities of the Swedish Armed Forces for operations at sea, on land as well as in air. The project has conducted both theoretical and experimental studies with an ambition to raise the knowledge and understanding of the complex chain of phenomenologies from optical signatures to the discriminative abilities of the human operator, with special focus given to sensor-related issues. The project has during the time period co-financed the FOI participation in the EDA project DUCAS (*Detection in Urban scenario using Combined Airborne imaging Sensors*) and in the EU project AIRBEAM (*AIRborne information for Emergency situation Awareness and Monitoring*).

Keywords: *reconnaissance, surveillance, electro-optics, infrared, night vision, polarimetry, multispectral, hyperspectral, signal processing, image processing*

# Innehållsförteckning

<b>Förkortningar</b>	<b>6</b>
<b>1 Inledning</b>	<b>9</b>
1.1 Bakgrund.....	10
<b>2 Mörkerförmåga</b>	<b>13</b>
2.1 Förmågor för FM .....	13
2.2 Bakgrund.....	13
2.3 Highlights 2012-2014 .....	14
2.3.1 Generell studie om mörkersensorer .....	15
2.3.2 SWIR-studie.....	16
2.3.3 Räckviddsmodellering.....	17
2.3.4 Räckviddsförsök.....	20
2.4 Framtidsutblick .....	23
2.4.1 Nya möjligheter och förmågor med digitala lågljussensorer .....	23
2.4.2 Aktiv och passiv mörkerförmåga.....	23
2.5 Referenser .....	23
<b>3 Spektral avbildning</b>	<b>25</b>
3.1 Förmågor för FM .....	25
3.2 Bakgrund.....	25
3.2.1 Applikationsexempel 1: Terrängkartering .....	26
3.2.2 Applikationsexempel 2: Måldetektion och klassificering .....	28
3.3 Highlights 2012-2014 .....	30
3.3.1 DUCAS.....	30
3.3.2 Vidareutveckling av hyperspektralt sensorconcept i LWIR.....	35
3.4 Framtidsutblick .....	37
3.5 Referenser .....	39
<b>4 Polarimetrisk avbildning</b>	<b>41</b>
4.1 Förmågor för FM .....	41
4.2 Bakgrund.....	41
4.3 Highlights 2012-2014 .....	43
4.3.1 Polarimetrisk och spektropolarimetrisk sensorstudie .....	43
4.3.2 Polarimetrisk och spektropolarimetrisk signaturstudie .....	44
4.4 Framtidsutblick .....	46
4.5 Referenser .....	46
<b>5 Slutsatser</b>	<b>47</b>
<b>Appendix A: Lista över vetenskapliga rapporter och konferensbidrag</b>	<b>49</b>

## Förkortningar

<b>Förkortning</b>	<b>Förklaring</b>
ACE	Adaptive Coherence Estimator
AIRBEAM	AIRborne information for Emergency situation Awareness and Monitoring
BSI	Backside illumination
CCD	Charge-Coupled Device
CMOS	Complementary Metal-Oxide Semiconductor
DUCAS	Detection in Urban scenario using Combined Airborne imaging Sensors
EBAPS	Electron-bombarded Active Pixel Sensor
EBCMOS	Electron-bombarded CMOS
EDA	European Defence Agency
EMCCD	Electron-multiplying CCD
EO	Elektrooptik
FMV	Försvarets Materielverk
FOI	Totalförsvarets forskningsinstitut
FoT	Forskning- och Teknikutveckling
HOT	High Operating Temperature
I <sup>2</sup> CMOS	Image Intensified CMOS
ICCD	Intensified CCD
IED	Improvised Explosive Devices (improviserade sprängmedel)
InGaAs	Indium Gallium Arsenide
IR	Infraröd
IRV	IR-vision
LWIR	Långvågigt infraröda våglängdsområdet
MCT	Mercury Cadmium Telluride
MEMS	Mikroelektromekaniska system
MSS	Markstridsskolan (Kvarn)
NATO	North Atlantic Treaty Organization
NETD	Noise Equivalent Temperature Difference
NVG	Night Vision Goggle
NV-IPM	Night Vision Integrated Performance Model
QDIP	Quantum Dot Infrared Photodetector
QWIP	Quantum Well Infrared Photodetector
SAM	Spectral Angle Mapper
SfM	Structure from Motion



SWaP	Size, Weight and Power
SWaP-C	Size, Weight, Power and Cost
SWIR	Kortvågigt infraröda våglängdsområdet
T2SL	Type II Super Lattice detectors
TIR	Termiska infraröda våglängdsområdet
TRL	Technology Readiness Level
TTP	Targeting Task Performance
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UGV	Unmanned Ground Vehicle
VisGaAs	Visuellt anpassad InGaAs
VNIR	Visuella och nära infraröda våglängdsområdet



# 1 Inledning

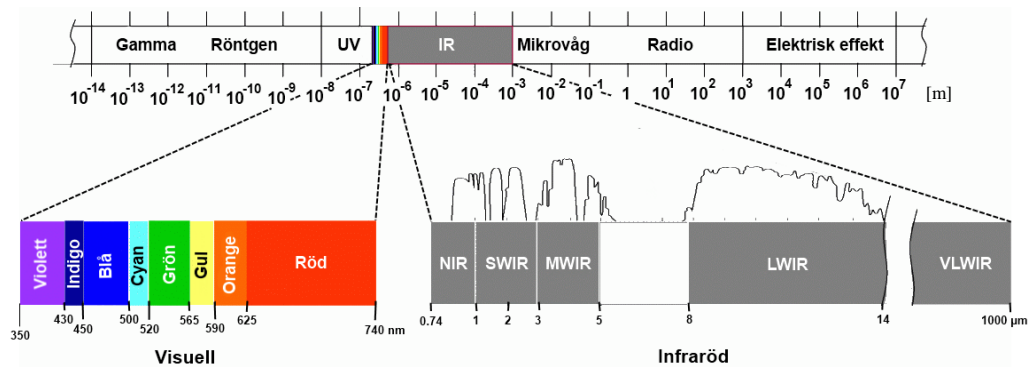
FoT-projektet IR-spaning har under åren 2012-2014 bedrivit fördjupade studier inom tre passiva elektrooptiska sensorteknikområden som bedömts vara av strategisk betydelse för Forsvarsmaktens framtida spaningsförmåga; mörkerförmåga, spektral avbildning och polarimetrisk avbildning. Denna rapport är en sammanfattning av de verksamheter och de resultat som framkommit i projektet. Rapporten inleds med en kort bakgrund till ämnet spaning med passiva elektrooptiska sensorer, se avsnitt 1.1. Resultaten är sedan uppdelade efter de olika teknikområdena och presenteras under avsnitten 2 (Mörkerförmåga), 3 (Spektral avbildning) resp. 4 (Polarimetrisk avbildning). I varje delavsnitt beskrivs en kort bakgrund till teknikområdet, highlights från projektarbetet under den aktuella tre årsperioden samt en framtidsutblick omkring tänkbara riktningar för fortsatta studier. Varje avsnitt redovisar separat de rapporter som publicerats inom respektive område. I det avslutande avsnittet 5 ges slutsatser från projektet samt en kort beskrivning av hur verksamheten är tänkt och planerad att drivas vidare. I ett appendix-avsnitt finns också en lista/förteckning över de vetenskapliga rapporter och konferensbidrag som projektet bidragit till att få publicerade.

FoT-projektet har under perioden medfinansierat deltagande i två internationella samarbetsprojekt, EDA-projektet DUCAS (*Detection in Urban scenario using Combined Airborne imaging Sensors*) samt EU-projektet AIRBEAM (*AIRborne information for Emergency situation Awareness and Monitoring*). Dessa hade båda fokus mot hyperspektral avbildning och har gett goda kontakter för framtida samarbeten inom detta område. Nationella samarbeten har också skett med bland andra Markstridsskolan (MSS) i Kvarn kring området Mörkerförmåga, samt med UndSäkC inom området Spektral avbildning.

FoT-projektet har hanterat passiva elektrooptiska sensorer i det optiska våglängdsområdet, vilket innefattar det ultraviolette, det synliga och det infraröda våglängdsområdet. I rapporten förekommer ett antal förkortningar för olika delområden. Tabell 1 beskriver hur dessa har definierats (notera att dessa kan skilja sig något i litteraturen) och Figur 1 ger en schematisk illustration av hur de förhåller sig till varandra samt till de omkringliggande spektralbanden (som t.ex. röntgen, mikro- och radiovågor). För en förklaring till de många förkortningar som används, se den inledande tabellen i rapporten.

Tabell 1: Beskrivning av de olika våglängdsområden som används i rapporten.

		Område	Spektralintervall [ $\mu\text{m}$ ]
		UV	0.01 - 0.4
VNIR	}	Synliga (VIS)	0.4 - 0.7
		NIR	0.7 - 1.0
		SWIR	1.0 - 3.0
TIR	}	MWIR	3.0 - 5.0
		LWIR	8.0 - 12.0



Figur 1: Grafisk presentation av de olika våglängdsområden som omfattas av det optiska våglängdsområdet (från ca 10 nm till 1000  $\mu\text{m}$ ) och hur dessa är relaterade till andra spektralområden som röntgen, mikro- och radiovågor.

## 1.1 Bakgrund

Elektrooptiska (EO) sensorer är redan idag en viktig källa för svenska förbands inhämtning av information, för så väl strategiska, taktiska som operativa insatser. Sensorerna tillhandahåller kritiska beslutsunderlag som inte kan erhållas på annat sätt vilket ställer höga krav på deras prestanda, pålitlighet och robusthet i olika miljöer och situationer. Den pågående utvecklingen kring signaturanpassning och skydd och förekomsten av svårupptäckta mål som nedgrävda landminor och IED:er innebär stora utmaningar för traditionell sensorteknik och en stor arbetsbörda för sensoroperatörer och bildanalytiker. För att Försvarsmaktens framtida spaningsförmåga ska vara fortsatt effektiv kommer nya sensortekniker krävas som använder ny information för måldiskriminering.

Konventionella sensorer för passiv spaning och övervakning bygger på s.k. pankromatiskt avbildande sensorer som avbildar i enskilda, relativt breda våglängdsband. Ur dessa sensorer skapas bilder där spatial information så som storlek, form, ton, mönster, textur, skuggor och relationer mellan olika objekt kan användas för att diskriminera ett mål från sin bakgrund. Om rörliga bilder (videosekvenser) kan erhållas, kan dessutom temporala (tidsmässiga) förändringar nyttjas för att ge ytterligare information om olika objekt i en scen. Denna extraherade s.k. spatiotemporala information, vare sig den är framtagen av en mänsklig observatör (exempelvis en bildtolkare) eller via autonom bildbehandling i en dator, kan sedan användas för olika diskrimineringsuppgifter så som exempelvis detektion, igenkänning, klassificering eller identifiering av olika mål och intresseobjekt.

Pankromatiska passiva sensorer har numera nått en mycket hög mognadsgrad genom hela det optiska spektrumet från UV till IR och används i stridsmiljöer på mark, till sjöss, i luften och i rymden; i allt från soldatburna NVG:er, handvapen- och stridsvagnssikten, till navigerings- och övervakningssystem på korvetter, ubåtar och andra marina plattformar, till spaningssystem i UAV-gimbaler, flygkapslar och i satelliter. Även om den tekniska utvecklingen går raskt framåt, med allt större fokalplansarrayer, skarpare optik, känsligare detektorelement, snabbare och mer brusfri utläsningselektronik och mer avancerad signal- och bildbehandling, kvarstår fortfarande brister och svagheter som gör dessa system sårbara och ineffektiva i vissa tillämpningar, miljöer och situationer. För att läsa ut den spatiala informationen kräver systemen att det finns en mätbar kontrast mellan mål och bakgrund samt att denna kontrast är upplösningsbar. I den kortvågiga delen av det optiska spektrumet (från UV genom hela det kortvågiga IR-området) är systemen beroende av omgivande ljusförhållanden samt reflekterande egenskaper hos olika material. Befintliga kamouflage och skydd är relativt väl utformade för detta våglängdsområde (i synnerhet det visuella området) vilket innebär en svårighet för sensorer som opererar här. Även om lågljuspassade tekniker tagits fram, där svagt ljus kan förstärkas, innebär mörker ofta dessutom en stor utmaning. I den långvågiga delen av spektrumet (i det mellan- och långvågiga IR-området) utnyttjas termisk egenstrålning från olika objekt och dessa system

kan operera över både dag och natt, men å andra sidan kan bilder i dessa spektralband vara mer främmande och svårtolkade för en mänsklig operatör. Eftersom sensorer i detta våglängdsband utnyttjar temperatur- och emissivitetsskillnader (skillnader i hur pass effektiva egenstrålare olika material och objekt är) kan det dessutom finnas tidpunkter över ett dygn (oftast omkring soluppgång och solnedgång) då de termiska kontrasterna är för låga för att kunna användas för informationsextraktion. Genom hela det optiska spektrumet kan dessutom andra yttre omständigheter så som moln, regn, snö, dimma, rök, smuts och damm ytterligare försvåra eller till och med omöjliggöra en given spaningsuppgift pga. deras kontrast- och upplösningsreducerande egenskaper.

För att ytterligare stärka diskrimineringsförmågan krävs att ny information tillförs. Förutom att ljuset är spatalt och temporalt fördelat, det som alltså konventionella system nyttjar enligt beskrivning ovan, har det också en spektral information. Det spektrala innehållet beskriver hur ljuset från objektet är fördelat över olika våglängder och frekvenser. Den enklaste formen av spektral avbildning, s.k. multispektral avbildning, innebär avbildning i ett fåtal, ganska breda (åtskilda och/eller överlappande) spektralband. Det mest kända exemplet är förstås en vanlig färg- eller rgb-avbildande sensor i det visuella området, men denna kategori av sensorer finns också i andra delar av det optiska spektrumet. En multispektral sensor kan utnyttja det faktum att kontraster mellan mål och bakgrund kan te sig olika i olika delar av spektrumet (en förmåga som också alltså ögat utvecklat och den mänskliga hjärnan utnyttjar). Dessa sensorer kan också (främst i IR-området) användas för att estimerar temperaturer på olika objekt med lite större noggrannhet än konventionella bredbandiga sensorlösningar. Genom att avbilda i allt fler, smalare och ofta kontinuerligt efterföljande spektralband erhålls en s.k. hyperspektral sensor, som har möjligheten att på ett mer komplett sätt kartlägga det spektrala innehållet hos ljuset. Denna mer detaljerade spektralinformation, som erhålls som ett spektrum för varje pixel i sensorn, kan berätta något om vilket material objektet som reflekterar eller emitterar strålning faktiskt är uppbyggt av. En hyperspektral avbildning av en scen möjliggör alltså en materialklassificering, dvs. en särskiljning av huruvida en pixel i en sensor är en granpixel eller en kamouflagepixel. Spektral avbildning innebär på detta sätt en utökad diskrimineringsförmåga, pga. att sensorn inte bara utnyttjar kontrastskillnader i ett eller några enstaka band utan i många. Hyperspektralt avbildande sensorer finns idag över hela det optiska spektrumet och används flitigt inom civila fjärranalystillämpningar där tekniken har nått hög mognadsgrad. I takt med att sensorerna blivit mer avancerade (ex. erhållit både högre spatial som spektral upplösning), blivit mindre i storlek och mer robusta har de också funnit allt större användning i militära sammanhang med de specifika krav som där ställs. Eftersom tekniken fortfarande är relativt dyr, framför allt i IR-området, är det främst de militära stormakterna som idag använder tekniken operativt. I takt med att sensorerna blir billigare och mer lättåtkomliga är det dock att förvänta att tekniken kommer att spridas mer och att denna sensorteknik redan idag beaktas som både en ny förmåga samt som ett nytt reellt hot, att exempelvis utveckla skydd och kamouflage emot.

Ljus innehåller också en polarimetrisk information. Polarisation beskriver hur de elektromagnetiska fälten är orienterade när ljuset som en elektromagnetisk våg färdas fram genom rummet. Polarisationsinnehållet hos ljuset kan förändras när det växelverkar med en yta, vilket kan utnyttjas för att ta reda på hur ett växelverkande objekts yta ser ut (är den skrovlig eller är den slät) samt hur den är orienterad i förhållande till sin omgivning (är den horisontell eller vertikal). Denna information kan användas för att accentuera kanter mellan olika ytor och objekt, vilket ger en förstärkt förmåga att framhäva former, mönster och texturer i en annars kontrastsvag scen. Detta kan utnyttjas för att exempelvis särskilja en artificiell, mänskligt tillverkad yta från en naturlig yta, den senare vilken ofta är mer ojämn och mer slumpvist orienterad än den förra. Informationen kan också användas för att reducera antalet falsklarm som eventuellt spatiotemporalt eller spektralt klotter i scenen kan ge upphov till. Polarimetriskt avbildande sensorer finns numera genom hela det optiska spektrumet men tekniken har ännu inte nått någon stor spridning inom militära sammanhang, delvis beroende på komplexiteten hos tekniken som fortfarande får ses som

relativt ny och omogen men också för att den stora operativa nyttan ännu kanske inte praktiskt visats fullt ut. Potentialen är dock väl känd och utvecklingen både på teknik- och forskningssidan fortskrider, eftersom den polarimetriska informationen är oberoende av den spektrala informationen (olika fenomen är involverade) samt är komplementär till den spatiotemporala.

Både spektralt avbildande och polarimetriskt avbildande elektrooptiska sensorer finns redan idag kommersiellt och har nått varierande grader av mognad för operativ användning i en militärisk kontext (spektrala sensorer förmodligen högre än polarimetriska). Kombinationen av spatiotemporal, spektral och polarimetrisk information kan erhållas via s.k. spektropolarimetrisk avbildning, där samtliga dessa modaliteter registreras. Även om denna teknik fortfarande är av något i sin linda, pga. systemens komplexitet och extremt höga krav vad gäller prestanda, har forskningsområdet upplevt en stark teknisk utveckling den senaste tiden. Tekniken bör därför både ses som en ny potentiell förmåga samt som ett nytt hot.

Inom området mörkerförmåga (Night Vision) är det framför allt de senaste årens framväxt av allt känsligare och mer högupplösta digitala lågljussensorer som ger potential för nya och förbättrade förmågor att verka i mörker. De digitala teknikerna, till skillnad från de analoga bildförstärkarna som är standard idag, möjliggör bildförbättring, fusion, automatiska målinvisningsalgoritmer och förbättrad kommunikation i stridande nätverk. De digitala teknikerna ger också tillgång till nya våglängdsområden som ej varit tillgängliga innan, ett aktuellt exempel är SWIR-området där stabila ljuskällor som night glow kan ge en ökad robusthet och bättre sikteegenskaper.

## 2 Mörkerförmåga

En av projektets huvudaktiviteter har varit att vidareutveckla kompetensen inom mörkerförmåga (night vision). Mörkerförmåga har på senare år blivit ett av de högst prioriterade teknikområdena inom Försvarmakten, mycket pga. de erfarenheter som dragits från internationella insatser där svensk mörkermateriel satts på prov. Målet för denna aktivitet har varit att studera metodik för modellbaserad och experimentell prestandabedömning av mörkersensorer, samt att värdera nya tänkbara våglängdsområden och sensorkoncept med syfte att öka Försvarmaktens framtida förmåga att bedriva effektiva operationer i mörker.

### 2.1 Förmågor för FM

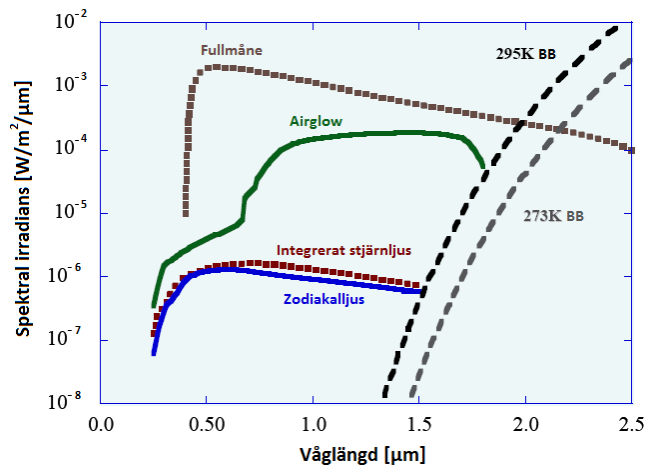
Forskningen inom området mörkerförmåga bedöms ha god potential för följande nya eller förbättrade förmågor för Försvarmakten:

En **förbättrad spanings- och övervakningsförmåga** vid operationer genomförda i **mörker** mha. nya digitala mörkersensorer, vilka kommer att möjliggöra bildkvalitetsförbättringar genom avancerad signal- och bildbehandling, bildfusion av olika våglängdsområden och sensormodaliteter samt kommunikation i stridande nätverk.

### 2.2 Bakgrund

Det finns ett uttalat behov hos Försvarmakten att kunna strida 24 timmar om dygnet, med en och samma stridsteknik. En stor del av Försvarmaktens nationella verksamhet genomförs i mörker och ca en fjärdedel av de strider som svenska styrkor genomfört i Afghanistan har varit i mörker. Soldaters överlevnad hänger på att kunna uppnå verkan före motståndaren dygnet runt med eget vapen och med gruppens understödsvapen. För detta krävs sensorer och andra tekniska hjälpmedel för säker förflyttning, orientering och bekämpning.

Figur 2 visar de dominerande naturliga ljuskällorna nattetid, där det kan ses att månsken vanligtvis utgör den klart starkaste så länge den finns tillgänglig på natthimlen och inte är skyld av tjocka moln. Trots att en fullmåne i VNIR-området är ca 1000 ggr starkare än den näst starkaste ljuskällan nightglow (eller airglow som den också kallas), är fullmånen i sig ca 10000-100000 ggr svagare än solsken. Utöver dessa naturliga ljuskällor finns förstås också en stor mängd artificiellt ljus från gatlyktor, skyltbelysning, strålkastare, mm. som bidrar med ljus i och nära urbana miljöer. I stridsmiljön kan också heta motorutblås från fordon, mynningsflammar och laserkällor från avståndsmätare och sikten göra sig gällande. I SWIR-området, över ca 2  $\mu\text{m}$ , börjar sedan den termiska strålningen från terräng och himmel ta överhanden och dominerar helt i det termiska IR-området (MWIR och LWIR).



Figur 2: Spektral innehåll av en natthimmel består av bidrag från en rad olika ljuskällor, där de mest signifikanta är månljus, airglow (nightglow), integrerat stjärnljus och zodiakalljus. Över ca 2  $\mu\text{m}$  börjar termisk strålning från mark och atmosfär att dominera. [1]

Sensorer som verkar i det termiska IR-området kan användas såväl dagtid som nattetid och utgör en viktig källa till information under nattliga operationer, implementerade med kylda fotoniska och okylda termiska detektormaterial i så väl kikare, sikten samt på senare tid även i NVG:er. Tekniken har hög mognadsgrad och är robust för olika ljus- och väderförhållanden, men har sina begränsningar i upplösning och synfält, SWaP-C (storlek, vikt, effektkrav och kostnad) samt inte minst det faktum att informationen de ger ifrån sig kan te sig svårtolkad för en mänsklig operatör. Behov finns därför också av sensorer som verkar i EO-området (VNIR och SWIR), men mörkret och avsaknaden av de starka ljuskällor som spaningssensorer dagtid till stor del förlitar sig på ställer dock extremt höga krav på känslighet. Passiv militär mörkerförmåga i detta våglängdsområde vilar på en tung tradition med användande av analoga bildförstärkare, en teknik som alltjämt dominerar pga. sin höga mognadsgrad med hög känslighet kombinerad med kostnadseffektiva systemlösningar med låg SWaP.



Figur 3: Tre av de dominerade soldatburna mörkersensorerna på moderna slagfältet, här exemplifierat med den amerikanske monokulära gen3-bildförstärkaren PVS-14 (vänster), det termiska okylda mikrobolometer-baserade vapensiktet DRAGON-MR från Qioptiq (mitten) samt det kylda skannande MCT-baserade kikarsystemet SOPHIE-MF från Thales (höger).

## 2.3 Highlights 2012-2014

Teknikområdet mörkerförmåga har i projektet under den aktuella perioden påbörjats i form av två uppstartande litteraturstudier; en generell studie kring state-of-the-art för mörkersensorer i allmänhet, innefattande en delstudie om metodik för fusionering av olika sensormodaliteter, samt en mer specialinriktad studie mot SWIR-området med dess



speciella förutsättningar och potential. Dessa efterföljdes av både teoretiska samt experimentella studier inriktade mot modellering och karaktärisering av räckviddsprestanda hos moderna mörkersensorer. Nedan följer en översiktlig beskrivning av dessa med deras viktigaste slutsatser.

### 2.3.1 Generell studie om mörkersensorer

En avskannande studie genomfördes 2013 med syfte att skapa en aktuell lägesbild över teknisk status (state-of-the-art) för analoga och digitala passiva mörkersensorer i både EO- och IR-området, för en generell kompetenshöjning inom teknikområdet. Studien som bedrevs i form av en litteraturstudie och rapporterades i [2], inkluderade även en delvis separat men kopplad studie om signal- och bildbehandlingsmetoder framtagna för fusionering av bilddata från olika mörkersensorer.

Studien konstaterade att den stora mognadsgraden och den välbeprövade prestandan och robustheten hos analoga bildförstärkare gör att det får antas att denna teknik, tillsammans med termisk IR-teknik, under de närmsta åren kommer vara fortsatt dominerande i operativ användning för de flesta militära styrkor runt om i världen. De huvudsakliga trenderna inom bildförstärkare är på komponentsidan förbättringar i form av mer högupplösande mikrokanalplattor (den ljusförstärkande men normalt också den mest upplösningsbegränsande komponenten i en bildförstärkare), lägre SWaP (genom mer komprimerade komponenter i förstärkarröret) samt nya fosformaterial med perceptionsoptimerad prestanda. På systemsidan finns trender som att bredda synfältet, där standard idag är 40° men där 50° kan komma att bli den nya standarden inom kort. Det finns också mer extrema exempel med 100° synfält, men dessa är uppbyggda av flera parallella bildförstärkarrör vilket gör dem stora, otympliga och dyra. En annan trend på systemsidan är optisk fusionering med termiska IR-sensorer, se exempel i Figur 4. Trenden finns också exemplifierad i den relativt nyligen presenterade Rapid Target Acquisition-teknologin från NVESD i USA där den termiska IR-bilden från ett vapenmonterat sikte överförs trådlöst och kan visas i den huvudmonterade bildförstärkarens display.



Figur 4: En tydlig trend på senare tid är fusionering av bildförstärkare och termisk IR, här exemplifierat genom det amerikanska ENVG-systemet (vänster) samt det brittiska ClipIR (mitten). Fusioneringen sker optiskt (överlagras på varandra) och är tänkt att utnyttja styrkor hos respektive teknik i en fruktbar symbios (t.ex. bildförstärkare för situationsuppfattning och IR för detektion).

Studien konstaterar också att nuvarande analog teknik, trots sin dominans, har sina klara begränsningar och att det är troligt att ett paradigmskifte kan väntas om några år pga. det senaste decenniets starka frammarsch av digitala sensorlösningar som nu börjar kunna matcha eller i vissa fall till och med överträffa den analoga tekniken. Den digitala tekniken är bättre anpassad för kommunikation i stridande nätverk och för införande av avancerad bildbehandling för förbättrad detektionsförmåga så som exempelvis kantskärpning, brusreducering, multispektral avbildning och pixelbaserad bildfusionering.

Inom VNIR-området är det främst kiselbaserad detektorteknik så som lågljus-CMOS, EBCMOS (Electron-Bombarded CMOS), I2CMOS (Image Intensified CMOS) och EMCCD (Electron-Multiplying CCD), som nått allt bättre prestanda och blivit mer konkurrenskraftig vad gäller SWaP-C. I SWIR-området är det främst InGaAs och MCT som dominerar som detektormaterial idag och har nått stor mognad, men nya kiseltekniker

med utökad spektralrespons som exempelvis svaveldotat kisel (s.k. svart kisel) och germanium på kisel kan möjligtvis komma att utmana dessa. I det termiska IR-området dominerar alltjämt InSb, MCT och QWIP fortsatt som kylda detektormaterial för högprestandatillämpningar (ex. plattformsburna system). Okylda mikrobolometer-matriser i  $\alpha$ -Si och VOx dominerar å andra sidan för tillämpningar där högre krav ställs på låg SWaP och kostnadseffektivitet, så som hjälm- eller huvudburna soldatsystem eller för lätta obemannade farkoster (UGV, UAV, osv.). Nya MEMS-baserade mikrobolometer-tekniker (ex. microcantilever-system och antennkopplade system) kan komma att ge helt nya förutsättningar för okyld detektorteknik i framtiden, men TRL-nivåerna är alltjämt relativt låga. Nya fotoniska detektormaterial är också under stark utveckling, med exempel som T2SL (Type II Superlattice-material) och QDIP (kvantpunktsbaserade detektormaterial) som seriösa utmanare på kortare resp. lite längre sikt.



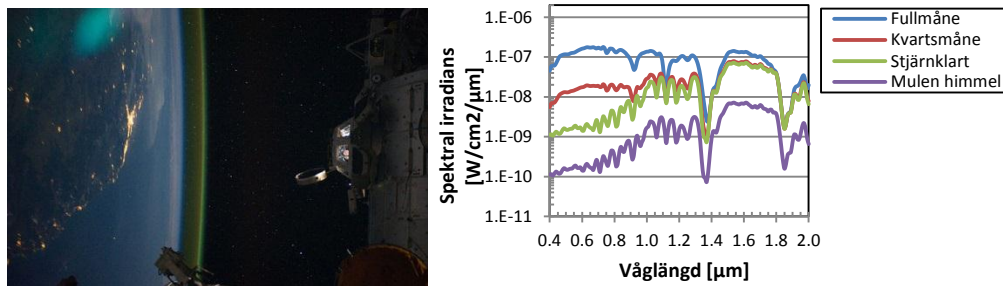
Figur 5: Digitala mörkersensorer i VNIR och SWIR är under tydlig uppsegling, pga. senare års tekniska landvinningar som gör de konkurrenskraftiga med konventionell mörkermateriel. Här exemplifierat genom en taktisk SWIR-kikare från FLIR (vänster) samt en binokulär goggle i EBAPS från Intevac (mitten och höger).

I studien framförs det också att den pågående utvecklingen kring tredje generationens fokalplansarrayer bedöms viktig att följa och bevaka för mörkerteknikområdet, där nya tekniker för erhållande av högre upplösningsformat, högre bildtakt, lägre SWaP, större kostnadseffektivitet, högre användningstemperaturer (s.k. HOT-teknik), integrering av avancerad signal- och bildbehandling on-chip, multifärg, multiband, osv. ingår som möjliga förbättringar.

### 2.3.2 SWIR-studie

Eftersom det kortvågigt infraröda spektralområdet (SWIR) varit ett hett diskussions- och forskningsämne på senare tid, i synnerhet för användning inom mörkerförmåga och andra lågljustillämpningar, genomfördes en specifik studie inriktad mot just detta våglängdsområde. Studien har rapporterats i [1] och syftet var att utreda vilken potential spektralbandet erbjuder, både avseende fenomenologiska egenskaper (ex. möjliga ljuskällor och atmosfärsdämpning) samt tillgänglig och kommande sensorteknik.

De främsta ljuskällorna på natthimlen i SWIR-området är månljus och night glow (se Figur 6). Night glow uppkommer via en rad olika fotokemiska reaktioner i den övre delen av atmosfären och är en ljuskälla som är relativt stabil mot förändrade molnförhållanden och som under månfria betingelser fortfarande kan göra mörkerseende möjligt. I SWIR-området finns inte lika många störande artificiella ljuskällor som i VNIR-området, där bildförstärkarbaserade NVG-system i exempelvis urban miljö eller på landningsbanor och helikopterplattor kan få vissa problem med halos och blooming. SWIR-området möjliggör detektion av de militära laservåglängderna 1.06  $\mu\text{m}$  och 1.55  $\mu\text{m}$ , vilka är vanliga för avståndsmätning och målutpekning men som är osynliga för traditionell NVG-teknik.



Figur 6: Månsken och nightglow är de två dominerande ljuskällorna i SWIR-området. Till vänster ses en bild av nightglow (som syns som ett grönskimrande skikt i över delen atmosfären) från rymdstationen ISS och till höger ses typiska spektra för månsken och night glow i VNIR/SWIR-området.

SWIR erbjuder en allmänt högre atmosfärstransmission och en ökad penetrationsförmåga genom dimma, rök, damm och andra aerosol-baserade obskuranter som annars effektivt kan hindra bildförstärkarbaserade system i VNIR-området. Sensorer i spektralområdet står sig dock inte lika väl i en motsvarande jämförelse med termiska IR-system.

Sensortekniken i SWIR domineras idag av detektormaterialen InGaAs och MCT, som båda har nått stor mognad och finns tillgängliga i allt högre upplösningar, med bättre prestanda, till lägre kostnader, i mindre storlek och vikt samt med lägre effektförbrukning. Nya intressanta material finns även i danande, med exempel som svart kisel, germanium på kisel och olika kisel/germanium-legeringar samt nanofysikbaserade material som T2SL och QDIP. SWIR-teknik kan göras kostnadseffektiv (i jämförelse med termiska system) eftersom den i hög grad kan använda glasoptik. För att fullt kapitalisera potentialen är det dock viktigt att använda optik som är anpassad efter våglängdsområdet, både gällande antireflexbehandling och färgkorrigering. Den goda transmissionen i glas gör det också möjligt för SWIR-sensorer att se genom fönster, vilket termiska IR-system är inkapabla till.

Studien konstaterar att SWIR-området framstår som ett attraktivt spektralområde, eftersom det tillåter igenkänning och identifiering på långa avstånd genom effektivt nyttjande av ”night glow” på natthimlen och pga. reflektansegenskaper hos både naturliga och konstgjorda material. De flesta moderna kamouflagematerial är ej anpassade för våglängdsområdet vilket dessa sensorer kan dra fördel av. Bilder i SWIR påminner dessutom starkt om visuella (monokroma) bilder och är därmed mer lättolkade för en mänsklig operatör än vad termiska bilder är. Detta kan underlätta identifikation och igenkänning av vänner och fiender, vilket är betydligt svårare med kameror i MWIR och LWIR.

### 2.3.3 Räckviddsmodellering

En värderingsstudie av passiva soldatburna sensorer i det visuella och infraröda våglängdsområdet har genomförts under 2013, där teknisk sensorprestanda och dess inverkan på operativ räckvidd för målvisning har undersökts. En relativt enkel typsituation ansattes; en kamouflagelädd resp. civilt klädd individ mot en granskogsbakgrund där uppgiften för värderingen var att beräkna räckvidd för upptäckt, igenkänning och identifiering vid fyra olika ljusförhållanden (från fullmåne till mulen natthimmel) och vid tre olika väderbetingelser (klart väder, regn och dimma). Studien finns avrapporterad i [3]. Förutom att studien beräknade räckvidder för diskriminering för de deltagande sensorerna gjordes också en relativt omfattande parameterstudie där olika sensorparametrars inverkan på räckvidd undersöktes.

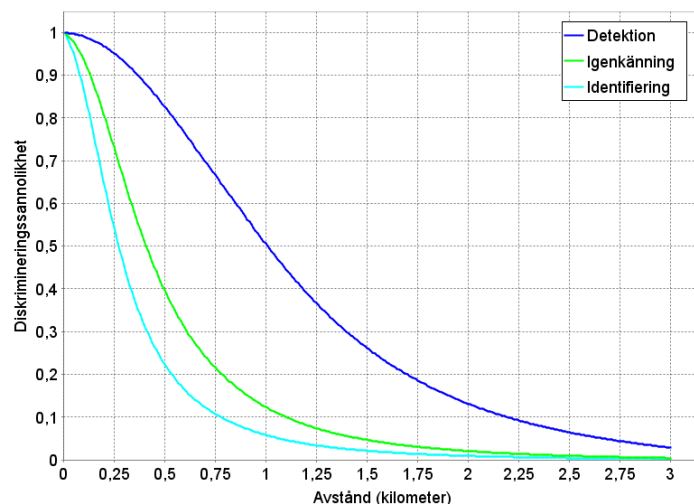
I studien lades visst fokus på sensorsystem avsedda för främst orientering och situationsuppfattning, dvs. mörkersystem med relativt vidvinklig optik. Förutom ett antal NVG:er baserade på analoga bildförstärkare i olika generationer samt termiska

mikrobolometerarrayer ingick också ett par digitala lågljustekniker för jämförelse (låg-ljus-CMOS i VNIR och InGaAs i SWIR). Som värderingsmetodik användes Targeting Task Performance (förkortad TTP), som är utvecklad av NVESD i USA och som är implementerad i mjukvaran NV-IPM (Night Vision Integrated Performance Model) från NVESD/SENSIAC. TTP introducerades 2003 och bygger i likhet med tidigare ofta använda Johnson-kriteriet på en ansats att räckvidd är proportionell mot bildkvalitet. I motsats till detta kriterium är dock TTP bättre anpassat för digitalt samplande system eftersom det tar hänsyn till prestandan hos det avbildande systemet för samtliga spatiala frekvenser (detaljnivåer i en bild). Metoden räknar fram ett bildkvalitetsmått som (över spatiala frekvenser) summerar det kontrastöverskott sensorsystemet ger, med hänsyn tagen till alla degraderande komponenter i en avbildningskedja (se Figur 7) och i förhållande till det som det mänskliga ögat och hjärnan kräver.



Figur 7: Elektrooptisk avbildning är en kedja av fysikaliska fenomen som var och en bidrar till den kontrast, skärpa och brus som upplevs i en bild för en mänsklig operatör.

Från det framräknade bildkvalitetsmättet kan sedan en räckvidd beräknas, med en liknande ansats som den som används av Johnson (dvs. genom en multiplikation med målobjektets storlek och en division med antalet cykler/pixlar som diskrimineringsuppgiften kräver). En sannolikhet att kunna lösa en diskrimineringsuppgift på ett visst avstånd kan sedan beräknas mha. en empiriskt framtagen formel, som med god överensstämmelse validerats mot experiment med försökspersoner.

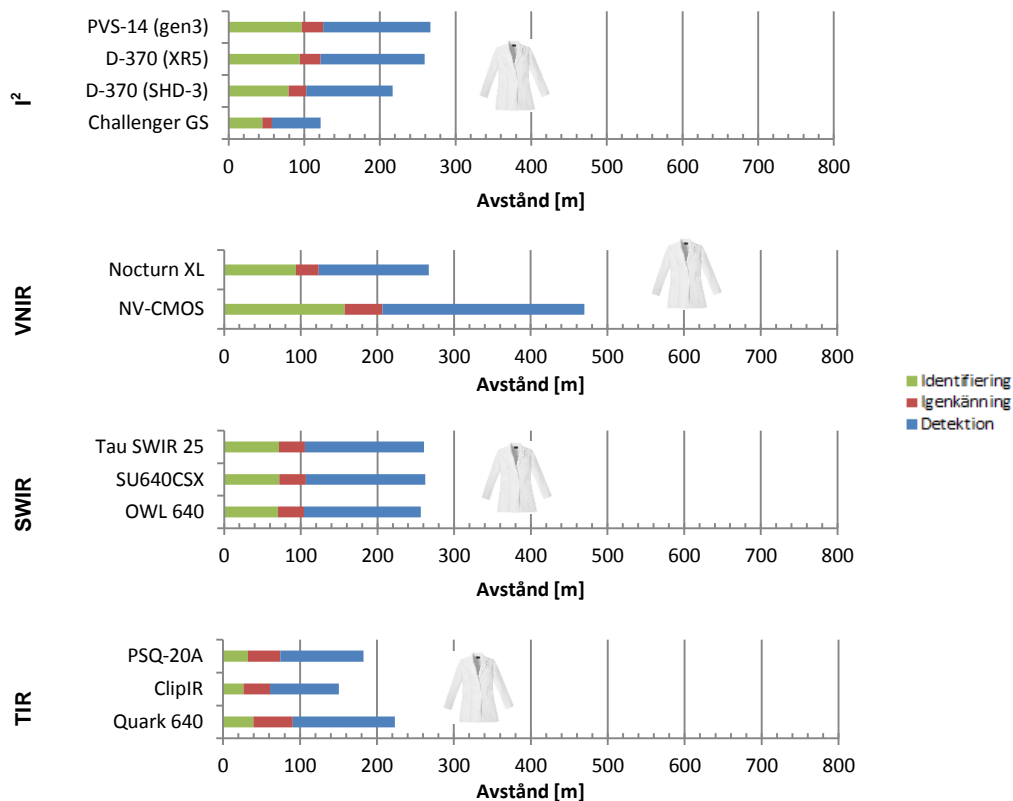


Figur 8: Exempel på räckviddskurvor (här för en godtycklig sensor) beräknade enligt TTP, för diskrimineringsuppgifter i form av detektion, igenkänning och identifiering.

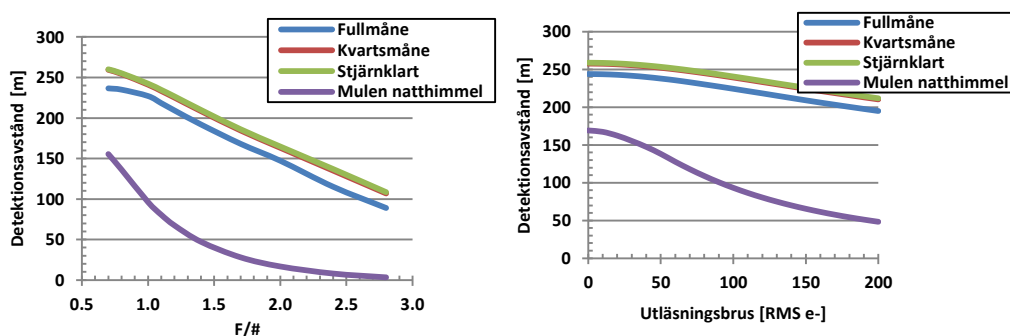
En svaghet i metoden är att uppgiften ibland kan vara svår att definiera och måttsätta (hur många pixlar krävs för att se om en person bär på en Ak47:a eller en spade, osv.), framför allt uppgifter av typen igenkänning/klassificering och identifiering där praktisk erfarenhet eller empiriska försök kan krävas för att ”kalibrera” in metoden.

Värderingen hade flera syften, dels att undersöka möjligheten att använda TTP och NV-IPM för teknisk prestandautvärdering av mörkermateriel dels att undersöka hur metodiken

kan användas för jämförande studier av olika sensortekniker inom och mellan olika våglängdsband. Även om studien omfattar en relativt begränsad och specifik typsituation och inte är validerad mot jämförande experiment har den ändå lett fram till några intressanta resultat och iakttagelser som är värda att lyfta fram (några exempelresultat hämtade ur rapporten [3] visas i Figur 9 och Figur 10).



Figur 9: Exempelresultat från studien; i detta fall räckvidder för detektion av civilklädd person under stjärnklara ljusförhållanden och vid klar väderlek.



Figur 10: Exempelresultat från studien; i detta fall en parameterstudie kring detektionsavstånd hos SWIR-kamera som funktion av optikens F/# (ljusinsläpp) samt utläsningselektronikens brusprestanda.

Studien har visat att bildförstärkares räckviddsprestanda idag i hög grad begränsas av mikrokanalplattan som ger en tydlig degradering av upplösningsprestandan i förhållande till andra sensortekniker. I senare versioner av bildförstärkare av generation 2 har denna prestanda förbättrats något och bildförstärkare med denna teknik erbjuder lika bra och ibland även bättre prestanda än generation 3 under månskensförhållanden. När det är stjärnklart och vid mulen natthimmel väger dock den högre tubförstärkningen och

responsiviteten hos generation 3 över. En klar nackdel med bildförstärkare som kunnat konstateras i studien är deras klart sämre robusthet mot väder och vind i jämförelse med övriga sensorer.

I studien har det framkommit att både lågljus-CMOS och InGaAs (i viss mån även VisGaAs) är digitala tekniker som erbjuder lovande prestanda som mycket väl kan mäta sig med eller till och med överträffa prestandan som analoga bildförstärkare ger. Högupplösta arrayer i kombination med lågt utläsningsbrus gör lågljus-CMOS-tekniken tämligen svårslagen vid goda ljusförhållanden (månsken). De bakupplysta (BSI) CMOS-arrayer som är under stark utveckling kommer även att kunna erbjuda konkurrenskraftig prestanda under stjärnklara ljusförhållanden (utan månsken). För mulna nätter kommer ytterligare förbättringar i kvanteffektivitet bli nödvändiga, men här finns å andra sidan lovande material som svart kisel (från till exempel SiOnyx i USA) som är på stark frammarsch.

För InGaAs i SWIR-området är det framför allt under sämre ljusförhållanden så som stjärnklara och mulna nätter som tekniken skulle kunna finna sin främsta nytta, eftersom night glow möjliggör högre och mer stabila ljusnivåer kontra det som då är tillgängligt för bildförstärkare och kiselteknik i VNIR. Studien har visat att en stark begränsning hos dagens InGaAs-system är bruset i utläsningselektroniken, som skulle behöva sänkas ytterligare för att fullt kunna utnyttja våglängdsområdets potential. Studien visar också att SWIR-området kan ge en något större robusthet mot dimma, regn och rök, i förhållande till VNIR. En annan möjlig fördel är förmågan att upptäcka kamouflage, som vanligtvis är optimerade för VNIR-området. Med smart spektralfiltrering och/eller multispektral avbildning kan detta troligtvis göras mycket effektivt.

Studien visade vidare att okylda termiska (vidvinkliga) NVG idag är ofta alltför lågupplösta för att kunna tillföra något reellt under goda ljusförhållanden, utan kommer mer till sin rätt när de andra teknikerna fallerar dvs. under mulna nätterförhållanden, i grottor eller inomhus där ljus i EO-området kan vara nära obefintligt. I takt med att allt större mikrobolometerarrayer utvecklas och blir kommersiellt tillgängliga kan också väsentligt bättre räckviddsprestanda komma att väntas för dessa typer av sensorer. Större arrayformat är också något som behövs för att nå bättre prestanda och resultat med fusionering mellan TIR och andra spektralband, där diskrepansen i upplösning hos dagens system är alltför stor. Studien visar också på en stark konkurrensfördel med TIR (framför allt LWIR) kontra övriga våglängdsområden genom en betydligt större robusthet mot regn, dimma, rök och andra obskuranter som är mer hindrande vid de kortare våglängderna där ljus sprids mer effektivt.

### 2.3.4 Räckviddsförsök

I syfte att utveckla och utvärdera metodik för fältmätning av räckvidd samt för införskaffande av valideringsdata för räckviddsmodellering och scensimulering, genomfördes en relativt omfattande datainsamling under hösten 2014. Avsikten är att under 2015 använda insamlat bilddata för att genomföra ytterligare perceptionsinriktade experiment där försökspersoner får i uppgift att avgöra i vilken utsträckning som i scenen förekommande personer/objekt kan detekteras/igenkännas/identifieras.

Efter ett rekognoseringsarbete valdes en plats med öppen terräng framför ett skogsbryn vid Ängsstugan norr i närheten av Kvarn i Östergötland, se Figur 11. Försöket genomfördes under en kväll i slutet av oktober med personal från FOI och deltagare från Markstridsskolan (MSS) i Kvarn. Vädret var relativt stabilt under kvällen och tidpunkten var vald för att åstadkomma så mörka och stabila ljusförhållanden som möjligt. Inslaget från månsken var exempelvis minimalt och den uppmätta himmelsilluminansen över provplatsen låg strax under 1 mLux under hela försöket (vilket får bedömas som mycket lågt och därmed utmanande).





Figur 11: Provplatsen för försöket (Ängsstugan norr utanför Kvarn). Till vänster ses ett flygfoto över området, där cirkeln motsvarar scenplaceringen (mål/bakgrund) och där den röda linjen ungefärligen motsvarar siktlinjen efter vilka sensorerna förflyttades. Till höger ses en bild (dagtid) från platsen över skogsriddan som användes som bakgrund, där den röda pilen anger ungefärlig plats för statisterna.

Försöksupplägget gick ut på att, med ett antal olika sensorer (några inlånade från MSS samt FMV), spela in video från en scen där en eller flera aktörer/statister genomförde utvalda moment mot en homogen bakgrund. Huvudfrågeställningen för försöket var att undersöka effekt av avstånd på sensorernas prestanda och därmed i förlängningen en tänkt operatörs prestation. Eftersom avstånd var huvudvariabel upprepades de flesta momenten för sju olika avstånd upp till ca 450 meter.

Fem olika passiva sensorer användes för datainsamlingen:

- Bildförstärkare Mono 12 (NVG av generation 3)
- Raptor (SWIR)
- IRV-sikte CQB (LWIR)
- IRV-sikte MTWS (LWIR)
- Termisk okyld kamera A655SC (LWIR)

Sensorerna monterades bredvid varandra på ett justerbart bord, se Figur 12, och placerades i en skåpbil som kördes och förflyttades mellan de specificerade avstånden till scenen. När så var möjligt användes sensorernas egen funktionalitet för inspelning av video. För Mono 12 skapades ett arrangemang med extern videoinspelning från en kamera placerad bakom sensorn.



Figur 12: De fem olika sensorerna placerade på det justerbara bordet. Från vänster till höger: bildförstärkaren Mono 12, IRV-siktet MTWS, IRV-siktet CQB, Raptor-kameran (SWIR) samt A655SC (LWIR).

Statisterna var försedda med tre olika typer av beklädnader (se Figur 13); en militär uniform M90 med hjälm, en typisk jägarklädsel samt en referensklädsel i form av vit bomullsrock med byxor. Statisterna agerade sedan en i taget på order av försöksledaren. I försöksplanen fanns två delar med olika syften. Den första delen var fokuserad på upptäcktsavstånd (detektion), och syftade till möjligheten för en operatör att avgöra om det finns en person i scenen. För detta ändamål genomförde statisterna dels ett antal statiska moment, som bestod av att inta olika kroppsställningar (liggande, knästående och stående), dels av dynamiska moment med utvalda rörelser som att stillastående signalera med armarna samt att gå tvärs över scenen (vinkelrätt mot sensorernas siktlinje).

Den andra delen av försöket fokuserade på igenkänning och identifiering. I detta fall utfördes dels ett antal siktningsrörelser med olika typer av vapen, dels ett antal sekvenser som kan relateras till civil verksamhet som att gräva med spade, titta i kikare, dricka ur mugg, m.m.



Figur 13: Tre olika utstyrselar och moment; jägarklädsel, M90 samt labbrock (från vänster till höger).



Fortsatta experiment med försökspersoner samt sammanställning och rapportering av resultat och slutsatser från räckviddsförsöket är planerat för 2015 i ett efterföljande FoT-projekt.

## 2.4 Framtidsutblick

Framtida studier inom teknikområdet inriktas mot vidare studier av vad de kommande digitala lågljussensorerna kan tillföra samt hur passiv och aktiv mörkerförmåga kompletterar varandra och bör hanteras för att användas på ett optimalt sätt. Internationella samarbeten bör fördjupas med utökad EDA- och NATO-samverkan inom teknikområdet.

### 2.4.1 Nya möjligheter och förmågor med digitala lågljussensorer

Fortsatta värderande studier är önskvärda kring operativ prestanda hos nya kiselbaserade sensortekniker i VNIR-området, så som EBCMOS, I2CMOS/ICCD, lågljus-CMOS, samt hos InGaAs/VisGaAs i SWIR-området, med bedömningar av den framtida utvecklingspotentialen hos dessa och andra detektormaterial. Studier kring utformning och värdering av bildförbättrings-, fusions- och automatiska målinvisningsalgoritmer för digitala mörkersensorsystem i både EO- och IR-området är också planerade.

### 2.4.2 Aktiv och passiv mörkerförmåga

Fortsatta studier ämnar också värdera hur passiva och aktiva mörkersensortekniker kompletterar varandra och hur de kan och bör kombineras för att samutnyttjas på bästa sätt och uppnå bäst operativ verkan i Försvarmaktens verksamhet.

## 2.5 Referenser

- [1] David Bergström och Thomas Svensson, ”Sensorer i SWIR - En studie om fenomenologiska förutsättningar och sensorteknisk potential för ökad mörkerförmåga”, FOI-R--3486--SE (2012).
- [2] David Bergström, David Gustafsson och Sebastian Möller, “Passive Night Vision sensor technologies and image fusion methods in the visible and infrared spectral ranges”, FOI-D--0554--SE (2013).
- [3] David Bergström, Thomas Svensson, Linnéa Axelsson, Stefan Björkert och Tomas Hallberg, ”Värdering av sensorprestanda för passiv soldatburen mörkerförmåga”, FOI-RH--1397--SE (2013).



## 3 Spektral avbildning

En annan av projektets huvudaktiviteter har varit att vidareutveckla kompetensen inom spektral avbildning. Målet har varit att studera nya sensorer och metoder för hyperspektral avbildning med syfte att förbättra försvarsmaktens marklägesbild jämfört med dagens konventionella bredbandiga spaningsensorer.

Projektet har fokuserat på såväl hårdvara, i form av vidareutveckling av en egen hyperspektral interferometrisk LWIR-sensor, som utveckling och utvärdering av signalbehandlingsmetoder för automatisk bildanalys såsom kartering, måldetektion och måligenkänning.

En stor del av arbetsinsatsen har varit kopplad till EDA-projektet DUCAS där institut och universitet från Sverige, Norge, Belgien, Frankrike, Italien, Nederländerna och Tyskland deltog i ett multinationellt samarbete för att samla in data och utvärdera prestanda att automatiskt detektera, klassificera och identifiera markmål med en kombination av olika högupplösta och hyperspektrala flygande och markbundna sensorer.

### 3.1 Förmågor för FM

Hyperspektral elektrooptisk avbildning bedöms ha god potential för följande nya eller förbättrade förmågor för Försvarsmakten:

1. **Effektiv och avancerad terrängkartering** genom förmåga till materialklassificering av georefererade 2D- och 3D-kartor
2. **Förbättrad passiv spanings- och övervakningsförmåga med ökad räckvidd och större robusthet** genom avancerad förmåga till måldetektion och klassificering

### 3.2 Bakgrund

Det mänskliga ögat är vanligen trikromatiskt med tre typer av färgsynceller (tappar), vilka har sin största känslighet i våglängdsbanden rött, grönt och blått. Personer med defekt färgseende har nedsatt förmåga i eller saknar någon av dessa celltyper vilket gör att de inte kan skilja mellan vissa färgkombinationer. Det finns även studier som visar att vissa människor kan ha tetrakromatiskt färgseende, dvs. ha en fjärde typ av tapp som gör dem ännu bättre på att se färger. Ett normalt synsinne är *multispektralt*, dvs. kan se olika färger.

En vanlig digitalkamera är en multispektral elektrooptisk sensor (till skillnad från en *monokrom* kamera som enbart mäter i ett våglängdsband). Den avbildar på motsvarande sätt som det mänskliga ögat en scen med de tre våglängdsbanden rött, grönt och blått. Den digitaliserade bilden består av en datamatrix med ett visst antal bildelement (pixlar) i den spatiella dimensionen (höjd och bredd). För varje pixel finns tre värden (rött, grönt och blått) som beskriver vilken färg pixeln har. Trots att det enbart är tre delband kan vi från en vanlig färgbild oftast enkelt identifiera objekt och vilka material de är gjorda av. Vi kan skilja mellan gräs, metall, jord etc. Men för att kunna göra det behöver vi sätta in objekten i ett sammanhang, använda den spatiella formen och strukturen på objektet. Får vi exempelvis endast en pixel med värdet (rött=5%, grönt=83%, blått=2%) så kan vi säga att färgen är mest grön men vi kan inte avgöra om det är gräs, kamouflage eller något helt annat.

Med en *hyperspektral* kamera avbildar man en scen med uppemot hundratals separata spektrala våglängdsband. Varje pixel ger nu istället en spektral signatur (ett *spektrum*) över de spektralband sensorn mäter. Utseendet på detta spektrum är fysikaliskt kopplat till de material som faktiskt avbildats. Med en spektral databas över kända material kan man

med en kalibrerad hyperspektral sensor avgöra om en pixel exempelvis är gräs eller något annat. Med en hyperspektral sensor som är både spatialt och spektralt högupplöst kan de avbildade objekten identifieras med en kombination av både form och spektralt innehåll.

Hyperspektrala sensorer finns i hela det optiska våglängdsområdet, från det ultravioletta vidare till det visuella och nära infraröda till det termiskt infraröda området. Kameror som designas för våglängder nära det visuella kan dra nytta av sensorutvecklingen för kommersiella digitalkameror och dessa kan då göras både billigare och mindre. Hyperspektrala sensorer längre upp i det termiska området blir vanligtvis mer komplicerade, tyngre och dyra, men detta ska vägas mot att de är spektralt bättre anpassade för detektion av vissa material och objekt (ex. gaser och mineraler men också kamouflage som ofta bättre anpassade för kortare våglängder) samt att de inte bara kan användas dagtid utan även nattetid.

Oavsett våglängd genererar dessa sensorer stora datavolymer som kräver avancerad signalbehandling för att processera de spatiala och spektrala signaturerna på ett effektivt sätt så att deras fulla potential kan komma till användning.

Jämfört med en konventionell kamera är således den stora nyttan med en hyperspektral kamera att den avbildar en scen i många (hundratals) separata våglängdsband där den uppmätta bilden i varje pixel ger ett spektrum vars utseende relaterar till de material som avbildats.

För att direkt kunna läsa ut vilket material en pixel innehåller krävs en noggrann kalibrering av sensordata där effekter och artefakter från hårdvara och atmosfären vid den aktuella mätpunkten kompenseras bort. Vanligtvis är heller inte pixlarna ”rena” dvs. det uppmätta spektrumet från en pixel består av en blandning från olika material. Med en spatialt högupplöst sensor (där varje pixel har ett litet fotavtryck på marken) ökar sannolikheten för rena pixlar men blandningar kommer vanligtvis ändå uppstå. Tillsammans med kalibrering och atmosfärskompensering är det med avancerade beräkningsmodeller och signalbehandling ändå möjligt att automatiskt processa de hyperspektrala bilderna och erhålla information som konventionella kameror inte ger.

Nedanstående avsnitt ger en inblick i några av de tillämpningar där elektrooptiska hyperspektrala kameror funnit stor nytta.

### 3.2.1 Applikationsexempel 1: Terrängkartering

För att framgångsrikt kunna planera och genomföra en insats behövs aktuella och detaljerade kartor över det geografiska området. Med passiva 2D-avbildande sensorer är det möjligt att få fram högupplösta spaningsbilder men även att rekonstruera markens topografi. Med en hyperspektral kamera är det dessutom möjligt att materialklassificera omgivningen.

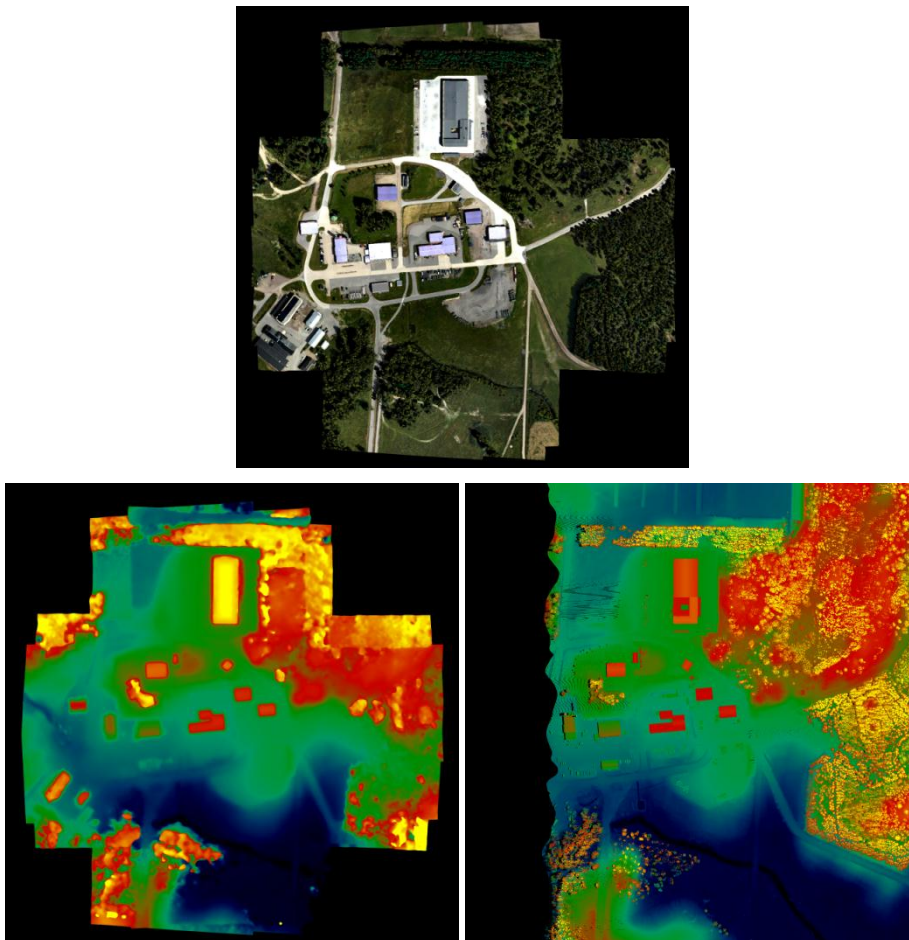
#### 3.2.1.1 Georeferering och 3D-avbildning

En förutsättning för att producera kartunderlag är möjligheten att kunna georeferera de insamlade spaningsbilderna, dvs. att transformera data från bildkoordinater till världskoordinater. Har man tillgång till ett navigationssystem som noggrant mäter kamerans position och orientering och dessutom tillgång till en höjddatabas över markens topografi, kan man i princip direkt utföra georefereringen genom att projicera bilddata på höjdmodellen. Har man inte tillgång till en höjdmodell kan man ansätta att marken är ett plan, men då kommer objekt som inte ligger i markplanet att projiceras till fel markpositioner och med en sned betraktningvinkel till den avbildade markscenen kommer stora höjdvariationer leda till stora fel hos den skapade kartan.

För att komma till rätta med ovanstående behöver markens topografi mätas upp. Genom att utnyttja en aktivt avståndsmätande sensortechnik, som t.ex. lidar (laserradar) eller radar, kan markhöjden direkt mätas upp. Med en passivt 2D-avbildande sensor är det ändå möjligt att estimeras topografien med fotogrammetrimetoder så som Structure From Motion

(SFM). Genom att identifiera samma objekt i flera bilder tagna från olika kamerapositioner kan objektens och kamerans 3D-positioner beräknas.

Figur 14 visar ett exempel på georeferering med SFM av 80 st simulerade spaningsbilder över Markstridsskolan i Kvarn. Alla bilder är inmätta från olika positioner utefter 8 st olika flygbanor. Den översta bilden i figuren visar resultatet av georefereringen och består av en mosaik av de 80 st georefererade bilderna. Nere till vänster i figuren visas den estimerade höjddatamodellen och nere till höger finns en höjddatamodell inmätt med högupplöst lidar (laserradar). De olika färgerna i höjdbilderna motsvarar en specifik höjd. En jämförelse mellan de två nedersta bilderna visar att topografin som tagits fram med SFM relativt väl motsvarar den aktivt inmätta höjddatamodellen även i absoluta termer, men att den i detta fall inte är lika högupplöst som lidar-mätningen.



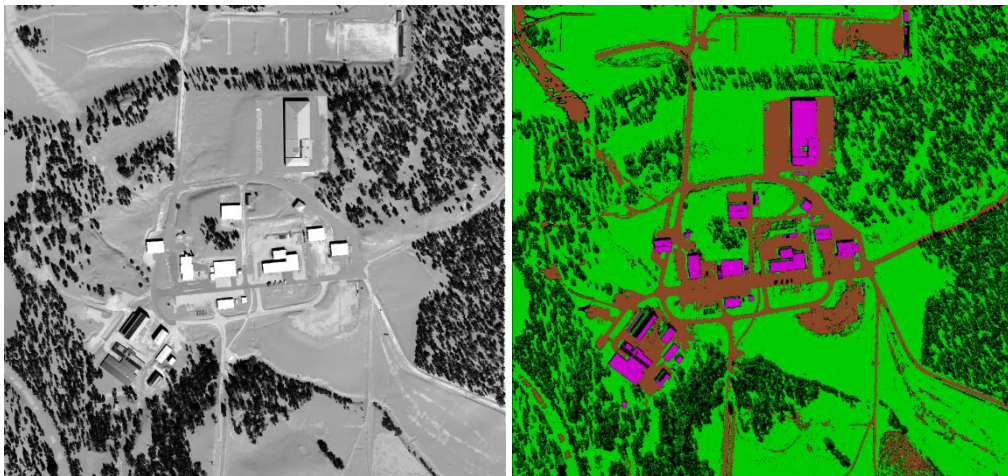
Figur 14. Med fotogrammetrimetoden Structure From Motion (SFM) kan bilder georefereras utan tillgång till noggrant navigationsdata och separat höjddatamodell av marken. Överst: Ortorektifierad mosaik av ca 80 st spaningsbilder. Nere till vänster: Höjddatamodell av den avbildade markscenen framtagen med SFM på de ca 80 spaningsbilderna. De olika färgerna motsvarar olika höjder över marken. Nere till höger: Motsvarande höjddatamodell uppmätt med högupplöst lidar.

### 3.2.1.2 Materialklassificering

Till skillnad från en konventionell färgkamera som mäter in färgerna rött, grönt och blått är det stora mervärdet med en hyperspektral sensor att den i varje bildpixel mäter in ett spektrum av värden från olika våglängdsband. Genom att kompensera för atmosfärens egenskaper och noggrant kalibrera sensordata är det möjligt att översätta dessa spektra till

materialtyper. Med ett referensbibliotek av inmätta spektrum för olika material kan den inmätta hyperspektrala bilden användas för automatisk materialklassificering. Alternativt kan små delområden i bilden användas för att extrahera referensspektra och sedan automatiskt klassificera övriga områden i bilderna med hjälp av dessa.

Figur 15 visar ett exempel på automatisk materialklassificering på simulerade hyperspektrala data från Markstridsskolan i Kvarn. Den simulerade VNIR-sensorn samlar in data i hundra spektrala band mellan 0.4-1.4  $\mu\text{m}$ . Bilden till vänster visar bandet omkring 1.4  $\mu\text{m}$ . Till höger i Figur 15 visas resultatet av en automatisk terrängklassificering med metoden Spectral Angle Mapper (SAM). Indata till algoritmen är spektrum för tre olika takplåtsmaterial (visas i bilden i färgen magenta), tre olika vägmaterier (brunt), gräs (ljusgrönt) och skog (mörkgrönt). Områden som algoritmen inte kan härleda till någon av dessa klasser visas i färgen svart.



Figur 15. Vänster: Ett spektralband (omkring 1.4  $\mu\text{m}$ ) från en simulerad hyperspektral sensor med 100 delband i VNIR från 0.4-1.4  $\mu\text{m}$ . Höger: Materialklassificerad markscen med klasserna vägmaterier (brunt), takplåt (magenta), gräs (ljusgrön), skog (mörkgrönt) och okänt (svart).

### 3.2.2 Applikationsexempel 2: Måldetektion och klassificering

På liknande sätt som för terrängklassificering kan de hyperspektrala bilderna användas för att detektera enstaka objekt. Istället för att klassificera hela bilderna i olika materialtyper är avsikten vid måldetektion att hitta exempelvis ett specifikt fordon i bilden. Beroende på vilken förkunskap som finns om det eftersökta objektet kan olika metoder appliceras.

#### 3.2.2.1 Anomalidetektion

Vid anomalidetektion saknas spektral information om de objekt som ska detekteras och antaganden görs istället om att bilden till största delen består av ointressant bakgrund. Genom att lokalt eller globalt i bilden göra en modell för det spektrala innehållet i bakgrunden och sedan för varje bildpixel jämföra om det aktuella pixelvärdet tillhör bakgrund eller inte erhålls ett mått på hur bakgrundslika de olika pixlarnas spektrum är. Pixlar vars spektrala innehåll skiljer sig signifikant från bakgrundsmodellen kan då detekteras som anomalier för vidare analys av exempelvis en operatör.

### 3.2.2.2 Spektral signaturmatchning

Om det finns referensspektrum för de eftersökta objekten antingen från en signaturdatabas eller från en annan hyperspektral bild kan målens spektrala innehåll modelleras. Genom att jämföra spektrum för målet med varje spektrum i bilden kan man avgöra om spektrumet tillhör bakgrundsklassen eller målklassen. Olika modeller kan tillämpas, till exempel direkt matchning med målspektra eller matching där man använder en modell för målet och eventuellt även av bakgrunden. Både direkt matchning med kända referensspektrum samt återigenkänning av fordon mellan olika bilder är möjligt med dessa tekniker.

Figur 16 visar följande exempel på signaturbaserad måldetektion. Vi har identifierat en stridsvagn av typen Leopard 2A6 precis nedanför byggnaden i mitten av bilden men vill även avgöra om det finns fler stridsvagnar av samma typ i omgivningen. Med ett referensspektrum från den första stridsvagnen applicerar vi måldetektionsalgoritmen ACE (Adaptive Coherence Estimator) på bilden. Då detekteras ytterligare en stridsvagn som är dold i skogen. Området i figuren är relativt litet, men visar ändå på konceptet hur detta fungerar. I en betydligt större markscen i en klottrig miljö där en operatör/bildtolkare får till uppgift att hitta ett specifikt målobjekt, är det enkelt att inse att en förmåga av denna typ kan vara synnerligen välkommen.



Figur 16. Detektion av stridsvagnar av typen Leopard 2A6 med signaturbaserad måldetektion.

### 3.2.2.3 Måligenkänning

Med anomalidetektion eller spektral signaturmatchning detekteras mål utifrån deras spektrala egenskaper. Genom att dessutom använda information om objektens spatiala utbredning (form, storlek, struktur etc.) kan en algoritm utformas som kan skilja mellan olika typer av objekt bestående av samma material och som således uppvisar liknande spektralt innehåll. På detta sätt kan måldetektionen göras mer specifik och undertrycka ointressanta detektioner som har fel form.

### 3.2.2.4 Förändringsdetektion

Om det finns tillgång till fler än en avbildning av samma markområde ges även möjligheten att utföra förändringsanalys av bildsekvenserna. Motivet kan vara att detektera långsamma förändringar i större områden som exempelvis att följa tillväxt i naturområden eller övervaka förändringar i infrastruktur. Men det kan även handla om

snabbare förlopp som att detektera fordonsförflyttningar mellan bilder inmätta under samma dag.

Det är möjligt att dela in denna typ av detektionsmetod i två huvudtyper; pixelbaserad och objektbaserad förändringsdetektion. Syftet i båda fallen är att detektera temporala förändringar mellan två eller flera bilder.

I den pixelbaserade ansatsen kombineras bilderna genom att jämföra bilderna pixel till pixel för att i största mån undertrycka den stationära bakgrunden och framhäva intressanta förändringar. Denna jämförelse utförs med något slags mått på skillnader mellan pixelvärdena. I en ideal situation där bilderna är perfekt radiometriskt och geometriskt kalibrerade med exakt samma avbildningsförutsättningar skulle det vara möjligt att subtrahera två bilder så att enbart förändringarna fanns kvar. Tyvärr fungerar detta sällan i realiteten eftersom belysning, avbildningsgeometri, brus, etc. förändras över tiden vilket gör att mer avancerade mått på förändring behöver användas.

Objektbaserad förändringsdetektion innebär att bilderna först processeras till en objektrepresentation som på en högre nivå beskriver vad bilderna innehåller. Dessa objekt kan vara fordonsdetektioner, extraherade vägnät eller andra mer abstrakta egenskaper som beskriver bildinnehållet. Därefter analyseras de extraherade objekten och deras egenskaper för att detektera förändringar mellan bilderna.

Fördelen med den traditionella pixelbaserade metodiken är att det är relativt rättframt att utforma ett förändringsmått som direkt på pixelnivå kan användas för att hitta förändringar i signalnivåerna. Detta kräver dock en ytterst noggrann samregistrering av bilderna som ska jämföras så att en pixel i ena bilden direkt kan hänföras till en pixel i en annan bild. Med en objektbaserad ansats kan metoden bli mer robust för skillnader i exempelvis upplösning, mätgeometri, belysning, väder och till och med sensortyp så länge som de eftersökta förändringarna kan beskrivas med samma typ av objekt i de bilder som ska kombineras. Vilken typ av objektrepresentation som ska användas i det specifika fallet för att hitta de eftersökta förändringarna är dock inte trivialt.

### 3.3 Highlights 2012-2014

Teknikområdet har i projektet under den aktuella perioden främst inriktats mot deltagandet i EDA-samarbetet DUCAS, men också gjort insatser för att vidareutveckla ett sensor-koncept i LWIR. Nedan följer en översiktlig beskrivning av dessa aktiviteter med resultat och slutsatser.

#### 3.3.1 DUCAS

Ett av de största arbetspaketen inom projektet IR-spaning har varit ett arbete genomfört inom EDA-projektet *Detection in Urban scenario using Combined Airborne imaging Sensors* (DUCAS), som var finansierat av de sju deltagande länderna Sverige, Norge, Tyskland, Nederländerna, Belgien, Frankrike och Italien. Projektet startade i januari 2010 och pågick under 4 år.

Många av resultaten och dokumenten från DUCAS-projektet är hemligstämplade [4]. Ett konfidentiellt resultatseminarium hölls för berörda parter i maj 2014 [5]. Då presenterade FOI tillsammans med FMV projektets viktigaste resultat och slutsatser. I det nedanstående följer en kortfattad öppen sammanfattning av projektet, se även [6] för ytterligare information.

Målet med projektet DUCAS var att undersöka nyttan med att använda en kombination av spatialt och spektralt högupplösta flygande sensorer för militära ändamål i en komplex urban miljö. Följande frågeställningar studerades:



- Prestanda för att detektera, klassificera och identifiera svåra mål i en urban miljö med en kombination av hyperspektrala och spatialt högupplösta aktiva och passiva sensorer i jämförelse med konventionella (bredbandiga) tekniker.
- Utvärdera förbättring av marklägesbilden och spaningskapaciteten i en urban miljö.
- Föreslå nya systemkoncept inom de områden där en kombination av hyperspektrala och spatialt högupplösta passiva och aktiva sensorer ger en tydlig nytta.

Arbetet i DUCAS delades upp i sex arbetspaket enligt Tabell 2.

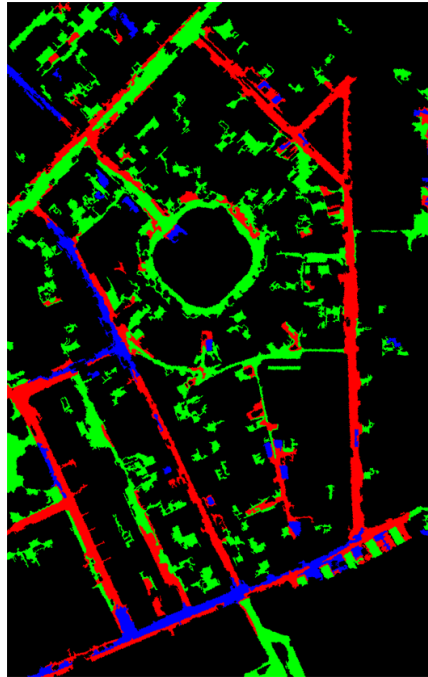
Tabell 2. De sex arbetspaketen i DUCAS.

Arbetspaket – beskrivning	Ledare
<i>AP 0: Management</i>	Sverige
<i>AP 1: Trial preparations and methodology</i>	Tyskland
<i>AP 2: Trial</i>	Belgien
<i>AP 3: Processing capability development and integration</i>	Nederländerna
<i>AP 4: Performance evaluation for each scenario</i>	Frankrike
<i>AP 5: Conclusions and recommendations</i>	Italien

Många grundläggande ämnen studerades inom DUCAS-projektet, såsom belysningskällor, atmosfärsutbredning, ytors spektrala egenskaper och spridningsegenskaper, mål- och klottersignaturer, sensorprestanda, kalibrering och signalbehandling. Alla dessa områden krävde områdesexpertis som kunde bildas genom att sätta samman arbetsgrupper från de deltagande instituten och dra nytta av de olika ländernas kompetenser.

Arbetet inleddes med planering och metodstudier. Därefter genomfördes ett mycket omfattande fältförsök sommaren år 2011 i kuststaden Zeebrugge i Belgien. Sensordata bestod bl.a. av spatialt högupplösta optiska bilder (VNIR), hyperspektrala bilder från det visuella området till LWIR, termiska bilder i MWIR-området och 3D-data. Data mättes in från såväl flygande plattformar som på marken. Dessutom genomfördes en omfattande dokumentation av de olika scenerna som avbildades (positionering, väderdata, spektrala referensmätningar, etc.), i syfte att i efterhand kunna kalibrera och analysera de insamlade spaningsbilderna.

På grund av att urbana miljöer och mänskliga aktiviteter är komplexa är signaturen från mål och klotterbakgrund väldigt varierande. Att detektera och klassificera dessa objekt med enbart en typ av sensor är i praktiken väldigt svårt. Genom att fusionera data från flera sensortekniker och ibland använda en operatör kan signifikanta förbättringar erhållas. Spatialt högupplösta sensorer kan användas för att känna igen formen hos objekt och spektralt högupplösta sensorer möjliggör karaktärisering av olika material. Figur 17 visar ett exempel där vägnätet i Zeebrugge har karterats med en hyperspektral sensor.



Figur 17. Vagnätverk i staden Zeebrugge, klassificerad i tre typer av material visade i olika färger.

En förutsättning för att kunna kombinera data från olika sensorer och dra nytta av det fusionerade resultatet är att bilderna behöver vara noggrant georefererade, dvs. en pixel ska kunna relateras till en specifik markkoordinat. Detta arbete involverade kalibrering och synkronisering av såväl interna som externa parametrar (radiometriska nivåer, distorsion, position, orientering, tid, etc.). Figur 18 visar ett exempel på resultat av georeferering av fem olika hyperspektrala bilder från DUCAS-försöket i Zeebrugge. Dessa bilder har i figuren sammanfogats och överlagrats på en referensbild i form av ett ortofoto som kan ses i den övre högra delen av figuren. En detaljgranskning av figuren visar att delbilderna mycket väl sammanfaller med varandra och ortofotot. Längs gränserna mellan delbilderna går det i vissa fall att hitta små förskjutningar i storleksordningen av enstaka pixlar.



Figur 18. En illustration av uppnådd noggrannhet i georeferering där fem olika hyperspektrala bilder georefererats och som referens överlagrats på ett ortofoto som syns längst upp till höger.

Förändringsdetektion, dvs. att kombinera bilder från olika tidpunkter över samma avbildade område för att hitta förändringar, kan i vissa specifika fall vara väldigt kraftfullt. I en urban miljö resulterar förändringsanalys generellt sett i ett överväldigande stort antal detektioner eftersom det typiskt sker många förflyttningar av fordon, människor och andra objekt. Därför blir förändringsresultatet svårt att analysera eftersom de flesta detektionerna kommer från riktiga (inte falska) förändringar som inte har med det specifika spaningsuppdraget att göra. I en sådan situation kan signaturbaserade metoder avsevärt hjälpa till att förbättra marklägesbilden, i synnerhet återigenkänningsmetoder där spektral signaturmatchning av specifika material används för att hitta de intressanta objekten och filtrera bort de ointressanta förändringarna. Genom att först samla in spektrum på det eftersökta målet kan det sedan följas i en sekvens av efterföljande bilder med återigenkänningsalgoritmer, vilket görs genom att successivt anpassa den spektrala referenssignaturen till den rådande avbildningssituationen (väder, belysning, etc.).

Figur 19 visar ett exempel på den förbättrade detektionsförmågan då förändringsanalys kombineras med spektral återigenkänning. Till vänster visas en bild med överlagrade gula punkter som visar tillkomna förändringar i ett stadsområde där man misstänker att ett efterspanat fordon befinner sig. Genom att använda den tidigare insamlade spektrala målsignaturen i en återigenkänningsalgoritm hittas några tänkbara målkandidater. Genom att kombinera detta resultat med förändringskartan blir det tydligt att en av de detekterade förändringarna sammanfaller med ett specifikt objekt.



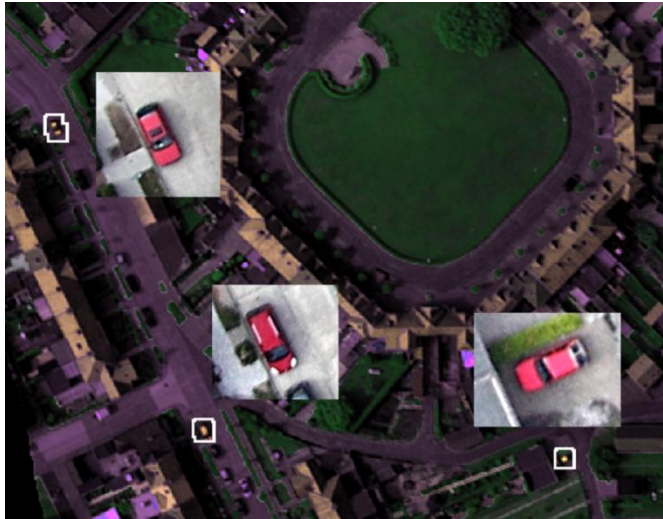
Figur 19. Vänster: Detekterade tillkomna förändringar. Höger: Resultat från återigenkänningsalgoritmen. Ett detekterat objekt återfinns i båda resultatbilderna.

En central tillämpning av hyperspektrala bilder är måldetektion och klassificering med spektral matchning. Vid fältförsöket i Zeebrugge mättes ett stort antal referensspektrum in på markobjekten som deltog i målspelet. Den stora utmaningen i att matcha ett referensspektrum från ett bibliotek mot insamlade hyperspektrala bilder, består i att modellera och kompensera för effekter av atmosfärspåverkan, belysningsomständigheter och markgeometri (skuggor, reflektioner, etc.). Resultat från detta arbete som innefattar en ny metod för spektral matchning som kombineras med en scenbaserad metod för atmosfärskompensation har sammanfattats i en tidskriftsartikel [9].

I DUCAS studerades också hur klassificeringsresultat kan förbättras med hjälp av andra sensordata. Med tillgång till 3D-data och annan geografisk information kan exempelvis markplan och byggnader extraheras för att reducera eventuellt falska detektioner. Detektioner uppe på byggnader eller ute i vattnet är exempelvis förmodligen inte intressanta om målet är att hitta markfordon.

Figur 20 visar klassificeringsresultat där ett referensspektrum från en godtycklig röd bil har använts med spektral signaturmatchning för att hitta andra röda bilar i staden. I bilden har tre röda bilar detekterats utan andra falsklarm. Med en lägre detektionströskel är risken för falska detektioner högre. Finns dessutom högupplösta bilder av de detekterade objekten är det möjligt att klassificera dessa utifrån deras form och struktur för att filtrera bort oönskade detektioner.

Detektionsresultaten som visas i figuren kan även utnyttjas för att extrahera fler referenssignaturer till det spektrala biblioteket för att förbättra målmodellen.



Figur 20. Detektion av röda bilar baserat på ett spektrum av en röd bil taget från ett referensbibliotek. Likande resultat fås om spektrum i stället samplas manuellt från en observerad bil i scenen.

### 3.3.2 Vidareutveckling av hyperspektralt sensorkoncept i LWIR

Sedan några år tillbaka har det på FOI pågått ett utvecklingsarbete kring ett eget hyperspektralt sensorkoncept för LWIR. Det huvudsakliga syftet med utvecklingsarbetet har främst varit att bygga upp en sensornära kompetens inom teknikområdet, men en förhoppning har också funnits att konstruera ett mätsystem för användning i laborativt och demonstrativt hänseende. Under tidsperioden 2013-2014 har utvecklingsarbetet fortsatt mha. stöd från deltagandet i EU-projektet AIRBEAM (*AIRborne information for Emergency situation Awareness and Monitoring*).

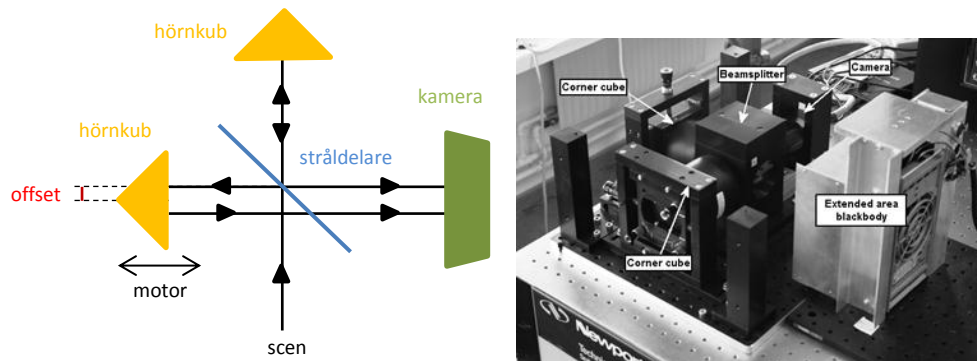
Sensorkonceptet bygger på interferometri där den spektrala informationen är kodad i bilden i form av ett interferensmönster som är överlagrat som ett intensitetsmönster ovanpå den två-dimensionella spatiala informationen. I intensitetsmönstret korresponderar olika spatiala frekvenser mot olika ljusvåglängder och genom en Fouriertransform erhålls ett spektrum för varje pixel. Denna sensorprincip kallas för en avbildande Fouriertransform-spektrometer.

Två principiella fördelar kan ses med en interferometriskt baserad hyperspektral sensor kontra filtererade och dispersiva (prism- och gitterbaserade) varianter, vilka är de två andra konventionella metoderna för att konstruera en hyperspektral sensor. Till skillnad mot dessa kan interferometriska sensorer simultant samla in all spektral information över sensorns känslighetsområde, vilket ger en högre signal/brus-kvot för en given insamlingstid och spektralupplösning. Interferometriska sensorer undviker också de aperturbegränsande spalter som dispersiva system använder vilket ger en högre energigenomströmning genom instrumentet (eng. *throughput*) för en given spektralupplösning.

En bild på instrumentuppställningen för FOIs sensorkoncept visas i Figur 21. Designen bygger på en Michelson-interferometer med två vinkelräta optiska axlar. Ljuset från scenen delas via stråldelaren upp i två identiska kopior som propagerar längs de två olika optiska axlarna och reflekteras mot speglar i form av hörnkuber som är placerade i respektive optiska axels ände. Anledningen till varför hörnkuber används i uppställningen är att de är mer robusta vid upplinjering än plana speglar, en hörnkub reflekterar strålning tillbaka i samma riktning oavsett om strålningen kommer in vinkelrätt eller något förskjutet mot denna riktning. De två separerade strålarna kommer sedan efter sina reflektioner i respektive hörnkub att sammanfalla och interferera med varandra när de möts igen över kamerans fokallansarray (interferens uppkommer pga. av att de optiska våglängderna skiljer sig åt). I den nuvarande uppställningen används en okyld



mikrobolometerkamera med 640x480 pixlar som är känslig i våglängdsområdet 7-14  $\mu\text{m}$ , med en relativt modest brusprestanda (NETD < 85 mK). En germanium-lins med 50 mm fokallängd ger sensorn ett synfält på ca  $18^\circ \times 13^\circ$ . Uppställningen är dock flexibel och går att uppgradera med ny optik och ny fokalplansarray vid behov.



Figur 21: Uppställningen för den hyperspektrala interferometriska LWIR-sensorn, med en schematisk ritning till vänster och ett foto till höger.

I konceptet är en av hörnkuberna förskjuten vinkelrätt mot den optiska axeln, vilket genererar en liten spatial offset mellan de två interfererande strålarna (se Figur 21). Detta skapar en avsiktlig asymmetri i interferometeruppställningen vilket resulterar i en gradient i den optiska vägskillnaden som uppstår över fokalplansarrayen. Genom att skanna interferensmönstret över kameran (eller scenen) medan fokalplansarrayen läses ut, kan varje pixel i arrayen exponeras för alla optiska våglängder och den tredimensionella hyperkuben kan på detta sätt byggas upp (med två spatiala dimensioner och en spektral dimension). Detta är principen för en s.k. spatialt avbildande Fouriertransform-spektrometer, som har fördelen gentemot temporala varianter i att den inte behöver några rörliga delar. Avsaknaden av rörliga delar gör konstruktionen mer robust mot mekaniska vibrationer och mindre känslig för felaktig upplinjering av de optiska komponenterna.

I den nuvarande designen finns två olika skanningsmoder implementerade. Den främsta tilltänkta applikationen för sensorn är flygspaning där interferensmönstret kan svepas över scenen pga. sensorplattformens relativa rörelse mot denna. Detta kallas pushbroom-mod (se Figur 22 för en illustration), där alltså interferensmönstret är i en fix position över kameran medan scenen rör sig i förhållande till denna. Denna mod kan alternativt erhållas genom att röra sensorn i förhållande till scenen eller genom att använda en roterbar spegel framför ingångsoptiken.



Figur 22: I pushbroom-mod är interferensmönstret fixt i kamerans synfält medan en relativ rörelse mellan scen och sensor (pga. en plattformsrörelse exempelvis) gör att mönstret sveps/skannas över scenen.

Den andra skanningsmoden möjliggörs av en motor som är integrerad i uppställningen som kan translatera den lateralt förskjutna hörnkuben parallellt längs den optiska axeln (se Figur 21). Detta ändrar villkoren för den optiska vägskillnaden över arrayen och får som

följd att interferensmönstret kan förflyttas från sida till sida över fokalplansarrayen (se illustration i Figur 23). En uppenbar nackdel med denna mod är förstås att den kräver rörliga delar, vilket minskar robustheten (och ökar SWaP-C). Denna spegeltranslaterande mod är främst införd för att tillhandahålla en praktisk skanningsmetod för laborativa ändamål där man ofta har en statisk scen och vill kunna skanna scenen utan att behöva rotera eller röra på sensorn.



Figur 23: I en spegeltranslaterande mod förflyttas interferensmönstret över en statisk scen mha. en förskjutning av den ena hörnkuben parallellt längs den optiska axeln (mha. motorn implementerad i Figur 21).

Konceptets spektralåtergivande egenskaper har redan testats, utvärderats och presenterats vetenskapligt, både i journal och på konferenser [7][8]. På senare tid har lovande resultat också uppvisats med avseende på spatiospektral återgivning (dvs. de avbildande spektrala egenskaperna), där sensorn med framgång använts för exempelvis materialklassificering i en statisk scen med olika mineralmaterial. I dessa försök har det framkommit att radiometriska kalibreringsmetoder och signalbehandlingsmetoder behöver förbättras, snabbas upp och automatiseras. Ytterligare försök är därför planerade för 2015 för vidareutveckling kring detta.

### 3.4 Framtidsutblick

Resultaten från DUCAS påvisade en stor vinst med att använda fusionerat data från olika sensorteknologier. De utvärderade systemen och metoderna är dock inte operativt tillräckligt mogna ännu, åtminstone inte i Europa.

Design av nuvarande hyperspektrala sensorer är en trade-off mellan hög spatial upplösning mot hög spektral upplösning. För att robust kunna detektera små mål krävs inte bara hög spektral upplösning för att kunna särskilja små spektrala skillnader mellan olika material utan även förmågan att upplösa objekten spatialt. Med ett litet fotavtryck för en pixel på marken ökar möjligheten att mäta in målets spektrala signatur utan inverkan från bakgrunden vilket ger en bättre förmåga att undertrycka bakgrunden. Med så små mål som människor krävs en spatial upplösning som är betydligt högre än vad dagen system vanligtvis levererar. Med ett väl upplöst mål är det dessutom möjligt att utveckla metoder som kombinerar spektrala och spatials egenskaper för att ytterligare förbättra förmågan. Utvecklingen av stora fokalplansarrayer leder till utveckling av hyperspektrala sensorer med högre upplösning vilket krävs för att kunna diskriminera små mål i komplexa miljöer. Det är dessutom önskvärt att systemen kan leverera bilder i videotakt så att hot kan detekteras i realtid.

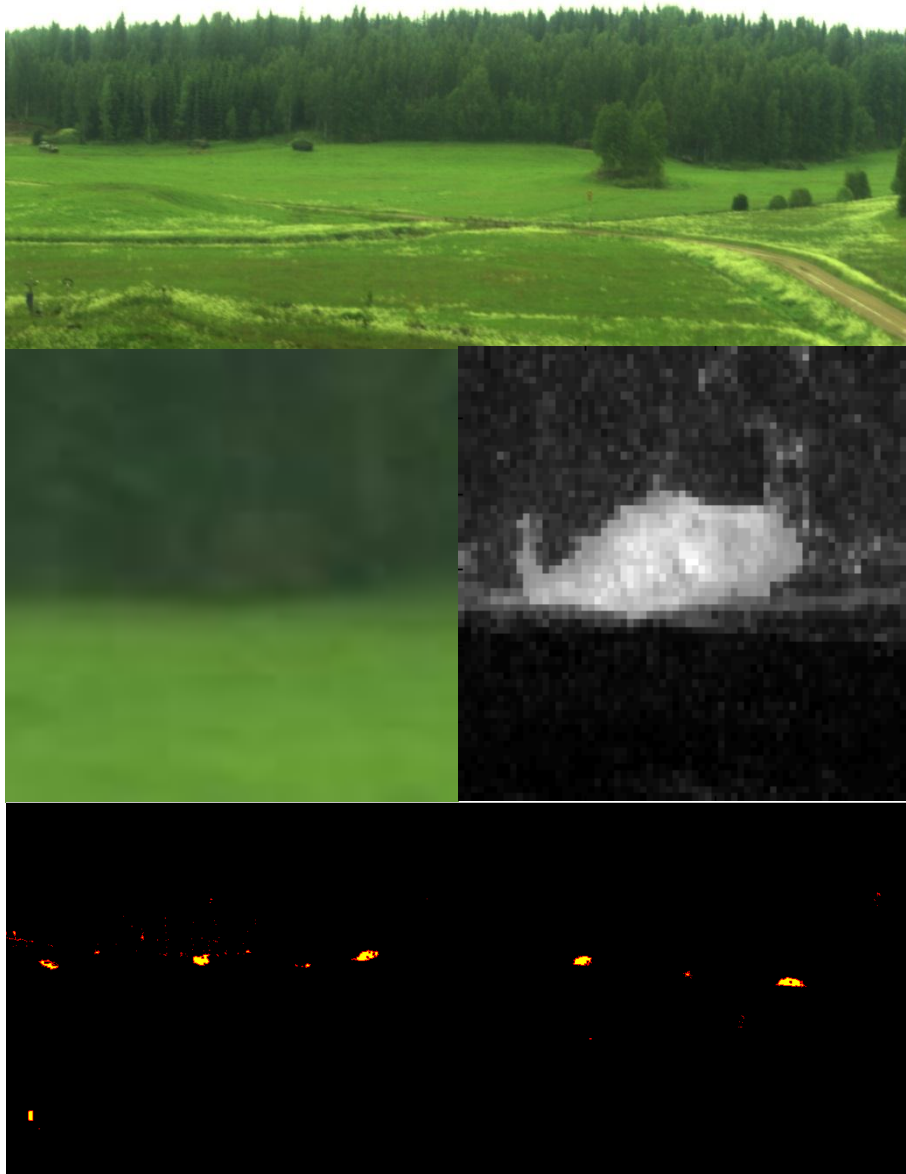
De algoritmer och resultat som diskuteras här är inte alla helt automatiserade. I flera fall behövs en operatör för att sätta exempelvis tröskelnivåer eller sortera bort artefakter. Med fortsatt utveckling och erfarenhet inom området bör mer robusta och automatiserade metoder kunna utformas. Detta ställer stora krav på processeringen av bilderna för att få till en noggrann radiometrisk och geometrisk kalibrering. Den enorma datamängden som hyperspektrala bilder i kombination med hög bilduppdateringstakt producerar kräver också utveckling av operativa algoritmer som klarar av såväl automatisering som realtidsanalys.

Gäller det dessutom sensorer på mindre flygande farkoster eller andra system, med begränsade beräkningsresurser, blir utmaningarna ännu svårare.

DUCAS har också påvisat bristen av prestandavärderande metoder för hyperspektrala sensorsystem och ytterligare arbete är önskvärt för att kunna ex. måttsetta diskrimineringsprestanda i syfte att kunna värdera olika sensortekniker och olika detektions- och målföljningsalgoritmer.

De förmågor som beskrivits i detta avsnitt får följaktligen även konsekvenser för skyddet av egna styrkor. En avancerad fiende som har tillgång till ett hyperspektralt avbildande system försvårar exempelvis möjligheten att kamouflera sig i en naturlig omgivning. Figur 24 visar ett bildexempel där ett antal objekt har dolt sig med konventionella kamouflagenät i ett skogsbyn och avbildats med en hyperspektral kamera i det visuella och nära infraröda området. Den översta bilden och bilden i mitten till vänster visar färgbilder (tre visuella spektrala band) över skogsområdet och en uppförstoring av ett av objekten. I dessa är det ytterst svårt att urskilja kamouflagenäten mot bakgrunden. I mitten till höger och längst ner i figuren visas resultatet av anomalidetektion på den hyperspektrala bilden. I dessa framträder kamouflagenäten och kan enkelt detekteras. Vid upphandling av nytt kamouflage, uniformer, fordon etc. eller utformning av operationella beteenden är detta en aspekt som noggrant bör beaktas.





Figur 24. Exempel på hyperspektral anomalidetektion av kamouflerade mål i en skogsomgivning. Överst: Färgbild från tre spektrala band i det visuella området. Mitten till vänster: Uppförstoring på ett av kamouflagenäten i skogsbrynet. Mitten till höger: Samma objekt förstärkt med anomalidetektion. Nederst: Resultat från anomalidetektion över hela bilden.

### 3.5 Referenser

- [4] DUCAS “Detection in Urban scenario using Combined Airborne imaging Sensors”, Final report, EU Confidential, (Juli 2014).
- [5] Milstolperedovisning DUCAS-seminarie för kvartal 2 2014 inom projektet IR-spaning AF.9220409, FOI Memo 4989 (2014).
- [6] DUCAS - Executive Summary, FOI Memo 4686 (2013).
- [7] Ingmar Renhorn, Thomas Svensson, Staffan Cronström, Tomas Hallberg, Rolf Persson, Roland Lindell och Glenn Boreman, “Demonstration of a

- Corner-cube-interferometer LWIR Hyperspectral Imager”, *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, Vol. 31, Issue 1, pp 60-65 (2010).
- [8] David Bergström, Ingmar Renhorn, Thomas Svensson, Rolf Persson, Tomas Hallberg, Roland Lindell och Glenn Boreman, “Noise properties of a corner-cube Michelson interferometer LWIR hyperspectral imager”, *Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XVI*, Vol. 7695, SPIE DSS, Orlando, USA (2010).
- [9] Maria Axelsson, Ola Friman, Trym Vegard Haavardsholm, Ingmar Renhorn, Target detection in hyperspectral imagery using forward-modeling and in-scene information, Manuscript. Submitted for journal publication.

## 4 Polarimetrisk avbildning

Det tredje av projektets huvudaktiviteter har varit att vidareutveckla kompetensen inom polarimetrisk avbildning, som är ett teknikområde som både bidrar med helt nya förmågor men som också förstärker befintliga förmågor som exempelvis spektral avbildning bidrar med. Projektet har inledningsvis fokuserat på kompetensuppbyggande studier, i syfte att höja den generella kompetensen inom området och förbereda för framtida mer fördjupande studier av både teoretisk men framför allt experimentell karaktär.

### 4.1 Förmågor för FM

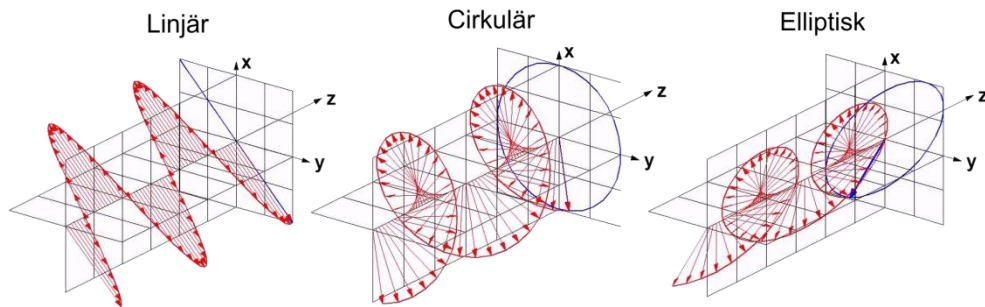
Polarimetrisk elektrooptisk avbildning bedöms ha god potential för följande nya eller förbättrade förmågor för Forsvarsmakten:

**Förbättrad passiv spanings- och övervakningsförmåga med ökad räckvidd och större robusthet, genom**

- 1) **utökad diskrimineringsförmåga** i hela det optiska våglängdsområdet av framför allt **svårupptäckta mål** (så som kamouflage, minor och andra lågsignaturmål) i variationsrika och **klottriga bakgrundsmiljöer**.
- 2) **utökad generell detektions-, igenkännings- och identifieringsförmåga** i det **termiska IR-området**, mha. kontrastförbättring och texturinformation.
- 3) **utökad sikt** i EO-området (VNIR och SWIR).

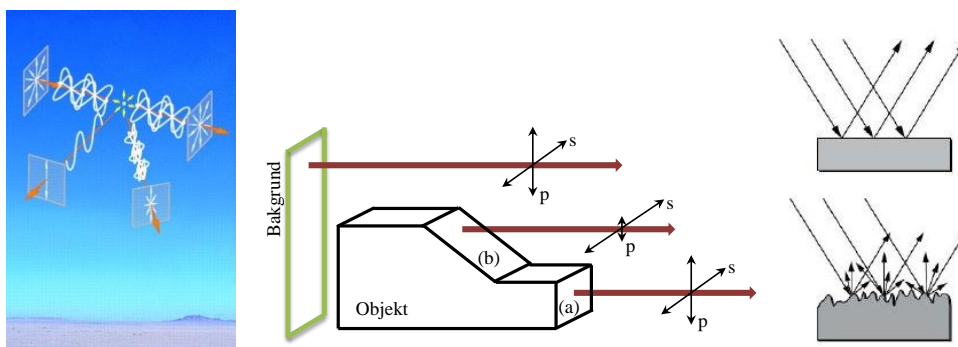
### 4.2 Bakgrund

Polarimetrisk avbildning syftar till att spatialt avbilda polarisationsinnehållet hos reflekterat och emitterat ljus, dvs. riktningen i vilket ljuset som en elektromagnetisk våg oscillerar. Ljus består av ömsesidigt beroende elektriska och magnetiska fält, där variation i det ena fältet ger upphov till variation i det andra. Detta skapar en våg, som liksom ringar på vattnet från en sten som kastats, utbreder sig vinkelrätt från källan och i förhållande till de oscillerande fälten. Energiinnehållet beskrivs av våglängden (avståndet topp till topp eller dal till dal) och spektralinnehållet av intensitetsfördelningen över olika våglängder/energier hos vågutbredningen, något som utnyttjas vid spektral avbildning för att avläsa materialinnehållet i en bildscen (så som det tidigare beskrivits i avsnitt 3). Polarisationstillståndet ges av riktningen och amplituden hos den elektriska fältstyrkans variation (det magnetiska fältet är alltid vinkelrätt mot detta fält och av konvention har man valt att beskriva polarisation utgående från det elektriska fältets egenskaper). Figur 25 visar de tre primära polarisationstillstånden som ljus kan befinna sig i; **linjärpolariserat** ljus då det elektriska fältets amplitud varierar i endast en riktning, **cirkulärpolariserat** ljus då det elektriska fältet kontinuerligt byter riktning med konstant amplitud samt **elliptiskt polariserat** ljus då förutom riktningen också amplituden kontinuerligt varierar. De flesta naturliga ljuskällor (ex. sol- eller månljus eller termisk egenstrålning) skapar dock ljus som härrör från en stor mängd atomer och molekyler, som är okorrelerade med varandra, vilket genererar ljus som är slumpmässigt polariserat eller **opolariserat** som det också kallas. Vissa artificiella ljuskällor, ex. laserkällor, kan emellertid generera polariserat ljus.



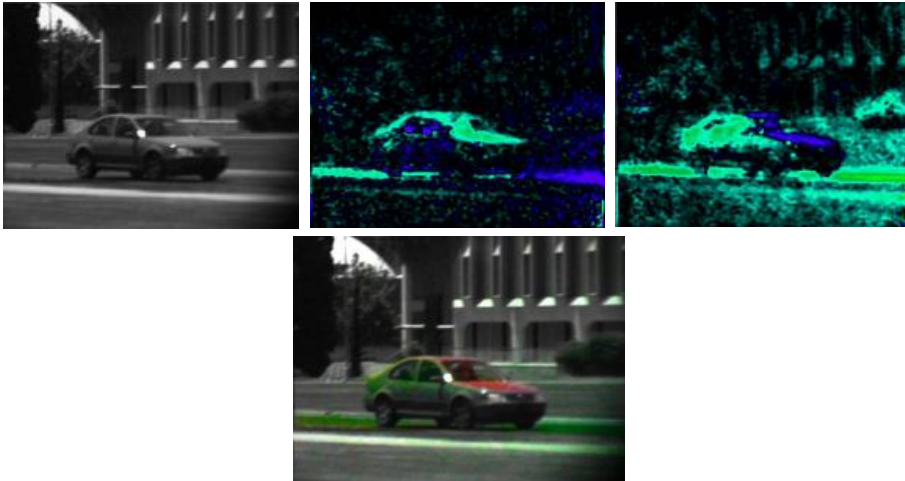
Figur 25: Linjär-, cirkulär- och elliptiskt polariserat ljus.

När det polariserade eller opolariserade ljuset utbreder sig och växelverkar med materia längs dess väg från ljuskälla till sensor kommer det undgå förändringar som påverkar dess polarisationstillstånd och ljuset kan alltså övergå från att vara helt opolariserat till att bli partiellt eller helt polariserat. Atmosfären påverkar polarisation via absorptions- och spridningsmekanismer i molekyler och olika typer av aerosoler. Tillståndet påverkas också när ljuset reflekteras, transmitteras, sprids eller emitteras via olika materials ytor, där det främst är de olika ytornas orientering samt deras släthets- eller ojämnhetsegenskaper som är av störst betydelse (se Figur 26 för en illustration). Notera alltså att även om ljuskällan kan vara helt opolariserad så kan ljusets skiftande växelverkan med olika typer av materialytor polarisera ljuset, vilket skapar polarimetriska signaturer som sensorer kan använda för mål/bakgrundsdiskriminering.



Figur 26: Tre olika sätt med vilka polarisationstillståndet hos ljus kan förändras, (vänster) via molekyl- eller aerosolspridning i atmosfären, (mitten) via reflektion/emission i ytor pga. olika geometrisk orientering samt (höger) via reflektion/emission i ytor pga. deras släthet. (Källa: [10])

Sensorer avpassade för elektrooptisk polarimetrisk avbildning finns av både aktiv (vanligtvis laserbaserade) och passiv typ (de som främst hanterats i detta projekt). Båda sensortyperna använder olika filtreringsmetoder för att karaktärisera polarisationstillståndet hos ljuset som faller in över sensorn (i vissa fall kan sensorn själv också vara polarisationskänslig). De filtrerade komponenterna sätts sedan mha. digital signalbehandling samman till en bild för visualisering och tolkning av en mänsklig operatör (se bildexempel i Figur 27).



Figur 27: Tre polarisationsfilterade bilder (övre rad) och en ur dessa fusionerad bild (nedre) för visualisering av graden av linjärpolarisation i två olika riktningar (färgade grönt resp. rött). (Källa: [10])

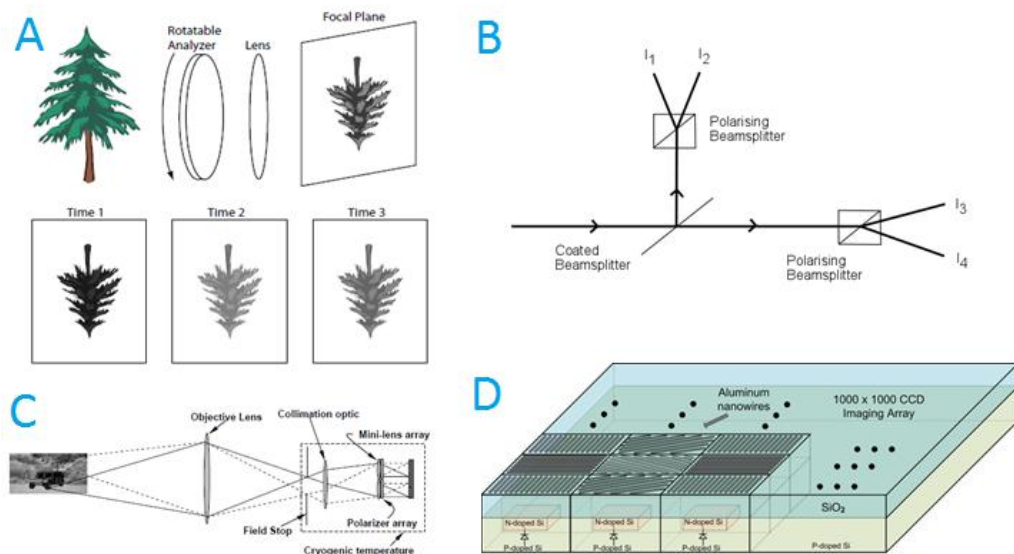
### 4.3 Highlights 2012-2014

Teknikområdet har i projektet under den aktuella perioden främst bedrivits i form av uppstartande litteraturstudier (två till antalet) i syfte att höja den generella kompetensen inom området och förbereda för framtida mer fördjupande studier av både teoretisk men framför allt experimentell karaktär. Nedan följer en översiktlig beskrivning av dessa med deras viktigaste slutsatser.

#### 4.3.1 Polarimetrisk och spektropolarimetrisk sensorstudie

En avskannande studie genomfördes 2012 med syfte att skapa en lägesbild över teknisk status (state-of-the-art) för polarimetriska och spektropolarimetriska (kombinerade polarimetriska och spektrala) EO-sensorer samt för generell kompetenshöjning inom teknikområdet. Studien, som bedrevs i form av en litteraturstudie och rapporterats i [10], omfattade både passivt och aktivt avbildande sensorer samt signal- och bildbehandlingsmetoder framtagna för hantering av bilddata från dessa.

Rapporten från studien sammanfattar på ett kortfattat sätt olika passiva (och aktiva) avbildningsmetoder samt signal- och bildbehandlingsalgoritmer som tagits fram för att åstadkomma polarimetrisk, spektral och spektropolarimetrisk avbildning. Metoder som utvecklats på basis av klassisk polarimetrisk avbildning beskrivs, så som tid-, amplitud-, apertur- och fokalplansfilterade system (se Figur 28) samt hybrider av dessa. Dessa finns kommersiella redan idag från ett flertal olika tillverkare i olika delar av det optiska våglängdsområdet. Senare system som bygger på ögonblicksavs bildande (snapshot) metoder tas också upp, där simultan registrering av det kompletta polarisationstillståndet kan göras på endast en fokalplansmatris mha. tekniker från området Computational imaging, där specialdesignad optik och smarta beräkningsalgoritmer kan skapa potential för framtida mer kompakta och kostnadseffektiva lösningar.



Figur 28: De fyra klassiska polarimetriska avbildningsprinciperna; som mäter upp polarisationstillståndet hos sensorinfallande ljus genom att filtrera polarimetriskt i tid (A), i amplitud/energi (B), i apertur (C) samt över fokalsplansarrayen (D). (Källa: [11])

Från studien framkom att spektropolarimetrisk avbildning bör kunna ge förutsättningar för mer robust detektion av svårupptäckta målobjekt i klottriga och komplexa miljöer. Informationsinsamling, spaning och övervakning i luft-till-mark-scenarion över medel och långt distans samt förbättrad detektion av landminor, improviserade sprängladdningar (IED), kamouflage, detektion av små fartyg, förbättrad sikt i dimma eller i skuggiga eller ljusstarka miljöer nämns som tänkbara tillämpningar där denna teknik kan erbjuda utökade möjligheter.

#### 4.3.2 Polarimetrisk och spektropolarimetrisk signaturstudie

En litteraturstudie genomfördes under 2014 med syfte att bygga upp en fördjupad förståelse för den fysikaliska fenomenologin kring hur polarimetriska och spektropolarimetriska signaturer uppstår och under vilka betingelser dessa kan förmodas uppträda och bäst exploateras för elektrooptisk spaning. Studien har tidigare avrapporterats i [11] och sammanfattas även i [12].

Rapporterna från studien ger en inledande och kortfattad översikt kring hur spektrala och polarimetriska elektrooptiska signaturer uppstår, hur de förhåller sig till varandra samt ger en inblick i några möjliga tillämpningsområden, både civila och militära, där denna information kan utnyttjas passivt för att erhålla en utökad diskrimineringsförmåga. I rapporten beskrivs de grundläggande fysikaliska principerna för hur ljus skapas och sedan modifieras spektralt och polarimetriskt via olika växelverkningar med material och atmosfär innan det når en avbildande sensor. Det i synnerhet för polarimetriska signaturer så viktiga geometriska beroendet mellan ljuskälla, mål/bakgrund och sensor beskrivs också schematiskt. Ljus som emitteras eller reflekteras flackt (eller nära den s.k. Brewster-vinkeln) påverkas mer än ljus som emitteras eller faller in vinkelrätt. Eftersom polarisation är så starkt kopplat till dessa geometriska förhållanden mellan polarisationsriktningar, ytorienteringar och betraktelsevinklar är det viktigt att förstå hur polarimetriska signaturer beror av detta för att fullt ut utnyttja en polarimetriskt avbildande sensor för måldiskriminering.

Studien konstaterar att störst polarimetrisk nytta troligen återfinns inom LWIR (8-12  $\mu\text{m}$ ), pga. större skillnader i ytegenskaper mellan olika material och därmed tydligare

polarimetriska kontraster i detta våglängdsområde. Det påpekas dock att detta kan vara något applikationsberoende och nyttan för kortare våglängder bör därför inte uteslutas. MWIR (3-5  $\mu\text{m}$ ) är också intressant men kompliceras av att våglängdsområdet omfattar två olika fenomenologidomäner (den reflektiva och den emissiva), vilket försvårar analys och kalibrering och spektralfiltrering kan därför vara centralt för erhållande av god prestanda i detta spektralband.

Några specifika exempel på applikationer som bedömts som extra intressanta att gå vidare med i nya, mer experimentellt inriktade studier är polarimetriskt erhållen kontrastförbättring för bättre detektionsförmåga i termiska bilder vid s.k. thermal cross-overs (tidpunkter på dygnet då termiska kontraster är naturligt låga) samt utökad igenkännings- och identifieringsförmåga i termiska bilder (ex. ansiktsgenkänning). Polarimetri bedöms också intressant för studier kring siktförbättring (främst i VNIR och SWIR, se exempel i Figur 29) samt för detektion av kamouflage, landminor och IED:er (med spektrala jämförelser i olika optiska våglängdsband). För andra FoT-uppdrag bedöms det också som viktigt och intressant att studera skyddsfrågan i mer detalj än vad det funnits utrymme till i den aktuella studien. Eftersom kommersiella sensorsystem börjar dyka upp allt mer på marknaden bedöms hotet som högst relevant och med kunskap om den fysikaliska fenomenologin borde det finnas förutsättningar för utredningar om hur ett sådant skydd skulle kunna se ut.

Studien konstaterar slutligen också att objektiva och effektiva metoder för beräkning och validering av prestandavinster (ex. ökad räckvidd) i samband med måldiskriminering behöver utvecklas eller införskaffas, både för polarimetriska och spektrala sensorer. För simuleringar av spektrala signaturer finns idag bra verktyg medan motsvarande för polarimetri är under uppbyggnad inom annat FoT-projekt.



Figur 29: Exempel på tillämpningar för polarimetrisk avbildning. (övre) siktförbättring i VNIR-området, (mitten) ansiktsgenkänning samt (nedre) kontrastförbättring i det termiska bandet. Källa: [12]



## 4.4 Framtidsutblick

De inledande litteraturstudierna under 2012-2014 har inom projektet skapat en god kunskapsbas för den fysikaliska fenomenologin som ligger bakom uppkomsten av polarimetriska signaturer samt den sensorteknik som kan användas för exploatering av dessa. För framtiden behöver denna kunskap fördjupas genom mer applikationsnära och fältmässiga studier av såväl teoretisk som av experimentell karaktär. För genomförande av detta bedöms det som särskilt viktigt att investera i ny sensorteknik, antingen genom kommersiellt tillgängliga kanaler eller genom egen sensoruppbyggnad (själva eller genom industripartners).

Några applikationsexempel har tidigare nämnts, ex. siktförbättring i den reflektiva domänen och termisk kontrastförbättring och ansiktigenkänning/identifiering. Dessa är relativt ”enkla” tillämpningar, förmodligen lämpade som begynnande experimentstudier, men är också tillämpningar där polarimetriska sensorer skulle kunna ge en direkt operativ nytta om tekniken bedöms adekvat. Detektion av svåra mål i klottiga miljöer är ett typiskt område där polarimetriskt avbildande sensorer kan komplettera spektralt avbildande sensorer och framtida studier bör titta på hur detektionsförmåga och falsklarmsfrekvenser kan förbättras genom att kombinera dessa två sensortekniker. För militära ändamål är robusthet en ytterst kritisk egenskap och de resultat som hittills presenterats i forskningslitteraturen har inte på tillfredsställande sätt utrett detta och det rekommenderas därför att framtida studier ger detta extra stor vikt.

Slutligen bör internationella samarbeten fördjupas inom teknikområdet med utökad EDA- och NATO-samverkan.

## 4.5 Referenser

- [10] David Bergström, Lars Sjöqvist och David Gustafsson, ”Passive and active spectropolarimetric imaging for target detection - A literature review study”, FOI-D--0495--SE (2012).
- [11] Tomas Hallberg, Johan Eriksson, Christina Åkerlind och David Bergström, ”Spektrala och polarimetriska signaturer för passiva EO-sensorer - En inledande fenomenologisk översikt med exempel på några olika användningsområden”, FOI-D--0611--SE (2014).
- [12] David Bergström, ”Milstolperedovisning Studie om spektrala och polarimetriska elektrooptiska signaturer för Q3 2014 inom FoT-projektet IR-spaning AF.9220409”, FOI Memo 5068 (2014).



## 5 Slutsatser

FoT-projektet IR-spaning, som har pågått under treårsperioden 2012-2014, avslutas i och med denna slutrapport. De tre teknikområden som projektet har hanterat; mörkerförmåga, spektral avbildning och polarimetriska avbildning, bedöms alla som strategiskt viktiga för Forsvarsmaktens framtida spaningsförmåga.

Inom mörkerförmåga är det framför allt de allt känsligare digitala detektorteknikerna, som exempelvis EBCMOS, I2CMOS, EMCCD, svavelopat kisel och InGaAs, som ger potential för nya förmågor så som bildförbättringar, fusion mellan olika våglängdsband och sensormodaliteter, automatiska målinvisningsalgoritmer och förbättrad kommunikation i stridande nätverk. De digitala teknikerna ger också tillgång till nya våglängdsområden som ej varit tillgängliga innan, ett aktuellt exempel är SWIR-området där stabila ljuskällor som night glow kan ge en ökad robusthet och bättre siktegenskaper. Brusprestandan för utläsningselektroniken hos fokalplansarrayer i InGaAs begränsar dock tekniken starkt idag, men pågående teknisk utveckling kan inom några år skapa förutsättningar för tekniken ska nå sin fulla potential. De analoga bildförstärkarna kan förväntas vara fortsatt dominerande även under de kommande åren för soldatburen mörkerförmåga till förflyttning, orientering och allmän situationsuppfattning. För att de digitala lågljusteknikerna på allvar ska kunna konkurrera med denna teknik krävs ytterligare förbättringar kring upplösning, känslighet och SWaP-C.

Inom spektral avbildning är en av slutsatserna kring den tekniska utvecklingen att robust detektion av små mål inte bara kräver hög spektral upplösning utan även förmågan att upplösa objekten spatialt. Med ett litet fotavtryck på marken ökar möjligheten att mäta in målets spektrala signatur utan inverkan från bakgrunden vilket ger en bättre förmåga att undertrycka bakgrundsklotter. Med så små mål som människor krävs en spatial upplösning som är betydligt högre än vad dagen system vanligtvis levererar. Inom signal- och bildbehandling är fortsatt utveckling önskvärd mot mer robusta och automatiserade metoder. Den enorma datamängden som hyperspektrala bilder i kombination med hög bilduppdateringstakt producerar, kräver också utveckling av operativa algoritmer som klarar av såväl automatisering som reelltidsanalys. Det konstateras vidare att prestandavärderingsmetoder till stor del saknas för att kunna värdera olika sensortekniker och olika detektions- och målföljningsalgoritmer. Slutligen bör skyddsfrågan ges ökat utrymme, då hyperspektrala sensorer (framför allt i VNIR och SWIR) börjar bli allt mer tillgängliga och billigare och idag bör betraktas som ett faktiskt reellt hot, i synnerhet i konflikt mot en större främmande makt.

Inom polarimetrisk avbildning finns troligen högst potential inom det termiska IR-området, framför allt LWIR, pga. tydligare polarimetriska signaturer i detta våglängdsområde. Tekniken kan tillföra kontrastförbättringar och en ökad igenkänningsförmåga i termiska bilder. Polarimetrisk avbildning kan också komplettera spektral avbildning, då teknikerna tillför information som är delvist oberoende av varandra. En ökad robusthet genom falsklarmsreducering är tänkbar i detta hänseende. Det kan dock konstateras att polarimetrisk avbildning fortfarande är relativt outforskad och att robustheten och prestandavinsten hos tekniken fortsatt behöver utredas. Även här behöver också skyddsfrågan adresseras, även om hotet idag kanske inte är lika reellt som för spektralt avbildande sensorer.

Avslutningsvis, konstateras det att fortsatt verksamhet krävs för att säkerställa en hög kompetensnivå inom dessa viktiga teknikområden. Ett nytt FoT-projekt har därför föreslagits och antagits för den kommande treårsperioden (2015-2018). Projektet går under namnet "Avancerade spaningsmetoder" och avser fortsätta underhålla, utveckla och sprida kunskap och kompetens till Forsvarsmakten samt fördjupa nationella och internationella forskningssamarbeten inom de hanterade teknikområdena.



## Appendix A: Lista över vetenskapliga rapporter och konferensbidrag

Ingmar Renhorn, Maria Axelsson, Koen Benoist, Dirk Bourghys, Yannick Boucher, Xavier Briottet, Sergio De Ceglie, Rob Dekker, Alwin Dimmeler, Remco Dost, Ola Friman, Ingebjørg Kåsen, Jochen Maerker, Mark van Persie, Salvatore Resta, Piet Schwering, Michal Shimoni, Trym Vegard Haavardsholm, *Detection in Urban Scenario Using Combined Airborne Imaging Sensors*, Proc. SPIE 8353, Infrared Technology and Applications XXXVIII, SPIE DSS i Baltimore (USA), 2012.

Rob Dekker, Piet Schwering, Koen Benoist, Stefano Pignatti, Federico Santini, Ola Friman, *LWIR hyperspectral change detection for target acquisition and situation awareness in urban areas*, Proc. SPIE 8743, Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XIX, SPIE DSS i Baltimore (USA), 2013.

Ingmar Renhorn, Veronique Achard, Maria Axelsson, Koen Benoist, Dirk Borghys, Xavier Briottet, Rob Dekker, Alwin Dimmeler, Ola Friman, Ingebjørg Kåsen, Stefania Matteoli, Maria Lo Moro, Thomas Olsvik Opsahl, Mark van Persie, Salvatore Resta, Hendrik Schilling, Piet Schwering, Michal Shimoni, Trym Vegard Haavardsholm, Françoise Viallefont, *Hyperspectral reconnaissance in urban environment*, Proc. SPIE 8704, Infrared Technology and Applications XXXIX, SPIE DSS i Baltimore (USA), 2013.

Ingmar Renhorn, *Enhanced hyperspectral imaging for urban reconnaissance*, SPIE Newsroom, 7 maj 2013.

Thomas Svensson, *An evaluation of image quality metrics aiming to validate long term stability and the performance of NUC methods*, Proc. SPIE 8706, Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XXIV, SPIE DSS i Baltimore (USA), 2013.

Dirk Borghys, Mahamadou Idrissa, Michal Shimoni, Ola Friman, Maria Axelsson, Mikael Lundberg, Christiaan Perneel, *Fusion of multispectral and stereo information for unsupervised target detection in VHR airborne data*, Proc. SPIE. 8745, Signal Processing, Sensor Fusion, and Target Recognition XXII, SPIE DSS i Baltimore (USA), 2013.

Thomas Svensson, David Bergström, *Uncertainty analysis of sensor performance parameters in the shortwave infrared spectral range based on nightglow as the main lightsource*, Proc. SPIE 9071, Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XXV, SPIE DSS i Baltimore (USA), 2014.

Erik Ringaby, Ola Friman, Per-Erik Forssén, Thomas Opsahl, Trym Vegard Haavardsholm, and Ingebjørg Kåsen, *Anisotropic scattered data interpolation for pushbroom image rectification*, IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 23, Issue 5, pp. 2302-2314, 2014.

Thomas Svensson, *Staying ahead of an increasingly capable enemy through thermal imaging*, 9th Annual Night Vision Systems i Washington (USA), 2014.

Maria Axelsson, Ola Friman, Trym Vegard Haavardsholm, Ingmar Renhorn, *Target detection in hyperspectral imagery using forward-modeling and in-scene information*, Manuscript. Submitted for journal publication (2014).

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)