

DAVID BERGSTRÖM, DAVID GUSTAFSSON, JOHAN ERIKSSON, CARL BRÄNNLUND,
THOMAS SVENSSON, BRITTA LEVIN, DANIEL SVEDBRAND, SEBASTIAN MÖLLER,
MARIA AXELSSON, NICLAS WADSTRÖMER, HENRIK PETERSSON, LINNÉA AXELSSON,
TOMAS HALLBERG, CHRISTINA ÅKERLIND OCH ANDREAS BRORSSON

David Bergström, David Gustafsson, Johan Eriksson, Carl Brännlund, Thomas Svensson, Britta Levin, Daniel Svedbrand, Sebastian Möller, Maria Axelsson, Niclas Wadströmer, Henrik Petersson, Linnéa Axelsson, Tomas Hallberg, Christina Åkerlind och Andreas Brorsson

Avancerade Spaningssensorer 2018-2020

Slutrapport

Titel	Avancerade Spaningssensorer 2018-2020 – Slutrapport
Title	Advanced Reconnaissance Sensors 2018-2020 – Final report
Rapportnr/Report no	FOI-R--5051--SE
Månad/Month	December
Utgivningsår/Year	2020
Antal sidor/Pages	62 sidor
ISSN	1650-1942
Kund/Customer	Försvarsmakten
Forskningsområde	Sensorer och signaturanpassning
FoT-område	Sensorer och signaturanpassning
Projektnr/Project no	E72852
Godkänd av/Approved by	Christian Jönsson
Ansvarig avdelning	Ledningssystem

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

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

Sammanfattning

Denna rapport utgör slutrapport för projektet Avancerade Spaningssensorer, som under åren 2018-2020 studerat de fyra passiva elektrooptiska teknikområdena mörkerförmåga, hyperspektral avbildning, polarimetrisk avbildning samt compressive imaging. Teknikområdena har bedömts som intressanta, då de kan innebära nya och/eller förbättrade förmågor för Försvarsmakten att bedriva spaning och övervakning i framtiden. Teknikerna utgör även nya potentiella hot för våra förband, som kan innebära behov att förbättra befintlig signaturanpassning hos svenska plattformar, kamouflage och motmedel.

Sensorer för digital mörkerförmåga ger en förbättrad förmåga att verka i mörker, genom tillgång till mer avancerad sensornära så väl som användarnära signal- och bildbehandling, samt ökade möjligheter att lagra och kommunicera bildrelaterad data inom stridande nätverk. Sensorer för hyperspektral och polarimetrisk avbildning ger en förbättrad och mer robust spanings- och övervakningsförmåga, genom utökade möjligheter att särskilja målobjekt från bakgrund via klassificering av material- och ytegenskaper. Slutligen har sensorer baserade på compressive imaging potential att kunna medföra billigare och enklare sensorer, med relaxerade krav på prestanda hos optiska komponenter och detektortekniker, men på bekostnad av utökade beräkningsbehov vid bildrekonstruktion.

Nyckelord: *spaning, övervakning, elektrooptik, infraröd, Vis/NIR, SWIR, LWIR, mörkerförmåga, hyperspektral avbildning, polarimetrisk avbildning, compressed sensing, compressive imaging, maskininlärning, djupinlärning*

Summary

This report is the final report for the project Advanced Reconnaissance Sensors, which during 2018 to 2020 has studied four passive electro-optical technologies: digital night vision, hyperspectral imaging, polarimetric imaging and compressive imaging. These technologies have the potential for new and/or improved capabilities for the Swedish Armed Forces to conduct future reconnaissance and surveillance. The technologies may also present new requirements for improvement of existing signature management solutions for platforms, camouflage and countermeasures.

Digital night vision sensors will provide the Armed Forces with an improved capability to conduct nighttime operations, due to access to more advanced signal and image processing, as well as improved capabilities to store and transmit image related data within battlefield networks. Sensors for hyperspectral and polarimetric imaging will provide the Armed Forces with improved and more robust reconnaissance and surveillance capability due to target and background discrimination based on material and surface classification. Finally, sensors based on compressive imaging have the potential to result in cheaper and less complex sensors, with relaxed requirements of optical and detector performance, but at the cost of increased computing power requirements in image reconstruction.

Keywords: reconnaissance, surveillance, electro-optical, infrared, Vis/NIR, SWIR, LWIR, night vision, hyperspectral imaging, polarimetric imaging, compressed sensing, compressive imaging, machine learning, deep learning

Innehåll

1	Inledning	7
2	Slutsatser och framtidsutsikter	9
2.1	Mörkerförmåga.....	9
2.2	Hyperspektral avbildning	10
2.3	Polarimetrisk avbildning.....	11
2.4	Compressive imaging	12
3	Mörkerförmåga	13
3.1	Teknisk orientering och bakgrund	13
3.2	Bildfusion för mörkerförmåga	15
3.3	Avbrusning av bilder med djup maskininlärning	20
3.4	Mörkerförmåga i det kortvågiga IR-området (SWIR).....	22
3.5	Internationella samarbeten	25
3.6	Referenser	26
4	Hyperspektral avbildning	27
4.1	Teknisk orientering och bakgrund	27
4.2	Linjärvariabelfiltrerad kamera inom Vis/NIR-området	29
4.3	Hyperspektral interferometerbaserad LWIR-kamera	31
4.4	Algoritmer och verktyg för analys och visualisering	33
4.5	Fältförsök	36
4.6	Internationella samarbeten	41
4.7	Referenser	42
5	Polarimetrisk avbildning	43
5.1	Teknisk orientering och bakgrund	43
5.2	Polarimetrisk rekonstruktion	44
5.3	Bildfusion	47
5.4	Samarbeten	48
5.5	Referenser	50
6	Compressive imaging.....	51
6.1	Teknisk orientering och bakgrund	51
6.2	Utveckling av enpixelkameror i SWIR	52
6.3	Internationella samarbeten	59
6.4	Referenser	59
Bilaga: Rapporter, vetenskapliga artiklar och konferensbidrag samt examensarbeten.....		61

1 Inledning

Projektet Avancerade Spaningssensorer har under åren 2018-2020 studerat de passiva elektrooptiska teknikområdena mörkerförmåga, hyperspektral avbildning, polarimetrisk avbildning samt ”compressive imaging”. Teknikområdena har bedömts intressanta, då de kan innebära nya och/eller förbättrade förmågor för Försvarsmakten att bedriva spaning och övervakning i framtiden. Teknikerna utgör på samma gång nya potentiella hot för våra förband, som kan innebära behov att förbättra befintlig signaturanpassning hos våra svenska plattformar, kamouflage och motmedel. Stora forsknings- och teknikutvecklingsinsatser genomförs just nu runtom i världen inom dessa teknikområden och det är viktigt att Sverige följer denna utveckling och bygger egen kompetens för att kunna värdera teknikernas möjligheter och begränsningar. Projektet har syftat till att bygga denna kompetens genom egen sensor- och algoritmutveckling, värderingsstudier i såväl labb som ute i fält samt genom samarbeten med nationella och internationella forskningsinstitut och företag.

Denna slutrapport redogör för det projektarbete som genomförts under treårsperioden. För slutsatser och diskussion kring framtidsutsikter hos studerade teknikområden, med förslag på fortsatta studier, se kapitel *Slutsatser och framtidsutsikter*. **Error! Reference source not found.** I efterföljande kapitel ges en mer detaljerad redogörelse av resultat från respektive teknikområde. I ett appendix till rapporten finns en sammanställning av de rapporter och vetenskapliga artiklar som producerats i projektet.

Under åren har projektet arbetat med fyra centrala frågeställningar kopplade till de aktuella teknikområdena. Nedan listas dessa tillsammans med de svar projektet kommit fram till:

- 1) Vilken ökad militäroperativ nytta ger digitala bildförstärkartekniker med möjligheter till mer avancerad signalbehandling såsom bildfusion och automatisk målupptäckt och måligenkänning?
 - Digitala mörkersensorer tillför en förbättrad passiv spanings- och övervakningsförmåga i mörker, genom möjliggörande av bildförbättrande signalbehandling så som brusreducering, kantskärpning och kontrast-optimering samt mer avancerad bildbehandling för exempelvis bildfusion och assisterad eller autonom detektion och igenkänning. Digitala mörkersensorer skapar också utökade förutsättningar att kunna lagra bilddata för efteranalys och för att kunna överföra bilder eller annan bildrelaterad information i nätverk mellan stridande enheter.
- 2) Vilken information tillför spektralt och polarimetriskt avbildande elektrooptiska sensorer och vilken ökad militäroperativ och taktisk nytta ger de i förhållande till konventionella sensortekniker?
 - Spektrala EO-sensorer tillför en förbättrad passiv spanings- och övervakningsförmåga genom avancerad måldetektion och måligenkänning utifrån sin förmåga att klassificera pixlar/punkter i en bild/scen baserat på deras **kemiska sammansättning**. Förmågehöjningen bedöms allra högst för scenarier med svårupptäckta mål i klottriga bakgrundsmiljöer, där konventionella sensorer ofta kommer till korta, så som för detektion av kamouflage, halvskylda objekt (ex. IED och minor), störd jord, etc.
 - Polarimetriska EO-sensorer tillför en förbättrad passiv spanings- och övervakningsförmåga genom avancerad måldetektion och måligenkänning utifrån sin förmåga att klassificera pixlar/punkter i en bild/scen baserat på **ytegenskaper** (såsom yttopografi, ytorientering och materialtyp). Störst förmågehöjning bedöms finnas för detektion i klottriga bakgrundsmiljöer samt förbättrad igenkänning och identifiering i termiska IR-bilder. Även potential för upptäckt av kontrastsvaga mål (kamouflage, störd jord, IED, minor, osv.) har identifierats. Tekniken kan också användas för att öka sikten i UV-, VNIR-

och SWIR-området, genom att reducera inverkan av atmosfärsspridning i dessa våglängdsområden.

- 3) Hur kan den ökade nyttan med de nya teknikerna mätas och hur kan teknikerna utformas och anpassas till mänskliga operatörer och beslutsfattare för att byggas in i framtida materielsystem?
 - Ökad nytta kan mätas med teknikanpassade och ändamålsenliga värderingsmetriker och modeller. Inom många av de studerade teknikområdena är dessa dock fortfarande relativt omogna och underutvecklade och ytterligare arbete kommer att krävas för att ta fram robusta och träffsäkra värderingsmetoder. Ett viktigt komplement till detta kommer därför fortsatt vara att värdera tekniknytta genom perceptionsförsök med mänskliga användare och observatörer, i synnerhet för att kunna värdera sensorer och sensorinformation som delar i den kritiska UBBA-loopen (Upptäck/Uppfatta, Bedöm, Besluta, Agera, kallas OODA-loopen på engelska) som är så avgörande för militär framgång och överlevnad.
- 4) Hur kompletterar passiva och aktiva avbildningstekniker varandra?
 - Passiva EO-tekniker ger en förmåga att spana och övervaka på ett icke-röjande sätt, utan utsändande av egen strålning, något som kan vara kritiskt i scenarier mot kvalificerade motståndare med egen hög sensorkapacitet. Genom styrbarhet av ljus, erbjuder aktiva EO-tekniker förutsättningar för bättre och mer robusta signal-till-brus-förhållanden. Aktiva EO-tekniker kan även bidra med högre precision vid inmätning av avstånd och för rekonstruktion av tredimensionell information. Den tredimensionella informationen kan, precis som spektral och polarimetrisk information, också utnyttjas för mer avancerad måldetektion och måligenkänning än vad konventionella 2D-avbildande sensortekniker kan erbjuda.

Detta arbete har gjorts inom Försvarmaktens samlingsbeställning för forskning och teknikutveckling inom Sensorer och signaturanpassning (FoT SoS, AT.9220420). Projektledaren och medförfattare vill tacka alla som deltagit och bidragit till verksamheten och resultaten i projektet!

2 Slutsatser och framtidsutsikter

Projektet Avancerade Spaningssensorer har under 2018-2020 arbetat med fokus på fyra passiva elektro-optiska teknikområden: mörkerförmåga, hyperspektral avbildning, polarimetrisk avbildning och compressive imaging. Alla bedöms ha potential att ge Försvarsmakten en bättre förmåga att bedriva spaning och övervakning i framtiden.

För teknikområdet mörkerförmåga handlar det framför allt om att kunna bedriva bättre spaning nattetid eller under sämre ljusförhållanden, med de förmågor som digitala mörkersensortekniker tillför, jämfört med dagens dominerande analoga bildförstärkarteknik. Förväntade nya eller förbättrade förmågor är tillgång till mer avancerad signal- och bildbehandling, såväl sensornära som mer användarnära, exempelvis för avbrusning, kontrastoptimering, bildfusion och/eller automatisk detektion. Den digitala sensortekniken innebär även utökade möjligheter för lagring och kommunikation av bildrelaterad information i nätverk mellan stridande enheter.

Både hyperspektral avbildning och polarimetrisk avbildning kan tillföra ny information om det inmätta objektet som konventionella sensortekniker inte kan ge. Hyperspektral avbildning, med avbildning i många smala separata våglängdsband/färger, bidrar med en materialklassificeringsförmåga genom att utnyttja materials olika spektrala fingeravtryck. Polarimetrisk avbildning, med avbildning av polarisationsinnehållet hos mottaget ljus, bidrar med information om ytegenskaper hos objekt, exempelvis skrovlighet och ytorientering. Både hyperspektral och polarimetrisk avbildning kan användas för att öka prestanda och robusthet vid diskriminering av målobjekt mot bakgrund. Eftersom avbildningsteknikerna bidrar med information som i hög grad är okorrelerade med varandra, är det sannolikt att en kombination av båda (s.k. spektropolarimetrisk avbildning) ytterligare skulle vässa denna förmåga.

Teknikområdet Compressive imaging är fortfarande ett relativt ungt och outforskat område, men har potential att reducera krav på hårdvara för insamling, lagring och kommunikation och förväntas ge störst nytta i tillämpningar där informationsinnehållet är glest (uppvisar stor redundans) och där konventionella tekniker är avskräckande dyra och/eller svårhanterliga.

Mer detaljerade slutsatser för respektive teknikområden redovisas nedan tillsammans med förslag på inriktningar för framtida forskning inom dessa.

2.1 Mörkerförmåga

Dagens mörkerförmåga hos Försvarsmakten bygger på en kombination av bredare användning av bildförstärkare på individnivå samt termiska IR-system på grupp- och plattformsnivå. Den analoga bildförstärkartekniken har genom sin mognadsgrad uppnått mycket höga prestanda i ett synnerligen kompakt och lätthanterligt format, men dess fortsatta utvecklingspotential är begränsad och framtidens mörkerförmåga förväntas bli mer digital. Digitala mörkersensorer förväntas ge förbättrade förmågor genom tillgång till mer avancerad signal- och bildbehandling. Detta skapar förutsättningar för såväl bildkvalitetsförbättrande avbrusning, uppskärpning och kontrastoptimering som förbättrad situationsuppfattning och måldiskrimineringsförmåga, exempelvis genom bildfusion och maskininlärning. Digitaliseringen möjliggör också lagring och kommunikation av bildrelaterad information, för efteranalys och avrapportering av uppdrag och för förbättrad lägesbild inom grupp eller mot ledningssystem.

Flera olika teknikutvecklingsspår är intressanta i denna digitalisering, från brusreducering av vanlig CMOS-teknik, som snart utlovar fotonräkning, till olika pixelexterna och pixelinterna förstärkningsprinciper så som elektronbombarderande och elektronmultipliserande detektortekniker och SPAD (single photon avalanche photodiode). Intressant är också framväxten av helt nya detektormaterial så som grafen och kvantpunkts-

teknik, men dessa bedöms inte kunna konkurrera med de mer konventionella detektormaterialen inom åtminstone de närmsta 5-10 åren. Fortsatt teknikutveckling krävs för att teknikerna på bredare front ska kunna ersätta dagens bildförstärkare, särskilt för avsuttna soldaters förflyttning, orientering och bekämpning på kortare avstånd, där dagens tillgängliga teknik inte uppfyller samtidiga krav på breda och högupplösta synfält i ett lättburet och uthålligt format. För andra tillämpningar där dessa krav inte är fullt lika kritiska, exempelvis i krypskyttesikten eller i plattformsmonterade sensorer, kan teknikfördelarna i form av förbättrad signal- och bildbehandling och informationslogistik göra teknikövergången mer mogen och redo.

Våglängdsområdet SWIR kommer sannolikt att utgöra ett viktigt komplement för framtidens mörkerförmåga, främst för månlösa nattförhållanden som är och kommer förbli utmanande för konventionell bildförstärkarteknik och för andra sensorer som verkar i Vis/NIR-området. En fördel med SWIR kontra termisk IR är att bilderna påminner om visuella och är mer lättolkade för oss människor. För effektivt utnyttjande av nattglöd kan InGaAs-tekniken idag (2020) kräva viss termoelektrisk kylning för användning av högupplösta pixelmatriser med mindre pixelstorlekar. Ytterligare förbättrad brusprestanda kan dock skapa förutsättningar för framtida okyld (eller åtminstone temperaturstabiliserad) passiv mörkerförmåga i våglängdsområdet. Intressant är också utvecklingen av s.k. utökad SWIR, med känslighet upp till 2.5 μm , som erbjuder en samtidig kombinerad avbildning av både reflekterad och emitterad strålning i en och samma sensor samt möjligheten att detektera termisk strålning genom exempelvis vanligt fönsterglas (något som ej är möjligt i det termiska IR-området).

Vi föreslår fortsatt forskning inom området för att bevaka den snabba tekniska utvecklingen och för att värdera den ökade nytta som de kommande digitala mörker-sensorerna erbjuder. Vidare arbete inom bildfusion rekommenderas, med två eller flera våglängdsband (däribland SWIR), särskilt kring visualisering av multispektral information för ökad prestanda och robusthet för måldetektion, måligenkänning och situations-uppfattning. Intressant är även fortsatta studier kring hur kraftfull digital signalbehandling på pixelnivå, både med mer konventionella metoder samt med metoder från djup maskininlärning, kan nyttjas för förbättring av bildkvalitet i mörkersensorer som del av indata för både manuell (mänsklig) måldiskriminering så som för mer autonom (AI-styrd) sådan.

2.2 Hyperspektral avbildning

Inom hyperspektral avbildning har de filterbaserade teknikerna för våglängdsuppdelening inom framför allt det visuella och nära infraröda våglängdsområdet (Vis/NIR) på kort tid uppnått en hög mognadsgrad. De nya filterbaserade hyperspektrala sensorerna har hög spatial upplösning, är mindre, kompaktare och (potentiellt) billigare. Speciellt den höga spatiala upplösningen har öppnat upp för tillämpningar som tidigare begränsades av sensorernas upplösning, då mål med betydligt mindre storlek kan upptäckas. Med filterbaserade tekniker har systemkomplexiteten flyttats från hårdvara till programvara – algoritmerna bidrar här med att sammanfoga information från uppsättningar av mätningar till en rekonstruerad hyperspektral kub. Rekonstruktionsalgoritmernas prestanda beror dels på sensorrörelse och dels på innehållet i scenen, vilket avgör vilka tillämpningar som de kommer att kunna användas till. Utmanande situationer är fortfarande godtycklig rörelse över en scen med stora höjdvariationer, så som spaning från UAV och scener innehållande rörelse. Storlek, vikt, pris och prestanda möjliggör övervakning från luft med UAV på bredare front samtidigt som det finns vissa algoritmiska begränsningar. Den tekniska utvecklingen kan leda till nya förmågor både för Försvarsmakten och för potentiella motståndare. Våglängdsområdena Vis/NIR och SWIR innehåller spektral information som kan användas för att särskilja tillverkade artefakter i en naturmiljö så som skog eller fält. Av speciellt intresse är förmågan att upptäcka kamouflagetextiler som är svårupptäckta inom det visuella området men kan innehålla särskiljande spektral information i när-IR och SWIR.

Datadrivna maskininlärningsmetoder har även fått stor påverkan för måldetektion och målklassificering i hyperspektrala data. Nya maskininlärningsansatser för detektion av

anomalier i spektraldata ger lovande resultat samtidigt som nya forskningsresultat presenteras i snabb takt. Detektion av anomalier enbart baserade på spektrala signaturer och den högre spatiala upplösningen hos nyare sensorer möjliggör detektion av relativt små mål eller detektion på större avstånd. Maskininlärningsbaserade ansatser har också visat sig framgångsrika för anomalidetektion inom olika våglängdsområden från det visuella våglängdsområdet till det långvågiga IR-området.

Fusion av spektralinformation underlättar visuell måldetektion, målklassificering och situationsuppfattning. En informativ visualisering av data är avgörande för bedömning och analys av data även av en tränad operatör. Datadrivna maskininlärningsmetoder används för att visuellt framhäva information i spektraldata och underlätta visuell analys.

Vi föreslår vidare forskning inom compressed sensing för hyperspektrala sensorer. Denna teknik gör det möjligt att fånga hyperspektrala data med ett fåtal fokalplansbilder. Compressed sensing minskar insamlingstiden och gör sensorn mindre känslig för rörelse i scenen under insamling. Compressed sensing gör också att den spatiala och spektrala upplösningen kan ökas, vilket är speciellt värdefullt inom våglängdsområden där högupplösliga sensorer är kostsamma.

Vi föreslår också vidareutveckling av maskininlärningsbaserade metoder för måldetektion och målklassificering. Det finns goda förhoppningar att förbättra metoder för anomalidetektion och metoder för detektion av mål med kända spektrala signaturer. Fokus bör vara på små mål, ned till en pixel i storlek eller mindre. Både insamling och analys av data bör ingå i ett framtida projekt.

2.3 Polarimetrisk avbildning

Polarimetrisk avbildning är ett i dagsläget relativt outnyttjat teknikområde. Frånsett vissa rymdbaserade tillämpningar förekommer bildalstrande tekniker som utnyttjar information om grad av polarisation och polarisationsriktning bara i mycket begränsad omfattning. Även om principerna för polarimetrisk bildanalys har varit kända länge, är det först på senare år som sensortillverkare kommit att satsa mer på sensortekniska lösningar med potential för praktisk användning. Många sensorsystem har varit relativt komplicerade och dyra då de byggt på skannande teknik (i rum eller tid) eller flera samverkande kameror. Ett stort framsteg på senare tid är möjligheten till momentan avbildning av både konventionell och polarimetrisk sceninformation med kompakta sensorer tack vare filtrering på pixelnivå. Sensorer för det visuella området finns kommersiellt tillgängliga medan termiska sensorer fortfarande är i utvecklingsstadiet. Pixelbaserade filter tillåter avbildning oavsett rörelser i scenen eller hos sensorn. Tekniken innebär dock en undersampling av scenen vilket kan ge upphov till vissa artefakter. I projektet har därför arbete ägnats åt bildrekonstruktion, dvs metoder för att återskapa den bästa representationen av scenen givet att samplingen inte är fullständig. Studier har även gjorts på presentation och bildfusion för olika syften. Det är känt att bildförbättrande metoder i konventionella sensorer har stor inverkan på hur effektivt en mänsklig observatör kan ta till sig informationen. Fusion mellan polarimetrisk och konventionell sceninformation bör utnyttja det faktum att de olika domänerna kan vara oberoende av varandra.

Inom projektet har studier bedrivits med polarimetriska sensorer inom det visuella bandet samt i termiska långvågs-IR (LWIR). Potentiella tillämpningsområden som identifierats rör dels igenkänning och detektion i klottriga miljöer. För dessa tillämpningar är det främst kontraster i graden av polarisation som utnyttjas. Polarimetri har även visat ge vissa fördelar i scener med låg kontrast mellan mål och omgivning, där konventionella sensorer inte kan särskilja mål från bakgrund. I dessa fall har det visats att polarisationsriktningen ofta är en bra diskriminator, då den ger möjlighet att koppla ihop signaler i flera bildpunkter till ett mål.

Vi föreslår fortsatt forskning inom en rad områden som främst rör sensornära dataanalys och kalibrering. En målsättning skulle kunna vara att ta fram och prova ut ett system för insamling av polarimetrisk signaturdata. Genom tillgång till kalibrerad data kan samverkan

med de polarisationsstudier som pågår inom signaturmodellering stärkas. Det finns en möjlighet att den ökade spridningen av polarisationskänsliga sensorer kommer leda till en explosion av tillämpningar och det aktualiserar behovet av att ha förmåga att skatta sin egen och andras polarimetriska signatur. Vidare föreslås en fortsatt satsning på studier av olika metoder för presentation mot operatör. Ett sätt att kvantifiera effekten av polarimetrisk känslighet är perceptionsförsök. För en rättvis jämförelse krävs dock att data kan presenteras på ett så bra sätt som möjligt. Även värdet av olika automatiska metoder för detektion bör utredas. Slutligen föreslås att de siktförbättrande egenskaperna som polarimetrisk filtrering kan ge också studeras och kvantifieras. För ändamålet finns ett sensorsystem framtaget inom projektet som kan modifieras och nyttjas för avbildning av statiska scener i våglängdsområdet mellan UV-LWIR.

2.4 Compressive imaging

Compressive Sensing och Compressive Imaging är båda spännande och relativt unga (ca 20 år gamla) teknikområden i gränslandet mellan sensorteknik, signalbehandling och matematik. Teknikerna använder nya smarta mätstrategier och signalrekonstruktionsmetoder, för att estimerar högupplösta data från ett fåtal mätpunkter genom att utnyttja redundansen hos insignalen (s.k. informationsgleshet). Den huvudsakliga mätstrategin går ut på att modulera insignal (infallande ljus) på ett känt och vanligtvis slumpmässigt sätt och sedan efter mätning rekonstruera denna med lämpligt avpassade algoritmer. Teknikerna har potential att reducera krav på sensorkomponenter (dvs. minska kostnader), energiåtgång samt lagringskapacitet och kommunikationslänkar, genom att mäta en komprimerad men för uppgiften fullvärdig representation på ett mer effektivt sätt än konventionella tekniker.

Projektet har byggt flera egna mätsystem för studier inom området, alla baserade på ett koncept för en enpixelkamera i SWIR. Systemen har testats både för bredbandig och multispektral avbildning, med lovande resultat, särskilt för scener och tillämpningar med gles information innehåll. Resultat från experiment på detektion och lokalisering av korta ljuspulser visar att systemet med ett fåtal mätningar både kan upptäcka och lokalisera dessa med en hög sannolikhet.

De största nackdelarna hos tekniken idag är dels den sämre bildkvaliteten och dels den lägre bildtakten, i förhållande till vad konventionella avbildningstekniker kan erbjuda. För scener med stor temporal och spatial variation samt för tillämpningar och uppgifter där den allra högsta bildkvaliteten är avgörande, har tekniken svårt att konkurrera. Fortsatt optimering av komponenter i avbildningskedjan, så som mer effektiva mätmatriser, förbättrade optiska och elektro-optiska komponenter (linser, filter och detektorer), snabbare och mer högupplösta matriser för pixelurval (DMD-matriser), bättre rekonstruktionsalgoritmer (exempelvis med stöd av maskininlärning) och förbättrad hårdvara för rekonstruktion, skapar potential för ytterligare prestandaförbättringar.

Även om högupplösta SWIR-system baserade på Compressive Imaging fortfarande kan tas fram till en lägre kostnad än motsvarande pixelmatrisbaserade system, är det inte lika troligt att denna konkurrensfördel kommer att vara för evigt. Den starka pågående teknikutvecklingen inom SWIR-området just nu, med flera stora aktörer involverade och med nya detektionsmaterial runt hörnet, gör det troligt att kostnader för pixelmatriser i SWIR kommer reduceras väsentligt under de närmaste 5-10 åren. Inom andra mer exotiska våglängdsområden, som LWIR eller Terahertz-området (millimetervågor), kan situationen vara annorlunda.

Ett område med stor potential för tekniken bedöms vara multidimensionell avbildning, så som tredimensionell, hyperspektral och polarimetrisk avbildning samt kombinationer av dessa, där gleshet kan uppträda i fler dimensioner och där befintliga systemlösningar ofta kan vara extremt dyra, klumpiga och långsamma. Projektet har snuddat vid detta under perioden (multispektral avbildning i Vis/NIR och SWIR) och föreslår fortsatta fördjupade studier mot detta i framtiden.

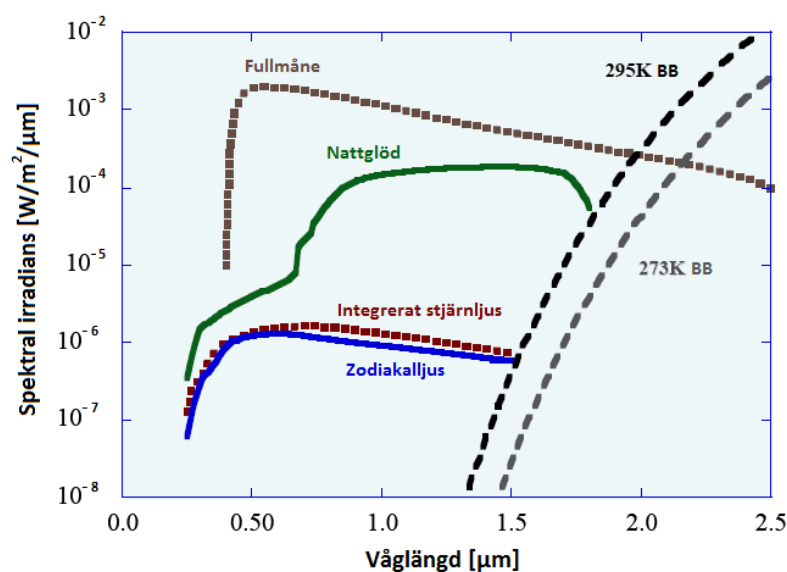
3 Mörkerförmåga

Arbetet inom teknikområdet mörkerförmåga har under perioden varit inriktat mot digitala mörkersensorer, speciellt bildfusionerad mörkerförmåga och SWIR-området. De två fokusområdena har varit nära kopplade till två Nato-samarbeten som projektet deltagit i under perioden (SET-217 och SET-246). Förutom dessa fokusområden har en mindre studie även bedrivits om hur AI-baserade djupa maskininlärningsmetoder skulle kunna användas för avbrusning av bilder från mörkerkameror. Innan projektarbetet presenteras följer dock först en kort orientering och bakgrund om teknikområdet.

3.1 Teknisk orientering och bakgrund

Modern krigföring ställer höga krav på att kunna verka dygnet runt, oavsett väder-, sikt- och ljusförhållanden. Mörker har historiskt ofta nyttjats i offensiva militära operationer i syfte att erhålla en taktisk fördel, genom att mörkret förstärker överraskningsmomentet och har en demoraliserande effekt på motståndaren. Det finns ett uttalat behov hos Försvarsmakten att kunna strida 24 timmar om dygnet, med en och samma stridsteknik. En stor del av Försvarsmaktens nationella verksamhet genomförs i mörker och ca en fjärdedel av de strider som svenska styrkor genomförde i Afghanistan var 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, under såväl dagtid som nattetid. [1]

En grundförutsättning för att uppnå (passiv) mörkerförmåga är att utnyttja det ljus som finns tillgängligt. Figur 1 visar de dominerande naturliga ljuskällorna nattetid i det visuella och nära infraröda våglängdsområdet (Vis/NIR: ca 0.4-1 μm) samt i det kortvågiga IR-området (SWIR: ca 1-2.5 μm). Månsken utgör vanligtvis den starkaste ljuskällan så länge den finns tillgänglig på natthimlen och inte är skyld av moln. Vid avsaknad av månsken är nattglöd (*eng. night glow*) starkt bidragande, särskilt i SWIR-området där det strålar extra kraftfullt. Nattglöd är ett ljusfenomen som uppstår i övre delen av atmosfären på ca 100 km höjd och är resultatet av flera olika fotokemiska processer samt luminiscens från kosmisk strålning. Ljuskällan är utspridd över hela natthimlen och skapar därmed inga skuggor från objekt på marken, så som månsken gör. Även ljus från stjärnor och solljus reflekterat i interplanetärt stoft (s.k. zodiakalljus) ger mindre tillskott. Utöver dessa naturliga ljuskällor finns förstås även en stor mängd artificiellt ljus från gatlyktor, skyltbelysning, strålkastare, mm. som bidrar med ljus framför allt i eller nära urbana miljöer. I stridsmiljön kan också heta motorutblås från fordon, mynningsflammar och laserkällor från avståndsmätare och sikten medverka i ljusbilden. Vid våglängder över ca 2 μm börjar den termiska strålningen från objekt, terräng och himmel ta överhanden och dominerar sedan helt i det termiska IR-området (MWIR: ca 3-5 μm och LWIR: 8-14 μm). [2]



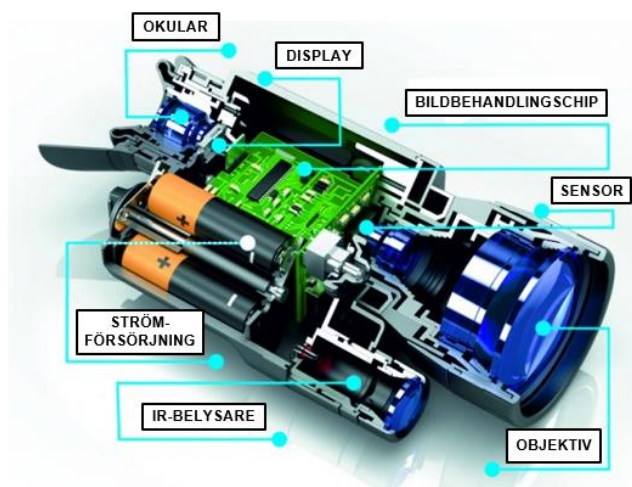
Figur 1. Spektralinhålllet hos en natthimmel består av bidrag från en rad olika ljuskällor, där de mest signifikanta upp till ca 1.5 μm är månne, nattglöd, integrerat stjärnljus och zodiakalljus. Över ca 2 μm börjar termisk strålning att dominera. [2]

Dagens mörkerförmåga hos Försvarsmakten baseras på en kombination av bredare användning av bildförstärkare på individnivå samt termiska IR-system på grupp- eller plattformsnivå. Bildförstärkare är vanligtvis verksamma i Vis/NIR-området och är utformade som huvud-, hjälm- eller vapenmonterade NVG (night vision goggles), ofta binokulära för förare och piloter och monokulära för avsatta soldater. Termiska IR-system, verkandes antingen i MWIR- eller i LWIR-området, kan exempelvis utgöras av vapensikten på automatkarbiner och stridsfordon, handhållna eller fastmonterade observationskikare på fordon och fartyg eller gimbal- eller kapselintegrerade kameror på helikoptrar och flygplan.

Bildförstärkartekniken har utvecklats kontinuerligt alltsedan andra världskriget och erbjuder idag en hög mognadsgrad, prestanda och robusthet, till en låg kostnad och vikt i ett synnerligen kompakt format. Denna till synes oslagbara kombination till trots, är det en analog teknik vars fortsatta utvecklingspotential har begränsningar. Digitala mörkersensortekniker ger möjligheter att automatiskt bearbeta information, både mer sensornära genom avbrusning, kontrastförbättring och andra bildkvalitetsförbättrande åtgärder samt mer användarnära som automatisk detektion/igenkänning och bildfusion. Digitala mörkersensorer skapar också förutsättningar att kunna lagra bilddata för efteranalys och för överföring av bilder eller bildrelaterad information vid kommunikation i nätverk.

Figur 2 visar konceptuell uppbyggnad av en digital mörkersensor, med objektivlins, pixelmatriksbaserad sensorenhet, bildbehandlingschip, display och okular som grundkomponenter. Konceptet gäller i detta fall en kompakt handhållen, vapen- eller huvudmonterad mörkersensor, men skulle väsentligen kunna bestå av samma om än kanske kraftfullare delkomponenter i en större sensorplattform så som ett stridsvagnssikte eller en övervakningskamera på en UAV. För framtidens digitala mörkersensor är det ett flertal olika tekniker som konkurrerar om uppmärksamheten, allt från billigare och mer konventionella kiselbaserade CMOS-tekniker, med eller utan olika elektronförstärkningstekniker (som i EMCCD, EBCMOS, SPAD, osv.), till andra något dyrare detektormaterial som indium gallium arsenid (InGaAs) eller mer exotiska så som grafen och kvantpunkter. Även om det inte är fråga om någon teknologisk revolution ännu, har övergången till digital mörkerförmåga redan påbörjats. I USA pågår ett flertal olika projekt inom armén och på flygsidan (exempelvis Integrated Visual Augmentation System) och resten av världen lär följa efter. Vissa prestandaförbättringar krävs dock för att tekniken helt ska kunna ersätta dagens bildförstärkarteknik, främst i termer av upplösning, känslighet, kostnad, storlek, vikt

och effektkrav, men för många andra tillämpningar där de digitala fördelarna väger över kan övergången redan genomföras. [3]



Figur 2. Grundkomponenter i ett koncept för en digital mörkersensor. [3]

3.2 Bildfusion för mörkerförmåga

Bildfusion syftar till att kombinera bildinformation från två eller flera avbildande sensorer till en sammansatt bild med ett högre och säkrare informationsinnehåll, där styrkorna hos respektive sensor tas tillvara och där ingen kritisk information går förlorad. Bildfusion utgör på detta sätt en delmängd av området sensorfusion, som även inkluderar fusion av andra sensordata än bilder, exempelvis positions- eller avståndsdata.

Bildfusion delas ofta upp i kategorierna pixelbaserad, särdragsbaserad och beslutsbaserad bildfusion¹, där skillnaden utgörs av förädlingsnivån hos bildinformationen som fusioneras. Vid pixelbaserad fusion sker fusion av rådata på pixelnivå, där pixelvärden från respektive sensor kombineras på olika sätt, allt från enklare matematiska ansatser så som addition, subtraktion och multiplikation till mer komplexa som exempelvis korsbilaterala filter eller med hjälp av vågelement (*eng.* wavelets). Vid särdragsbaserad fusion sker en fusion av extraherade särdrag från respektive bild, så som kanter, texturer eller hela objekt. Särdragen kan vara extraherade med en rad olika metoder av varierande komplexitet, alltifrån enklare tröskling till mer avancerade principer med hjälp av maskininlärning. Vid beslutsbaserad fusion integreras bildinformation på en ännu högre abstraktionsnivå, ofta genom symboliska bildrepresentationer och uppsatta beslutsregler.

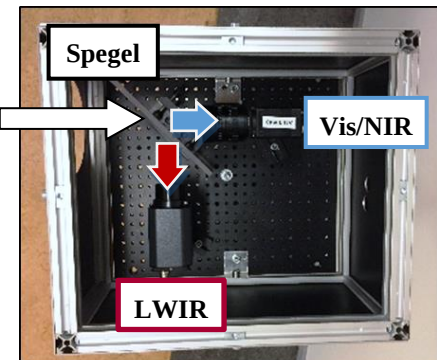
3.2.1 Fusionsdemonstrator i Vis/NIR och LWIR

I projektet har en försöksuppställning byggts upp för studier och demonstrationer av bildfusion för förbättrad mörkerförmåga. Uppställningen består av två kameror: en mörkerkamera i Vis/NIR-området och en termisk IR-kamera i LWIR-området. Huvudmotivet bakom valet av våglängdsområden har varit att kombinera den högre igenkännings- och identifieringsförmågan hos Vis/NIR med den mer robusta och dagsljusoberoende detektionsförmågan hos LWIR.

Mörkerkameran utgörs av en elektronbombarderande CMOS-kamera (EBCMOS), med känslighet i våglängdsområdet 400 - 900 nm. Kameran, EBNocturn, är tillverkad av franska

¹ Ibland talar man även om signalbaserad fusion (fusion av signaler innan A/D-omvandling) och blockbaserad fusion (fusion av delar av bilder).

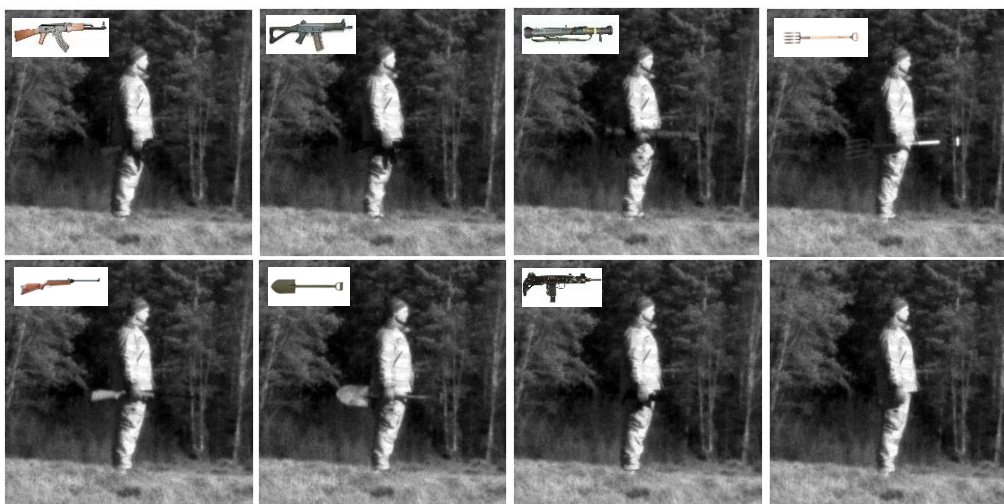
Photonis (erkänd tillverkare av analoga bildförstärkare) och består av en fotokatod som är högspänningskopplad mot en CMOS-pixelmatris med 1280 x 1024 pixlar. Konverterade fotoelektroner från katoden accelereras genom ett högspänningsfält och åstadkommer ca 200-300 ggr förstärkning av infallande ljus genom att frigöra överskottsenergi i kiselmaterial. Den termiska IR-kameran i uppställningen, A65, utgörs av en okylad mikrobolometerkamera med 640 x 480 pixlar och en bred spektralkänslighet mellan 8 och 14 μm . I uppställningen är de två kamerorna monterade på en bottenplatta med en dikroisk spegel som spektralt separerar inkommande ljus i en transmitterad Vis/NIR-komponent och en reflekterad LWIR-komponent, se Figur 3. Den dikroiska spegeln är gjord i konventionellt borsilikatglas med ett multilagerskikt i elektriskt ledande (och därmed termiskt reflekterande) indiumtennoxid som främre ytbeläggning. På baksidan av spegeln finns även ett dielektriskt antireflexfilter för att minska eventuella interna ljusreflektioner (s.k. spökbilder). Systemet är inmonterat i en svartmålad låda för ytterligare reducering av ströljus. Fördelen med detta arrangemang är att de två kamerorna får en gemensam siktlinje, utan de parallaxproblem som följer med att ha kamerorna monterade bredvid varandra med separata siktlinjer.

		
Kamera	EBNocturn	A65
Spektralband	Vis/NIR	LWIR
Upplösning	1280 x 1024	640 x 512
Pixelstorlek	9.7 μm	17 μm
Bildtakt	30 Hz	30 Hz
Optik	25 mm F/0.95	25 mm F/1.25
FOV	27.9° x 22.5°	24.6° x 19.8°
IFOV	0.39 mrad	0.68 mrad
Storlek	34x37x55 mm	106x40x43 mm
Vikt	160 g	200 g
Effekt	< 2.5 W	< 3.5 W

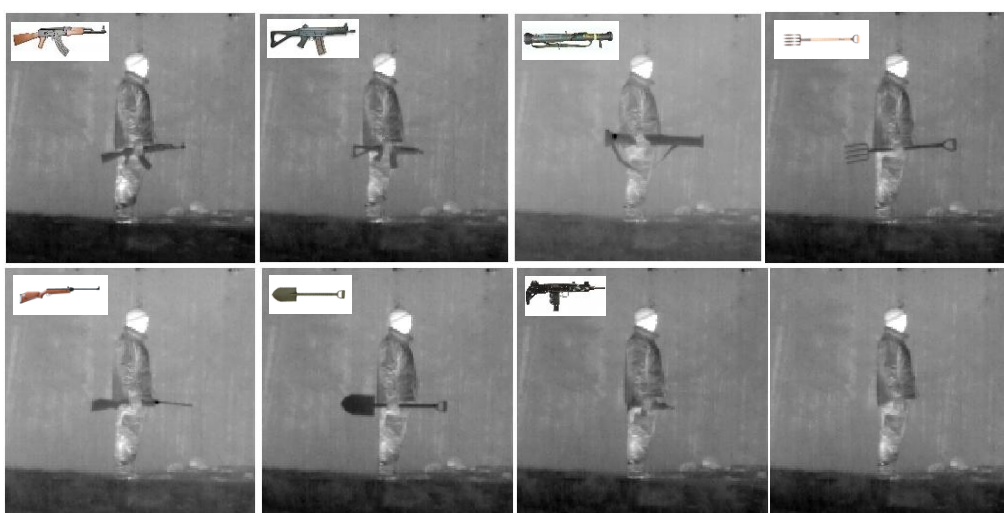
Figur 3. I det fusionssystem som tagits fram i projektet används en dikroisk spegel för spektral uppdelning av infallande ljus till de två kamerorna i Vis/NIR respektive LWIR (vänster bild). Detta ger fusionssystemet en gemensam siktlinje för båda spektralbanden. Kamerornas specifikationer kan ses i tabellen till höger.

3.2.2 Försök kring klassificering av handhållna objekt i fusionerade bilder

Under vintern 2019 genomfördes ett räckviddsförsök i mörker där fusionsuppställningen användes i en klassificeringsuppgift som bestod i att försöka avgöra vilket objekt en person hade i sina händer. Försöket genomfördes i en småbruten skogsterräng i Kvarn utanför Linköping, under en klar natthimmel med fullmåne (ca 100-130 mlux belysning). Avstånden anpassades efter aktuell optik och varierades mellan 25 och 200 meter för att erhålla olika svårighetsgrader. Totalt förekom åtta olika fall, fyra militära vapen (AK47, SG552, pansarskott och k-pist), ett civilt jaktgevär, en grep, en spade samt ett fall där personen var helt tomhänt. Figur 4 och Figur 5 visar bildexempel från respektive kamera på ett kortare avstånd.



Figur 4. Bildexempel i Vis/NIR på det kortaste avståndet (25 m).

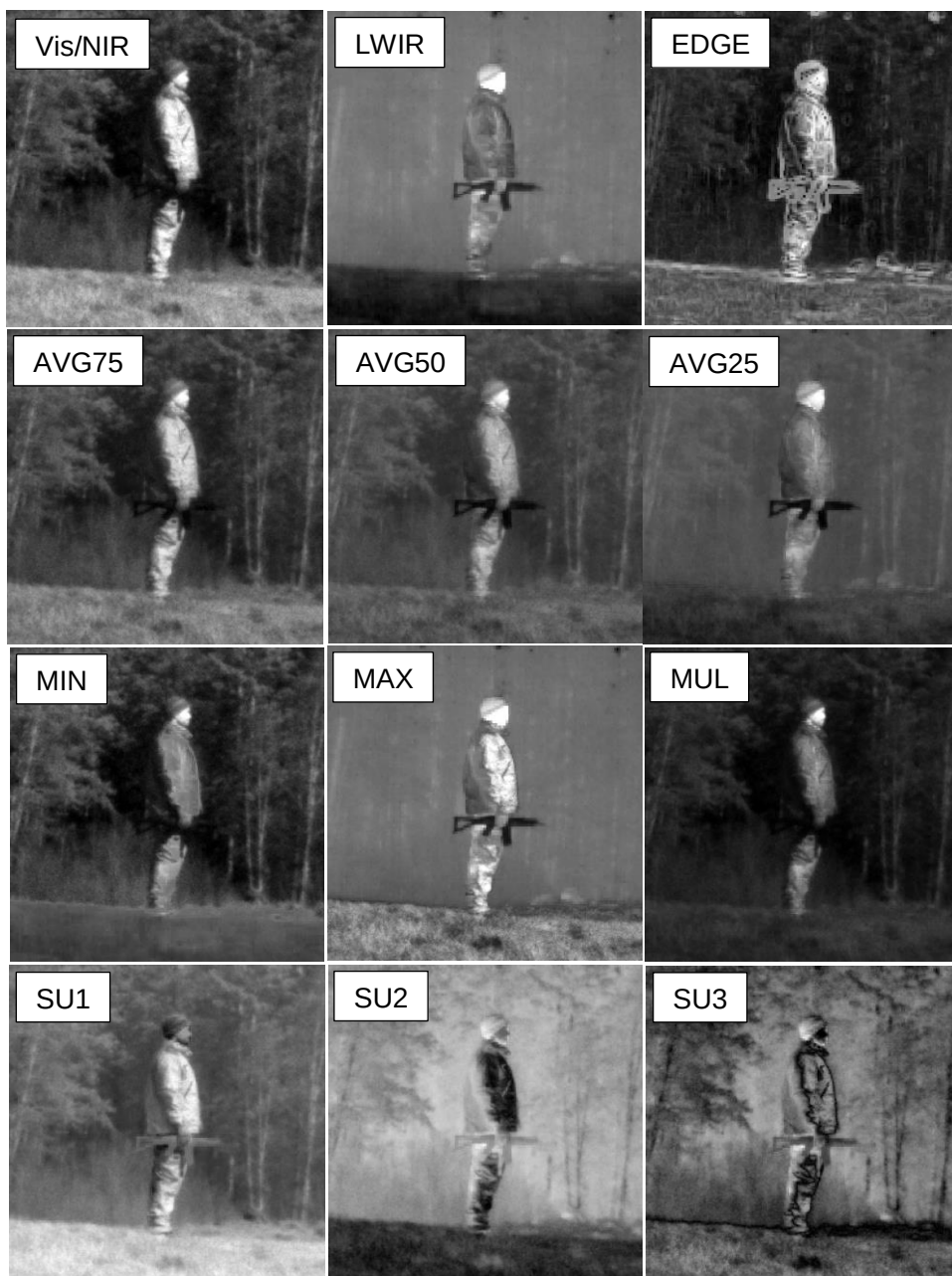


Figur 5. Bildexempel i LWIR på det kortaste avståndet (25 m).

Insamlade bilder från respektive kamera passades därefter mot varandra, både spatialt (pixel-till-pixel) och temporalt (tidpunkt-till-tidpunkt), vilket utgör en grundförättning för en lyckad pixelbaserad fusion. Tack vare fusionssystemets gemensamma siktlinje är spatial bildpassning mycket enkel. Efter geometrisk kalibrering av systemet mot en referens, med särdragspunkter synliga i båda våglängdsbanden (exempelvis med hjälp av en schack-tavla med ruttmönster), är kamerorna ensade mot varandra över alla avstånd i scenen med pixelprecision.

Bilderna fusionerades sedan med totalt tio olika fusionsalgoritmer. Algoritmerna är alla relativt enkla beräkningsmässigt och körbara i realtid utan tillgång till någon specialiserad hårdvara. Tre olika metoder med viktade medelvärden användes, benämnda AVG75, AVG50 och AVG25, där pixelvärden från respektive spektralband summerades ihop med olika vikter (AVG50 innebär exempelvis att 50% av fusionerat pixelvärde erhålls från Vis/NIR och resterande 50% från LWIR). Tre olika subtraktionsmetoder användes, där SU1 är Vis/NIR minus LWIR, SU2 är LWIR minus Vis/NIR och SU3 är absolutbeloppet av skillnaden mellan de två spektralbanden. Minimum (MIN) och maximum (MAX) innebär algoritmer där fusionerat pixelvärde är minsta respektive högsta pixelvärdet från de två spektralbanden. Multiplikation (MUL) innebär en enkel multiplikation av pixelvärden från respektive kanal. Studien omfattade slutligen även en särdragsbaserad fusionsmetod (här

benämnd EDGE), där kanter detekterade och extraherade från LWIR överlagrades på bilden i Vis/NIR. Figur 6 visar bildexempel från de ursprungliga spektralbanden samt från de tio fusionsalgoritmerna.



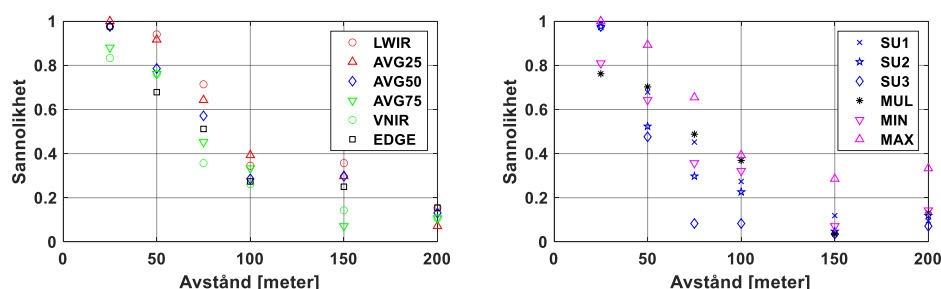
Figur 6. Jämförelse av bilder från Vis/NIR och LWIR samt de tio olika fusionsalgoritmerna.

Ett perceptionstest har därefter genomförts på det fusionerade bildmaterialet. Testet utfördes på FOI i Linköping under 2019-2020, med totalt 12 försöksdeltagare. Försöksdeltagarna var en blandning av studenter från Linköpings Universitet och nyanställda vid FOI, med relativt ringa vana både vad gäller att titta på bilder från aktuella sensortyper och med de aktuella vapnen/objekten. Könsuppdelningen var 50/50 och medelåldern ca 24 år. Innan testen fick deltagarna samma introduktion och träning inför den aktuella uppgiften. För att underlätta klassificeringsuppgiften trimmades bilderna ned till kvadratiska bildområden som var inzoomade över personen och de handhållna objekten för alla avstånden (se Figur 7).

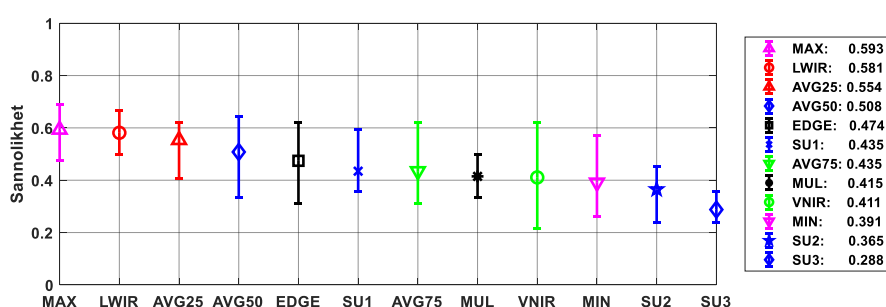


Figur 7. Perceptionstesten utfördes på en PC genom att visa fusionerad bild tillsammans med åtta objektalternativ. Tiden till svar uppmättes och försöksdeltagaren fick även ange konfidensen i sina svar.

De viktigaste resultaten av försöken visas i Figur 8 och Figur 9. Figur 8 visar uppmätt sannolikhet för korrekt objektklassificering för de sex olika avstånden, medan Figur 9 visar medelvärde och spridning av sannolikheten över alla avstånd.



Figur 8. Sannolikhet för korrekt objektklassificering som funktion av avstånd, för de ursprungliga spektralbanden (Vis/NIR och LWIR) samt de tio olika fusionsalgoritmerna.



Figur 9. Sannolikhet (medelvärde och spridning) för korrekt objektklassificering över samtliga avstånd. Fusionsalgoritmerna och spektralbanden är rangordnade från bäst till sämst från vänster till höger.

Resultaten visar tydligt hur LWIR som spektralband konsekvent presterade bättre än Vis/NIR i den aktuella uppgiften, trots att använd FLIR-kamera hade en nästan 50% sämre upplösningsförmåga. Anledningen till detta är den bättre kontrasten i LWIR för det använda scenariot, något som är tydligt i bildexemplen i Figur 4 och Figur 5. Resultaten visar också att de olika fusionsalgoritmerna ger varierande prestanda, men att de allra flesta placerar sig någonstans emellan LWIR och Vis/NIR. Den bästa fusionsalgoritmen för uppgiften visade

sig vara MAX, som fungerade väl då de flesta objekten var mörka i båda spektralbanden (lågreflekterande i Vis/NIR respektive kalla och lågemitterande i LWIR) och då den ljusa bakgrunden i LWIR var relativt klotterfri. En positiv sidoeffekt hos algoritmen är också att den bevarar den ljusare och tydligare texturen hos markvegetationen i Vis/NIR-bandet, se bildexempel i Figur 6. De sämsta fusionsalgoritmerna för uppgiften visade sig vara de två subtraktionsmetoderna SU2 och SU3, som tenderar att reducera kontrast över de mörka objekten och som överlag ger bilder med ett lite onaturligt och konstlat utseende. För den aktuella klassificeringsuppgiften, med den aktuella mål/bakgrundskontrasten, är det tveksamt om fusion faktiskt tillförde något mervärde i detta fall (kanske hade LWIR-kanalen varit tillräcklig). Det är dock viktigt att framhålla att resultaten är starkt beroende av aktuellt scenario och att resultaten sannolikt blivit annorlunda mot en annan bakgrund (eller vid en annan tidpunkt med andra ljus- och temperaturförhållanden). Det är också viktigt att påpeka att fusion kan hjälpa till för andra uppgifter, så som för förbättrad situationsuppfattning och förflyttning. För mer detaljer kring försöken och ytterligare resultat, se publicerad artikel. [4]

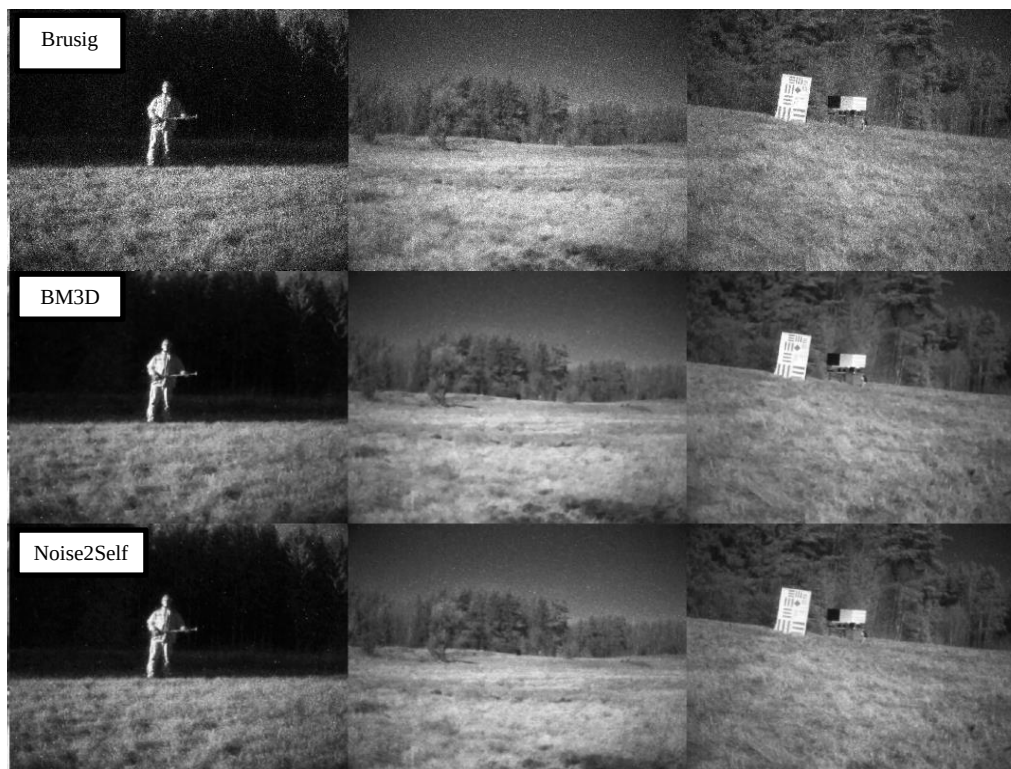
3.3 Avbrusning av bilder med djup maskininlärning

Digitala mörkersensorer erbjuder även utökade möjligheter för sensornära signalbehandling, exempelvis för avbrusning (*eng.* denoising). Avbrusning och brusreduktion innebär metoder med syfte att minska brus under bevarande av viktiga särdrag i bilden så som kanter och texturer. Konventionella avbrusningsmetoder verkar vanligtvis antingen i den spatiala domänen, som lokala och icke-lokala medelvärdesbildande filter, eller i någon matematiskt transformerad domän (exempelvis i Fourier- eller waveletdomänen). Ansatser inom djup maskininlärning (*eng.* deep learning) har på senare år resulterat i en mängd nya olika metoder där faltande neurala nätverk tränas på att reducera brus. Oftast sker träning på brusfria bildexempel, som kan erhållas genom medelvärdesbildning av många brusiga bilder, långa exponeringar eller insamlingar under förhållanden med bättre ljusförutsättningar (exempelvis dagtid). Detta är inte alltid så praktiskt och metoder har även utvecklats där träning sker mot enbart brusiga bilder. En sådan metod är Noise2Self, som bygger på ett s.k. självannoterande blind-spot-nätverk, där enstaka pixlar i de brusiga bilderna medvetet plockas bort och där träningen sedan utformas till att försöka återskapa dessa ”blinda” pixlar. [5]

I ett experiment har bilder insamlade med EBCMOS-kameran EBNocturn (mörkerkameran som ingår som komponent i den fusionsdemonstrator som beskrevs i avsnitt 3.2.1) använts för försök med avbrusning. Bildmaterialet var insamlat under varierande nattljusförhållanden, från månfria och stjärnklara förhållanden till fullmåne, med varierande grad av brus som följd. Bilderna avbrusades både via Noise2Self samt med den konventionella avbrusningsmetoden BM3D (Block-Matching and 3D filtering) [6]. BM3D anses vara en av de allra mest kraftfulla avbrusningsmetoderna och används ofta som måttstock, men är också relativt beräkningsintensiv. För Noise2Self användes drygt 2500 bilder från tre olika insamlingstillfällen som dataset för träning, med varierande bakgrunder och objekt i scenen. Träningen tog ca 3 timmar att genomföra på en PC med ett relativt kraftfullt grafikkort (Nvidia GTX 1080). Själva avbrusningen går däremot mycket snabbare, ungefär med ca 10-15 avbrusade bilder per sekund (med samma hårdvara). Detta ska jämföras med BM3D som kräver flera tiotals sekunder för att hantera varje enskild bild. Både brusiga originalbilder och avbrusade bildexempel kan ses i Figur 10. Kvaliteten i de avbrusade bilderna utvärderades med olika bildkvalitetsmått, både referensbaserade och referensfria metoder. De referensbaserade måtten var Mean Square Error (MSE), Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) samt Structure Similarity (SSIM), för vilka medelvärdet av 30 bilder användes som referens. De referensfria måtten var Naturalness Image Quality Evaluator (NIQE), Perception-based Image Quality Evaluator (PIQE) samt Blind/Referenceless Image Spatial Quality Evaluator (BRISQUE), vilka alla bygger på olika typer av statistiska modeller kring vad som av mänskliga observatörer normalt

uppfattas som bra respektive dålig bildkvalitet. I utvärderingen ingick även ett upplösningmått, som i detta fall utgjordes av punktspridningsfunktionens bredd (PSF_{FWHM}), vilken mättes genom att analysera kantsvar från en testtavla med olika kontrastnivåer. Kvalitetsmåten ses tabellerade i Tabell 1.

Resultaten visar att Noise2Self är mycket konkurrenskraftigt för avbrusning och i många stycken presterar likvärdigt med BM3D, men att metoden tenderar att jämna ut skarpa kanter och fina texturer på ett ofördelaktigt sätt. Framtida arbete inom området kommer att studera hur detta kan minimeras samt hur robust metoden är över tid vid byte av scen- och ljusförhållanden. [7]



Figur 10. Brusiga originalbilder (övre raden), bilder avbrusade med BM3D (mittenraden) samt bilder avbrusade bilder med Noise2Self (nedre raden).

Tabell 1. Bildkvalitetsjämförelse mellan brusiga originalbilder samt bilder avbrusade med metoderna BM3D och Noise2Self. Resultaten är angivna som medelvärden $\pm$ standardavvikelse. De bästa resultaten är fetmarkerade.

Metod	Referensbaserade bildkvalitetsmått			Referensfria bildkvalitetsmått			Upplösning
	MSE	PSNR	SSIM	NIQE	PIQE	BRISQUE	PSF_{FWHM}
Original	955 $\pm$ 734	19,8 $\pm$ 3,9	0,26 $\pm$ 0,12	15,3 $\pm$ 2,0	69,5 $\pm$ 5,5	45,3 $\pm$ 2,1	2,3 $\pm$ 0,7
BM3D	78 $\pm$ 52	30,4 $\pm$ 3,5	0,64 $\pm$ 0,14	5,8 $\pm$ 0,7	72,6 $\pm$ 14,1	56,2 $\pm$ 3,6	3,0 $\pm$ 0,4
Noise2Self	99 $\pm$ 67	29,4 $\pm$ 3,4	0,64 $\pm$ 0,14	4,4 $\pm$ 0,4	16,2 $\pm$ 8,8	33,9 $\pm$ 3,6	3,6 $\pm$ 0,5

3.4 Mörkerförmåga i det kortvågiga IR-området (SWIR)

Våglängdsområdet SWIR är ett intressant alternativ till konventionell teknik i Vis/NIR-området, kanske allra främst p.g.a. nattglöd som lyser extra starkt i våglängdsområdet som kan utnyttjas under månfria nätter med utmanande ljusvillkor. Under projektperioden har ljusnivåer och bilddata i SWIR uppmätts och samlats in, både under svenska och utländska förhållanden. Till stor del har arbetet skett inom ramen för Nato-samarbetet SET-246, som under perioden inriktats mot att utvärdera potentialen hos SWIR för mörkerförmåga. FOI:s deltagande i detta samarbete har finansierats av FMV.

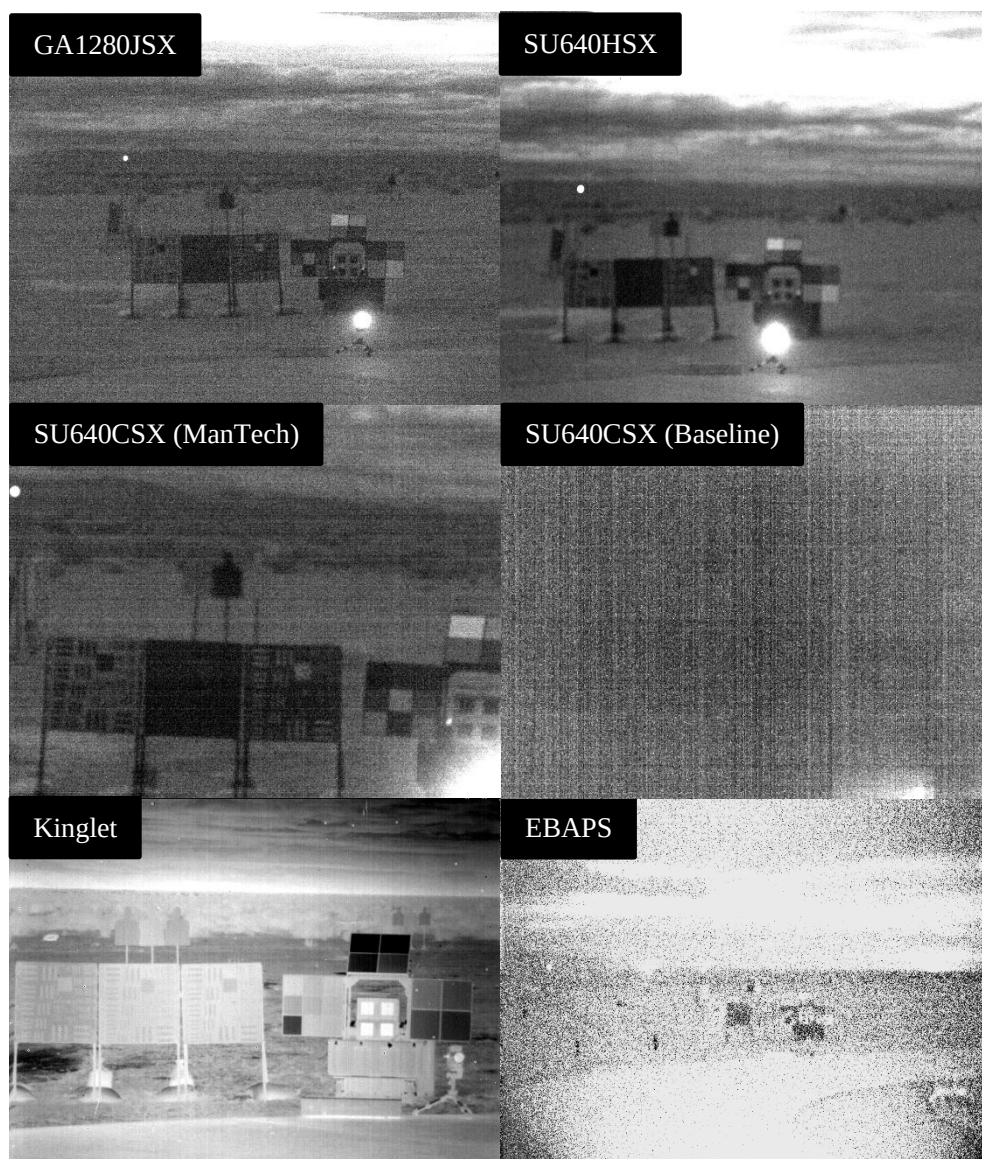
Inom samarbetet genomfördes en gemensam mätning i Dugway (USA) under april månad 2019. Utöver test av olika koncept för mätning av SWIR-irradians ingick även test av olika mörkerkameror, i synnerhet SWIR-kameror men även jämförande kameror i Vis/NIR och MWIR. Tabell 2 visar sammanfattande specifikationer för några av de mest intressanta kamerorna i försökssupställningen. SWIR-kamerorna är samtliga från den amerikanska tillverkaren Sensors Unlimited (numera del av Collins Aerospace), med lite olika upplösningar, pixelavstånd (pitch) och brusprestanda (NEI). Baseline-kameran saknade uppgifter om brusprestanda, men är sannolikt en kamera av äldre och sämre generation. Kinglet-kameran (från israeliska SCD) är en InAsSb-kamera (kyld till 150 K) med känslighet i våglängdsområdet 1-4.2 μm och är således en kombinerad SWIR- och termisk MWIR-kamera. EBAPS-kameran är en elektronbombarderande CMOS-kamera med känslighet i Vis/NIR-området (ca 400 - 900 nm) från amerikanska Intevac (och utgör därmed en konkurrent till franska Photonis).

Tabell 2. Några kameror som användes vid mörkerförsöket i Dugway 2019. Pitch anger pixelavstånd (centrum-till-centrum). F/# är bländartal för använd optik.

Kamera (våglängdsband)	Upplösning [pixlar]	Pitch [μm]	F/#	Bildtakt [Hz]	NEI @ 1.55 μm [fotoner/ cm^2/s]
GA1280JSX (SWIR)	1280x1024	12.5	1.4	60	$1.2 \cdot 10^9$
SU640HSX (SWIR)	640x512	25	1.4	30	$2.1 \cdot 10^8$
SU640CSX ManTech (SWIR)	640x512	12.5	1.4	30	$9.7 \cdot 10^8$
SU640CSX Baseline (SWIR)	640x512	12.5	1.4	30	okänd
Kinglet (SWIR+MWIR)	640x512	15	4.0	60	okänd
EBAPS (Vis/NIR)	1600x1200	10.8	0.95	30	-

Kamerorna har utvärderats genom visuella observationer av realtidsbilder på monitorer under själva försöket, visuell bedömning av insamlade digitala bilddata i efterhand, beräkning av signal-till-brus-kvot från väldefinierade referenstaylor i bilddata samt via jämförelser av specificerad brusprestanda (NEI). Det är värt att poängtera att jämförelser in situ är icke-triviala, eftersom intryck är beroende av valda synfält och inställd skärpa hos använd optik, inställningar och kvalitet hos inkopplade bildskärmar samt eventuell pålagd kontrastförstärkning från hård- eller mjukvara för effektiv bildvisning på skärm. Figur 11 visar några bildexempel från kamerorna vid en tidpunkt med låga och vad som får betraktas som relativt utmanande ljusnivåer i både Vis/NIR (ca 1 mlux) och SWIR (0.035 mW/ cm^2).

Ett samlat intryck från försöket är att SWIR-tekniken nu börjar bli mogen för passiv mörkerförmåga, även under så utmanande betingelser som dessa (månfri och molnig natthimmel). Bäst mörkerförmåga erhöles med kameran SU640HSX, som med sina relativt stora pixlar (25 μm) ger bra brusprestanda då större pixlar innebär fler infångade fotoner. Tyvärr verkar modellen vara på utgående, eftersom den generella utvecklingen annars är att minska pixelstorlekar för att åstadkomma allt högre pixelupplösningar och/eller mindre pixelmatriser. Detta är ett tydligt exempel på att krav ställda för mörkerförmåga inte alltid sammanfaller med krav ställda för andra tillämpningar under andra ljusförhållanden.

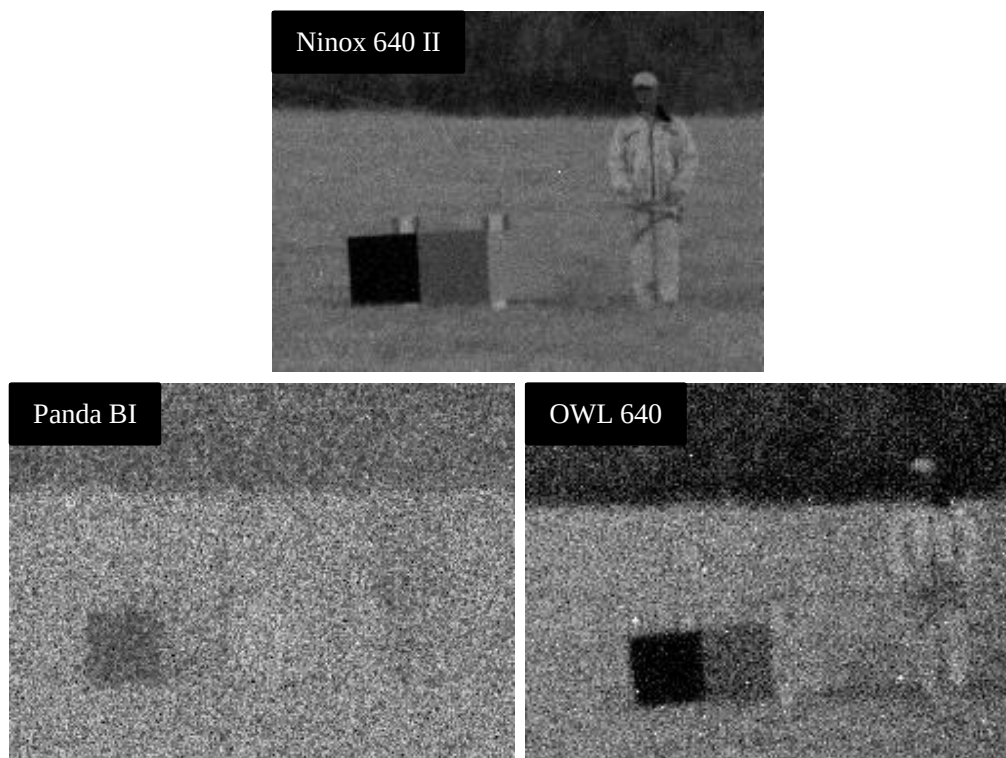


Figur 11. Bildjämförelser från några kameror använda under mörkerförsöket i Dugway (USA). GA1280JSX, SU640HSX och SU640CSX är tre SWIR-kameror från Sensors Unlimited (USA). Kinglet är en kombinerad SWIR/MWIR-kamera från SCD (Israel). EBAPS är en elektronbomberande Vis/NIR-kamera från Intevac (USA). Se Tabell 2 för specifikationer av kamerorna. Tidpunkten för jämförelsen var 2019-04-04 kl. 21:22 (lokal tid). Illuminansnivån i visuella området uppmättes till ca 1 mlux, motsvarande irradiansnivå i SWIR var 0.035 mW/m².

I ett kompletterande försök i Kvarn utanför Linköping har SWIR-kameran Ninox 640 II från nordirländska Raptor Photonics utvärderats på likartat sätt. Kameran har upplösningen 640x512 pixlar (15 µm pixelavstånd) och är baserad på en InGaAs-detektor med spektralområdet 600 - 1700 nm. Kameran är termoelektriskt kyld till -15°C, med ett kraftigt reducerat mörkerströmsbrus som resultat (endast några enstaka elektroner). Kameran har även ett lågt utläsningsbrus på omkring 18 elektroner, vilket är nära vad som utgör teknikfronten idag (2020). I en insamling under månlösa och molnfria betingelser jämfördes Ninox-kameran med den temperaturstabiliserade kameran OWL 640 från samma tillverkare (kameran är stabiliserad till +15°C). OWL 640 har samma pixelupplösning och pixelavstånd som Ninox och är känslig över det något större spektralområdet 400 - 1700nm. Utläsningsbruset är ca 50 elektroner och mörkerströmsbruset är ungefär i samma storleksordning. I försöket ingick även den bakbelysta sCMOS-kameran Panda BI från tyska PCO som referens, med känslighet i Vis/NIR-området (370 - 1000 nm), med ett utläsnings-

brus på omkring 2 elektroner och med ett mörkerströmsbrus i samma storleksordning. Figur 12 visar bildexempel från kamerorna insamlade vid en tidpunkt där uppmätt ljusnivå var som lägst under försöket.

En slutsats från försöket är att kameror med mindre pixelavstånd kan behöva kylning för effektivt utnyttjande av nattglöd. Kylningen kräver ca 10 W i maxeffekt, i jämförelse med OWL 640 som maximalt drar ca 4 W.



Figur 12. Natlig scen utan månsken i Kvarn utanför Linköping 2020-09-16, kl. 22.20 (lokal tid). Illuminansnivå i visuella området uppmättes till 1.4 mlux, motsvarande irradiansnivå i SWIR var ca 0.10 mW/m². Överst: Ninox 640 II (med 50 mm F/1.5 objektiv); nederst t.v.: Panda BI (med 25 mm F/0.95 objektiv); nederst t.h.: OWL 640 (med 50 mm F/1.4 objektiv). Samtliga kameror kördes i bildtakten 25 Hz.

Avslutningsvis inlånades även kameran HuntIR SWIR från AIM i Tyskland för utvärdering i samband med ett försök i samarbete med Polisen. Kameran är känslig i våglängdsområdet 0.9-2.5 μm , dvs. det som brukar betecknas som det utökade SWIR-området (*eng.* extended SWIR). Kameran har en pixelmatis med 640x512 pixlar (15 μm pixelavstånd) och är baserad på detektormaterialet MCT (kvicksilver-kadmium-tellurid). Kameran är kyld till ca 170 K, vilket är en måttlig kylning av denna detektortyp (effektförbrukningen är ca 40 W). I Figur 13 visas bildexempel från kameran, tagna vid skymning respektive nattmörker i en urban vintermiljö under mars månad. Kameran var utrustad med ett 90 mm objektiv (bländartal F/2) vilket gav ett synfält på ca 6 x 5 grader. Det utökade spektralområdet medför att kameran klarar att detektera både reflekterat dags- och nattljus (även aktiva laserkällor upp till 2.5 μm) samt emitterad värmestrålning från målobjekt och terräng, i en och samma handhållna sensorenhet. Värmestrålning kan detekteras ned till några enstaka grader i omgivningstemperatur, med ca 100 mK upplösning vid rumstemperatur (300 K). En helt unik egenskap hos kameran och det utökade SWIR-området är att värmestrålning kan registreras genom fönsterrutor, eftersom vanligt fönsterglas har god transmission upp till ca 2.7 μm . Det är dock värt att poängtera att tekniken ej har samma förmåga att utnyttja den svaga nattglöden som InGaAs-tekniken har, p.g.a. sämre känslighet och brusprestanda i bandet 1 - 1.7 μm .



Figur 13. Bilder från den utökade SWIR-kameran HuntIR SWIR (från AIM) genom fönster mot en byggnad på ca 200 meters avstånd i skymning (vänster) respektive i nattmörker (höger). Notera den detekterade värmestrålningen från fotgängaren, taget genom vanligt fönsterglas. Bildtakten var 50 Hz.

3.5 Internationella samarbeten

Under perioden har projektet deltagit i två Nato-samarbeten med koppling till teknikområdet.

Nato-gruppen SET-217 "Assessing and modeling the performance of digital night vision image fusion" startade i början av 2017 och avslutas under våren 2021. Samarbetet syftar till att utveckla gemensamma verktyg, metoder och metriker för värdering av digitala fusionerade mörkersensorer, där fokus legat på fusion av spektralbanden Vis/NIR och LWIR. Gruppen leds av Fraunhofer IOSB (Tyskland) och har deltagare från NVESD (USA), DRDC (Kanada), DGA (Frankrike), DSTL (Storbritannien) samt FOI. Gruppen har under perioden träffats vid fyra tillfällen, bland annat i Linköping under våren 2018. Under mötena har deltagande representanter delat nationellt insamlade dataset och diskuterat olika möjliga experimentella mätmetoder och matematiska värderingsmodeller. En gemensam slutsats från gruppen har varit att värdering av bildfusion är komplext, eftersom resultat ofta är mycket scen- och uppgiftsberoende. Det tycks också vara svårt att hitta objektiva kvalitetsmått som korrelerar bra med resultat från mänskliga perceptionstest. Problemet skulle behöva analyseras genom tester över ett stort antal scenarion och omgivningsvillkor, vilket är praktiskt svårigenomförbart. En möjlig lösning skulle vara att använda bildsimulering, men detta kräver högre naturtrogenhet hos använda sensor- och scenmodelleringsverktyg än vad som är tillgängligt idag. Under början av nästa år (2021) kommer en slutrapport lämnas från gruppen, med ett gemensamt förslag om en metoduppsättning för värdering av digitalt bildfusionerade mörkersystem, för användning exempelvis i samband med framtida anskaffning. Fortsättning av verksamheten har diskuterats, med förslag om olika inriktningar så som metoder för värdering och modellering av situationsuppfattning, simulering och modellering av bilder med AI, utformning av förbättrade tester och standarder för värdering av bildförstärkare och NVG, värdering av färg för visualisering av sensordata, mm.

Nato-gruppen SET-246 "Short wave infrared technology: a standardized irradiance measurement and computability model to evaluate reflective band systems" startade under 2017 och planeras att avslutas under 2021. Troligtvis kommer samarbetet att förlängas till 2022. Deltagande länder är USA (som också leder), Tyskland, Holland, Norge, Kanada, Slovenien, Frankrike, Turkiet, Storbritannien och Sverige. Gruppen träffas för tillfället några gånger per år för avstämning genom virtuella möten, där huvudpunkterna under 2020 har varit den mörkermätning som gjordes i Dugway 2019 (se avsnitt 3.4) och fortsatta diskussioner kring koncept och metodik för standardiserade mätningar av irradians i SWIR. Syftet med gruppen är att ta fram en gemensam metodik att mäta och modellera natthimmelsljus i SWIR-området, för att kunna värdera elektrooptiska sensorer för

mörkerförmåga i detta våglängdsområde. Ett problem med kommersiella radiometrar för uppmätning av irradians i SWIR är att våglängdsområde och spektral känslighet kan variera mellan olika radiometrar, med olika mätvärden som följd. I det visuella området finns en standardiserad metod för att mäta ljusnivå (benämnd illuminans) i enheten lux. En sådan standardiserad och väletablerad enhet saknas i SWIR-området. Även om det finns ett samband mellan illuminans i det visuella området och irradians i SWIR, så är irradians i SWIR ofta dåligt korrelerad mot uppmätt illuminans. Uppmätta luxvärden nattetid kan därför vara missvisande som mått på irradians i SWIR-området. Ett viktigt moment vid mörkerförsöket i Dugway var tester av olika föreslagna koncept för standardiserade mätningar. Ett sådant koncept är användning av ett relativt smalbandigt bandpassfilter i våglängdsområdet 1.5-1.7 μm tillsammans med ett SWIR-känsligt instrument. Ett annat koncept är användning av en bredbandig InGaAs-detektor som kombineras med ett högpasfilter för att kompensera för olika InGaAs-detektorers varierande känslighet. Det sistnämnda konceptet utgör del av den föreslagna irradiansenheten SWUX, som tagits fram av bl.a. Austin Richards [8].

3.6 Referenser

- [1] Kn Fredrik Karlsson: Systemansvarig för soldatburna sensorer inom Försvarsmakten, Utvecklingssektionen på Markstridsskolan i Kvarn, 2013.
- [2] D. Bergström och T. Svensson, "Sensorer i SWIR - En studie om fenomenologiska förutsättningar och sensorteknisk potential för ökad mörkerförmåga", FOI-R--3486--SE, 2012.
- [3] D. Bergström, "Digitala mörkersensorer – Tekniska förutsättningar och nya operativa förmågor", FOI Memo 6883, 2019.
- [4] D. Bergström, D. Gustafsson, B. Levin, D. Svedbrand, och S. Möller, "Assessing handheld object ID performance of digital night vision VNIR/LWIR fusion", *Proc. SPIE*, Vol. 11537, sidor 115370E-1-13, 2020.
- [5] J. Batson och L. Royer, "Noise2self: Blind denoising by self-supervision", *arXiv preprint arXiv:1901.11365*, 2019.
- [6] K. Dabov, A. Foi, V. Katkovnik, och K. Egiazarian, "Image denoising by sparse 3-D transform-domain collaborative filtering", *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 16, Nr. 8, sidor 2080-2095, 2007.
- [7] D. Gustafsson, L. Ahlinder, D. Bergström, O. Björnham, A. Brorsson, M. Nordberg, och L. Persson, "Maskininlärning för inversa problem och metrikinlärning – Nya sätt att lösa svåra problem", FOI-R--5093--SE, 2020.
- [8] A. Richards och M. Hübner, "A new radiometric unit of measure to characterize SWIR illumination", *Proc. SPIE*, Vol. 10178, sidor 101780C-1-21, 2017.

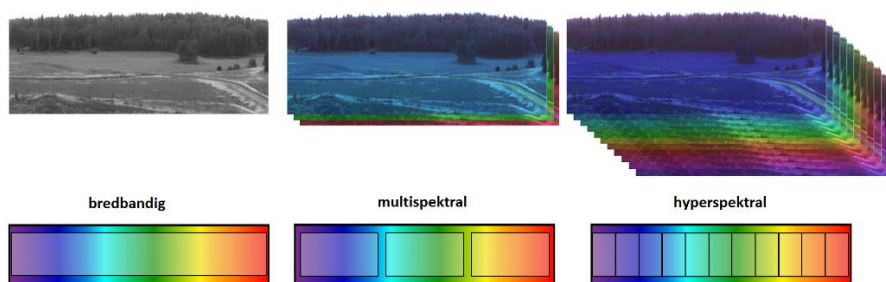
4 Hyperspektral avbildning

Arbetet inom teknikområdet hyperspektral avbildning har under perioden inriktats mot utveckling och värdering av sensorer och algoritmer. Sensorerna har använts för datainsamling under olika fältförsök och algoritmer för att analysera insamlade data från dessa. Arbetet med algoritmer har också varit nära knutet till ett Nato-samarbete (SET-240) som projektet deltagit i under perioden. Innan projektarbetet presenteras i detalj kommer en kort orientering och bakgrund om teknikområdet.

4.1 Teknisk orientering och bakgrund

Det mänskliga ögat är vanligen trikromatiskt med tre typer av färgsynceller (tappar), vilka har sin största känslighet i våglängdsbanden rött, grönt respektive blått. Ett normalt synsinne är därför *multispektralt*, dvs. kan se flera färger (personer med defekt färgseende kan ha nedsatt förmåga i någon av dessa celltyper, vilket gör att de inte kan skilja mellan vissa färgkombinationer).

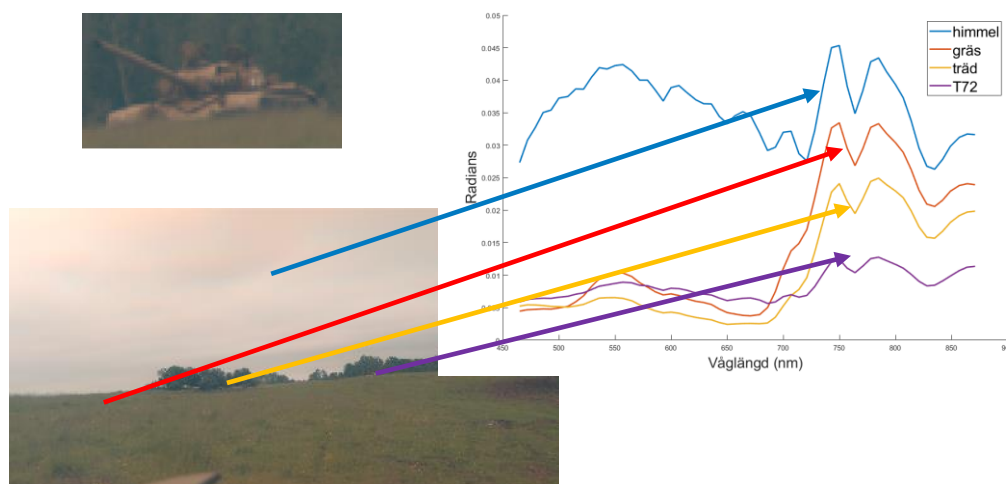
En kamera som avbildar i färg är också ett exempel på en multispektral sensor, till skillnad från en *monokrom* (svart/vit) kamera som enbart mäter i ett (ofta relativt brett) våglängdsband. Färgkameran avbildar på motsvarande sätt som det mänskliga ögat en scen i de tre våglängdsbanden rött, grönt och blått. En digital bild består av en matris med bildelement eller pixlar. För varje pixel finns tre värden som säger hur mycket rött, grönt och blått som pixelns färg innehåller. Trots att det enbart är tre spektralband kan man från en vanlig färgbild ofta identifiera objekt och vilka material de är gjorda av. Vi kan skilja mellan gräs, metall, jord etc., men för att kunna göra detta behöver vi sätta in objekten i ett sammanhang, använda den spatiala formen och strukturen på objektet. Får vi exempelvis endast en pixel med värdet (rött=5%, grönt=93%, blått=2%) så kan vi säga att färgen är mestadels grön, men vi kan inte avgöra om det är gräs, kamouflage eller något helt annat.



Figur 14. Den principiella skillnaden mellan bredbandiga, multi- och hyperspektrala kameror är antalet och bredden av våglängdsbanden som kamerorna avbildar. En bredbandig kamera ger en monokrom gråskalebild från ett brett våglängdsområde, medan multi- och hyperspektrala kameror ger en stack av bilder med innehållet uppdelat i flera olika våglängdsband.

En hyperspektral kamera kan avbildas med tiotals, hundratals eller till och med tusentals separata spektrala våglängdsband (se Figur 14). Varje pixel ger en spektral signatur (ett *spektrum*) över de spektralband sensorn mäter. Eftersom olika material reflekterar och emitterar ljus olika bra för olika våglängder har de ett spektralt fingeravtryck, med vars hjälp en hyperspektral sensor kan användas för att klassificera punkter i scenen efter deras materialinnehåll (t.ex. särskilja ett grönt kamouflagenät från gräs eller granskog så som illustrerat i Figur 15). Hyperspektrala sensorer finns i hela det optiska våglängdsområdet, från det ultraviolette området via det vanliga visuella området och vidare till det termiskt infraröda området. Kameror som konstrueras för våglängder i eller nära det visuella området

kan dra nytta av sensorutvecklingen för kommersiella digitalkameror och de kan göras både billigare och mindre. Hyperspektrala sensorer i det termiska IR-området blir vanligtvis mer komplicerade, tyngre och dyrare, men detta ska vägas mot att de är spektralt bättre anpassade för detektion av vissa material och objekt (t.ex. gaser och mineraler) samt att de även kan användas nattetid.



Figur 15. I en hyperspektral bild innehåller varje pixel ett spektrum, dvs. intensiteten varierar med våglängden. Material har sina egna spektrala fingeravtryck pga. att olika material reflekterar (eller emitterar) ljus olika bra för olika våglängder. Detta gör att man med en hyperspektral kamera kan känna igen och särskilja olika material i en bild utifrån deras unika spektrum.

Komplikationer vid analys av hyperspektrala bilddata är att atmosfären transmittar ljus olika bra för olika våglängder och kamerans ljuskänslighet är olika för olika våglängder. För att extrahera spektrum som representerar material i scenen behöver därför bilddata korrigeras för dessa effekter, vilket görs genom en s.k. sensorkalibrering. En pixel kan ibland avbilda ett enda material men ofta innehåller ett uppmätt spektrum en blandning av flera olika material. Blandningsförhållandet beror på scenen och på hur litet område av scenen som en pixel upptar.

Hyperspektrala detektionsalgoritmer använder de uppmätta pixelspektrumen för att diskriminera mål från bakgrund och förekommer i tre huvudkategorier med olika krav på förkunskap: *signaturbaserad måldetektion*, *anomalidetektion* och *förändringsdetektion*.

Vid *signaturbaserad måldetektion* (även kallad spektral matchning) jämförs spektrum i varje pixel med en ett enskilt målspektrum eller en spektral databas över kända material och målobjekt, med vars hjälp man sedan kan avgöra om en pixel exempelvis är en stridsvagn eller ett kamouflagenät. Metoder av denna typ är de mest kraftfulla, men kräver i gengäld förkunskap om intressanta spektralsignaturer.

Vid *anomalidetektion* jämförs istället spektrum i varje pixel med omgivande pixlar eller mot en bakgrundsmodell och om tillräckligt stora skillnader konstateras markeras dessa som en avvikelser, en s.k. anomali. Anomalidetektion är inte lika kraftfull som signaturbaserad detektion, men kräver å andra sidan heller ingen förkunskap om spektralsignaturer.

Vid *förändringsdetektion* jämförs spektrum från specifika punkter eller områden i scenen över tid. Tillräckligt stora temporala förändringar i spektral innehåll blir i detta fall markerade som detektioner/anomalier. Ibland kan också flera detektionsmetoder kombineras, så att exempelvis anomalidetektion (eller förändringsdetektion) tillämpas för att samla in möjliga intressanta spektrum, vilka sedan i sin tur används av en signaturbaserad detektionsalgoritm för att spåra fler intressanta objekt av samma typ. Figur 16 visar ett exempel på hur en hyperspektral sensor skulle kunna användas för automatisk

materialklassificerad kartering över ett tilltänkt operationsområde och för autonom måldetektion genom förkunskap om en sökt spektral målsignatur (i detta fall en stridsvagn).



Figur 16. Exempel på materialklassificering och signaturbaserad måldetektion. Vänster: En monokrom bild över en markscen tagen från en flygande plattform. Mitten: Materialklassificering av markscenen utifrån en hyperspektral bild med 100 spektralband med klasserna vägmateriäl (brunt), takplåt (magenta), gräs (ljusgrön), skog (mörkgrönt) och okänt (svart). Höger: Signaturbaserad måldetektion där varje pixels intensitet beskriver hur lika pixeln är ett känt spektrum av en Leopard 2A6. I bilden syns två tydliga detektioner som motsvarar de två utplacerade stridsvagnarna i scenen.

4.2 Linjärvariabelfiltrerad kamera inom Vis/NIR-området

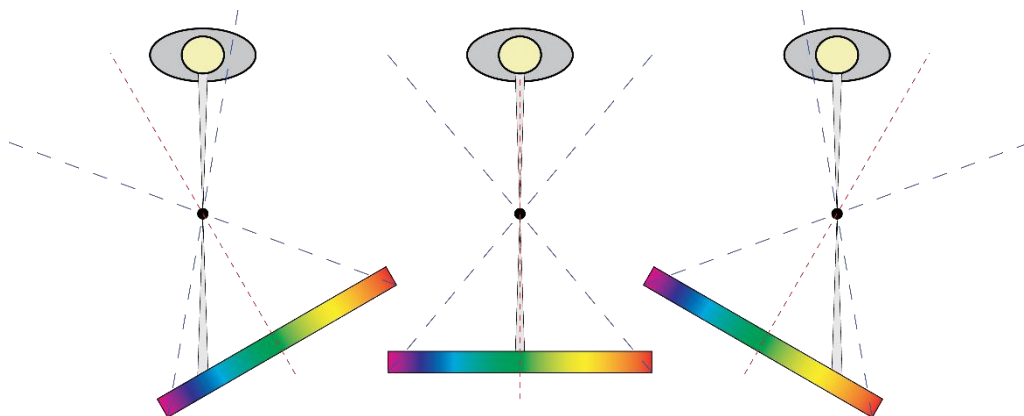
Under 2015-2016 utvecklade FOI en ny hyperspektral kamera för våglängdsområdet Vis/NIR, tillsammans med Renhorn IR Consultant AB i Linköping och Delta Optical Thin Film i Danmark. [9] Kameran har ca 40 oberoende spektralband i spektralområdet 450-880 nm. Tack vare de många pixlarna i pixelmatrisen (5760x3840) erhålls en hyperspektral sensor med potential till mycket hög spatial upplösning, något som de flesta hyperspektrala sensorer på marknaden idag saknar. Detta är en av de unika egenskaperna med sensorn, förutom att den förstås är liten och kompakt. Systemet visades upp på Livgardet i november 2017 på en sensordag arrangerad av FOI och Försvarsmakten. I detta projekt har insamlingsrutiner och signalbehandling för kameran vidareutvecklats. Kameran har även använts i flera försök med lovande resultat som beskrivs i avsnitt 4.5.

Kameran bygger på ett linjärvariabelt filter (LVF), vars kilformade utseende gör att transmissionen genom interferens varierar med våglängd över filtrets bredd. I filtret släpps blått ljus igenom i den ena änden av filtret, medan rött och nära infrarött ljus släpps igenom i den andra. Filtret är monterat över bildsensorn i en systemkamera av modell Canon 5D Mark III, med Bayer-, låpass- och IR-filter borttagna. Pixlarna i en kolumn på sensorn registrerar ljus i ett smalt våglängdsband, där centrumvåglängden för varje band varierar med kolumindex över bildsensorn.

För att samla in hela spektrallinnehållet från en scen måste en given punkt i scenen avbildas på flera kolumner i sensorn. För att erhålla en hyperspektral kub för en scen med ca 60 band krävs en insamling av ca 200 bilder. Tre principiellt olika insamlingstekniker kan användas för kameran:

- 1) Insamling av bilder genom rotation av kameran runt sitt optiska centrum, se princip i Figur 17. Denna teknik lämpar sig exempelvis vid spaning mot ett skogsbryn från en bestämd markposition.
- 2) Insamling av bilder genom att förflytta kameran över en scen bestående av en plan yta. Denna teknik lämpar sig exempelvis för informationsinhämtning från en flygande plattform över en äng eller en annan plan yta eller tagna från så pass hög höjd att en ojämn markyta kan betraktas som plan.

- 3) Insamling av bilder genom att förflytta kameran över en godtycklig scen med höjdvariationer. Denna teknik skulle exempelvis kunna användas för informationsinhämtning från en flygande plattform över en stadsmiljö från låg höjd.

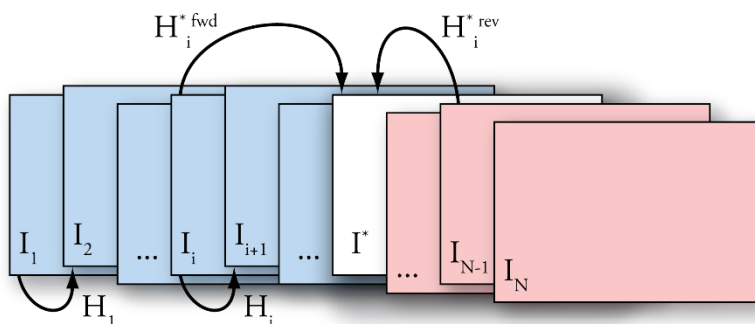


Figur 17. Datainsamling med den hyperspektrala kameran genom rotation kring optiskt centrum, med vy ovanifrån. Regnbågen visar sensorn med tillhörande filter och ovalen är det objekt (t.ex. en person) som ska avbildas. Vänster: Kameran riktad åt vänster och personen avbildas med blått filter i vänster sidan av sensorn. Mitten: Kameran riktad rakt mot personen som avbildas med grönt filter i mitten av sensorn. Höger: Kameran riktad åt höger och personen avbildas i gult område på höger sida av sensorn. Bilderna sätts sedan ihop så att man får en sammansatt bild med personen avbildad i alla färger/spektralband. [10]

För att skapa en hyperspektral bildkub måste insamlade bilder passas med varandra, så att bildinformationen från varje spektralband korresponderar pixel för pixel. Vid denna bildpassning läggs bilder från respektive spektralband ovanpå varandra, så att varje pixel i den slutliga tredimensionella hyperspektrala kuben svarar mot ett spektrum för den avbildade punkten i scenen. Bilderna läggs ovanpå varandra genom en geometrisk transform som beräknas med hjälp av bildinnehållet. För fall 1) och 2) ovan finns väletablerade matematiska metoder, men för fall 3) är det mer komplicerat. Nedan beskrivs bildpassningsmetodiken för det fall data samlats via rotation kring optiskt centrum.

Den matematiska transformen för bildpassning bygger på att det är möjligt att detektera och matcha informationsinnehållet i bilderna. Hur väl man kan detektera och matcha information i ett par av bilder beror på bildinnehållet och hur mycket unik information som finns i bilderna. En jämnblå himmel innehåller exempelvis ingen unik information, vilken gör den svår att använda för detta ändamål. Stor inverkan har även den information i bilderna som ska detekteras, extraheras och matchas för att bestämma den geometriska transformen. Inom projektet har det därför studerats hur bildinnehållet och olika detektions- och matchningsmetoder påverkar bildpassningens prestanda.

Bildpassningen sker mellan angränsande bilder, dvs mellan bilder där sensorn enbart har roterat ett steg. Bildpassning mellan bilder där kameran har roterat flera steg görs sedan genom att kombinera geometriska transformer för de angränsande bildparen. Bilder transformeras genom att lägga ihop angränsande bilder enligt Figur 18.



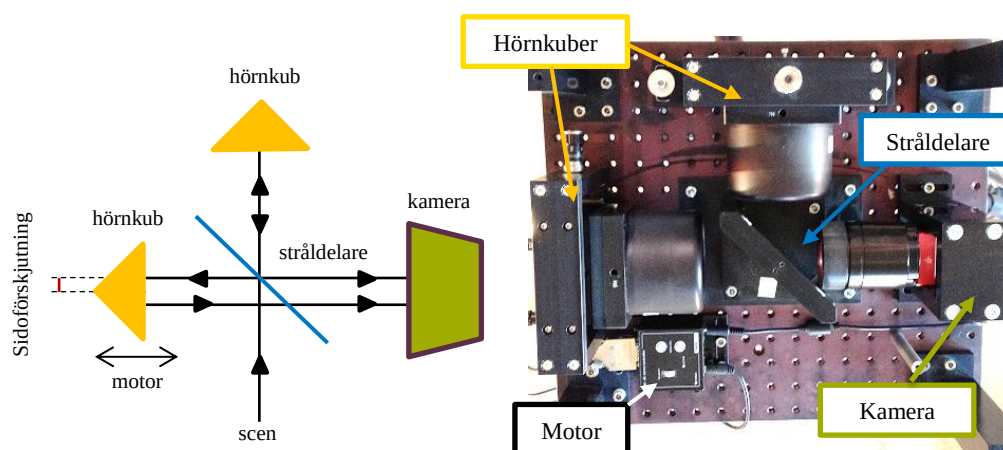
Figur 18. Illustration av bildpassningsprocessen, där en sekvens av bilder (tagna ur olika vinklar mot scenen) genom estimerade geometriska transformer sätts ihop till en gemensam s.k. nyckelbild (vit bild), där alla pixlar i bilden beskrivs av spektrum mot en gemensam våglängdsbas.

För rekonstruktion av en hyperspektral kub krävs en mycket god precision vid bildpassningen, eftersom information i kuben ska ligga på samma spatiala position genom alla spektralband. Den spatiala precisionen i den rekonstruerade kuben har utvärderats genom att beräkna den genomsnittliga spatiala förflyttningen av särdragspunkter mellan de olika spektralbanden. För att kunna använda särdragspunkter (eller landmärken som de också kallas) måste de synas i alla spektralband och vara väl lokaliserade i varje enskilt band. Ett exempel på ett lämpligt särdrag att använda för detta är objektskanter. Experiment har visat att genomsnittsförflyttningen av särdragspunkter genom spektralkuben kan skattas till ca 0.25 pixlar. Om något i scenen har rört sig under insamlingen påverkar dock resultatet mycket.

4.3 Hyperspektral interferometerbaserad LWIR-kamera

Under projektperioden har utvecklingen fortsatt kring en interferometrisk hyperspektral kamera med spektralkänslighet i det långvågiga IR-området (LWIR). LWIR-området är intressant ur hyperspektral synvinkel, då det erbjuder en dag/natt-kapacitet som är svår att åstadkomma i andra våglängdsband. Vissa material, exempelvis gaser, explosivämnen och mineraler, har också spektrala fingeravtryck som är karaktäristiska i just detta spektralområde. Spektralområdet erbjuder även billigare mikrobolometriska detektortechniker som inte kräver någon kylning, vilket har potential att göra hyperspektrala sensorer mer ekonomiska och mindre i storlek, vikt och effektförbrukning.

Kamerans design är baserad på en s.k. Michelson-interferometer, se schematisk skiss och foto i Figur 19, där infallande ljus från scenen delas i en stråldelare och propagerar längs två vinkelräta strålgångar. Strålarna reflekteras mot var sin spegel innan de sedan återkombineras i stråldelaren under sin andra passage.



Figur 19. Schematisk skiss (vänster) och foto (höger) över den FOI-utvecklade hyperspektrala LWIR-kameran.

I instrumentet används hörnkuber istället för plana speglar, vilket gör upplinjeringsen av instrumentet mindre känslig och sensorn mer robust. I uppställningen har den ena hörnkuben (den vänstra i figuren) sidoförskjutits från sitt symmetriläge, vilket medför en spatial förskjutning i sidled av de två vågfrontskopiorna som erhålls via stråldelaren.

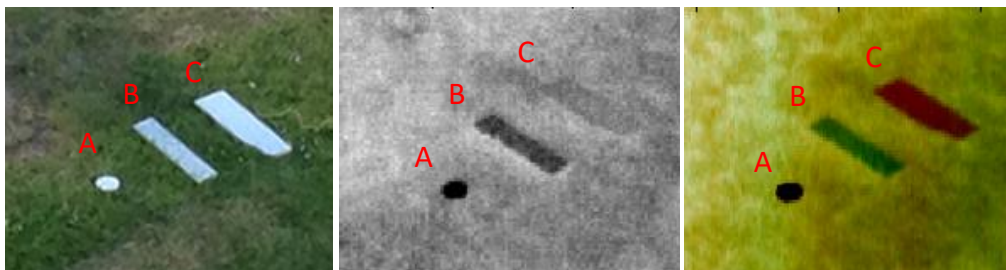
Efter rekombination (den andra passagen genom stråldelaren) skapar detta ett horisontellt interferensmönster som blir överlagrat över bilden i kameran, se bildexempel i Figur 20. I bilden kommer varje kolumn i kameran att motsvara en viss optisk vägskillnad och genom en skanning av interferensmönstret över scenen kan samtliga optiska vägskillnader för strålningen från alla punkter i scenen samlas in. Den mekaniska skanningen kan ske på två olika sätt. För en sensorplattform i rörelse (eller kameran på ett roterbart stativ) kan synfältet flyttas över scenen, samtidigt som interferensmönstret hålls fixerat i bilden. För en stationär plattform hålls kameran synfält fixerat och interferensmönstret förflyttas istället över kameran synfält. Detta åstadkoms i instrumentet genom att förflytta den ena hörnkuben parallellt med den optiska axeln (närmare eller längre bort från stråldelaren), vilket medför att nolläget (zero path difference) för interferometern förskjuts i sidled över kameran. I instrumentet finns en DC-motor som kan translatera hörnkuben i variabel hastighet.



Figur 20. Bildexempel med interferensmönster överlagrat över kamerans bild. Skanning av en scen kan ske genom att svepa kameran synfält över scenen medan interferensmönstret hålls fixt i kameran (exempelvis genom sensorplattformens rörelse eller synfältrotation) eller som i figuren genom att flytta interferensmönstret i sidled över en scen med fixt synfält. [11]

För att reducera storlek, vikt och kostnad hos uppställningen används en okylad mikrobolometer-kamera, för närvarande en A655sc-kamera från FLIR med temperaturupplösningen 30 mK. Kameran har en pixelupplösning på 640 x 480 pixlar (17 μm pixelavstånd), med en bildtakt av 50 Hz och med 14 bitars dynamik. Spektralområdet för sensorn är 7 - 14 μm , med en genomsnittlig spektralupplösning (bandbredd) av ca 50 nm.

Kameran kan förses med objektiv med olika brännvidd för erhållande av lämpligt synfält och spatial upplösning för aktuell tillämpning. Figur 21 visar bildexempel från ett försök genomfört på FOI med kameran mot en gräsyta med utplacerade materialprov i form av aluminiumfolie, granitsten och kalksten. Bildexemplet visar potentialen hos tekniken för materialklassificering, som är svårt att bedöma i en vanlig bredbandig visuell eller termisk IR-bild. Exemplet visar också styrkan hos tekniken för detektion av lågsignaturobjekt, som kan ha dålig kontrast i en bredbandig sensor men som kan uppvisa hög kontrast i en hyperspektral bild.



Figur 21. En scen med fyra material: knycklad aluminiumfolie (A), granit (B), kalksten (C) placerade på en gräsyta. Vänster: visuell bild; mitten: en bredbandig termisk IR-bild (LWIR) där kontrasten hos C är dålig; höger: en spektral segmentering av de fyra materialen (tre hyperspektrala band har representerats som en RGB-bild) med en markant förbättring av kontrasten hos C. [11]

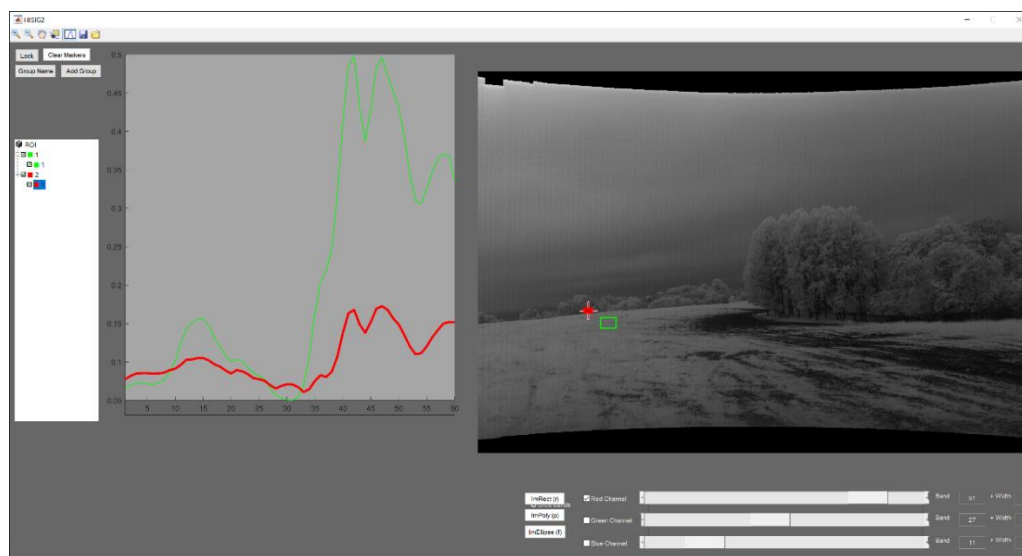
4.4 Algoritmer och verktyg för analys och visualisering

Hyperspektrala bilder kan inte presenteras på samma sätt som monokroma och vanliga RGB-bilder. I projektet har vi därför utvecklat ett verktyg för att visualisera hyperspektrala bilder. Med verktyget kan man visa enskilda band som en monokrom bild och spektrum för enskilda eller grupper av pixlar i hyperspektrala kuberna. I projektet har vi också arbetat med algoritmer som sammanfattar information i hyperspektrala bilder som monokroma eller RGB-bilder.

En algoritm för materialklassificering kan till exempel klassificera spektrum i varje pixel och sedan visa en färgbild där varje färg är knuten till en viss materialklass. En algoritm för anomalidetektion innebär en metod att indikera vilka pixlar i en bild/scen som innehåller vanliga och ovanliga spektrum. En möjlig militär tillämpning kan vara att leta efter fordon i en naturlig terräng, där man på förhand inte vet vilket spektrum fordonet har men kan utnyttja det faktum att fordon är ovanliga i den aktuella terrängen. Det är dock inte säkert att ett hittat anomalispektrum alltid är ett fordon, då det förstås finns många andra föremål och fenomen som också kan vara ovanliga i den aktuella miljön.

4.4.1 Visualiseringsverktyg

Lättöverskådlig och informativ visualisering av hyperspektral bildinformation för måldetektion och målklassificering som ska utföras av mänskliga operatörer är en stor utmaning. Inom projektet har vi utvecklat en programvara för grundläggande visualisering av hyperspektrala bilddata (se Figur 22). Verktöget stödjer inläsning av några vanliga bildformat och visualisering av enskilda spektralband som monokroma bilder eller tre utvalda spektralband som en falskfärgad RGB-bild. Bilderna visas sedan i en översiktssbild i användargränssnittet, där pixlar och regioner kan markeras för plottning av markerade pixelars spektrum. För översiktssbilden finns även en zoomfunktion för att hitta små målobjekt.



Figur 22. Program för visualisering av hyperspektral bildinformation. I översikt bilden till höger är ett område innehållande ett målobjekt (röd) och ett område innehållande en gräsyta (grön) markerade. Medelspektrum för markerade områden, med radians som funktion av bandnummer (våglängd), är plottade med korresponderande färg i grafen till vänster.

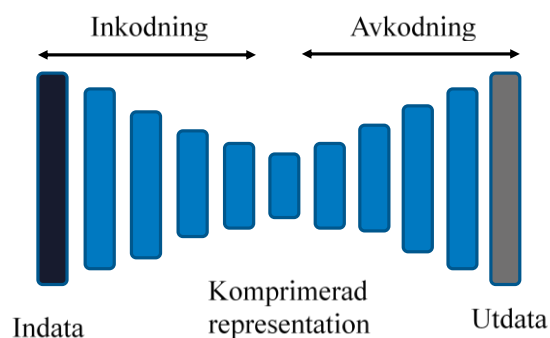
4.4.2 Anomalidetektion med maskininlärning

I projektet har maskininlärningsansatser baserat på djup maskininlärning för anomalidetektion vidareutvecklats. Djup maskininlärning är en relativt ny ansats inom maskininlärning som har visat ytterst lovande resultat inom flertalet bildbehandlings-tillämpningar och då speciellt för svåra problem där alternativa ansatser har haft begränsad framgång. Inom djup maskininlärning representeras särdrag (egenskaper) i bilder genom en hierarkisk struktur av ökande abstraktionsnivå som bestäms genom inlärning. Ett centralt koncept är möjligheten att lära sig en sådan hierarkisk särdragsstruktur med hjälp av oannoterade träningsdata med oövervakade (*eng.* unsupervised) inlärningsmetoder, dvs. utan kunskap om vad bilderna föreställer/innehåller (bilar, träd, ansikten, osv.). En annan central metod inom djup maskininlärning är s.k. faltande neurala nätverk (*eng.* Convolutional Neural Networks), där en hierarkisk representation av bilder (sammansatt av flera lager av faltningskärnor) lärs in utan någon manuell särdragsextraktion. Automatisk inlärning av en hierarkisk struktur av särdrag utifrån tillgängliga data har i många tillämpningar gett avsevärt bättre resultat än en manuell särdragsextraktion, som vanligen kräver stor domänkännedom.

Framgångarna för djup maskininlärning kan primärt förklaras av tre faktorer: 1) mängden tillgängliga sensordata har under de senaste åren ökat kraftigt inom många civila tillämpningar, 2) algoritmutveckling som resulterat i effektivare optimeringsmetoder och 3) implementationer av algoritmer i speciell hårdvara, exempelvis på grafikprocessorer. Detta har resulterat i att experiment som tidigare var ytterst tidsödande att genomföra idag kan genomföras inom rimlig tidsram och på stora datamängder.

Djup maskininlärning kan också användas för anomalidetektion i hyperspektrala bilder, dvs. för detektion av (spektrala) avvikelser i en scen. Modellering av spektrala signaturer för material som är frekvent förekommande i scenen (icke-avvikande) kan då göras med hjälp av en oannoterad träningsmängd. Tekniken som används kallas AutoEncoder (se principskiss i Figur 23) och innebär en avbildning av indata på sig självt – dvs. indata och utdata är identiska. I en AutoEncoder inför man ett mellanlager med lägre dimensionalitet än indata och tvingar således data genomgå en komprimering till en lågdimensionell representation. På detta sätt lär sig nätverket att transformera data till en lågdimensionell representation med bevarande av tillräcklig information för senare rekonstruktion av originaldata. För spektrum i träningsmängden (icke-avvikande spektralsignaturer) kommer således rekonstruktionsfelet vara litet då nätverket kan återskapa dessa spektrum. För

spektrum som inte fanns med i träningsmängden (avvikande spektralsignaturer) kommer rekonstruktionsfelet vara större. Stora rekonstruktionsfel kommer på detta sätt att indikera en hög sannolikhet för en anomali. En AutoEncoder för hyperspektral anomalidetektion har utvärderats både med egeninsamlat data i visuellt och när-IR och för bilddata från hyperspektral LWIR erhållet genom Nato-samarbetet SET-240 (se vidare information under avsnitt 4.6).



Figur 23. Bilden visar principen för en s.k. AutoEncoder, vilket är en teknik inom djup maskininläring där data avbildas på sig självt genom att tvinga det att passera ett mellanlager med lägre dimension.

4.4.3 Visualisering med metrikinläring

I många tillämpningar är det centralt att kunna visualisera sensordata för en operatör för att denna ska kunna fatta välgrundade beslut. Visualisering är också viktigt när automatiska eller semi-automatiska detektions- och klassificeringsmetoder används för att operatören ska kunna verifiera resultaten från den automatiska analysen. Metoder för att visuellt framhäva information i hyperspektrala bilddata är av stor betydelse speciellt då operatören är under tidspress eller annan stress.

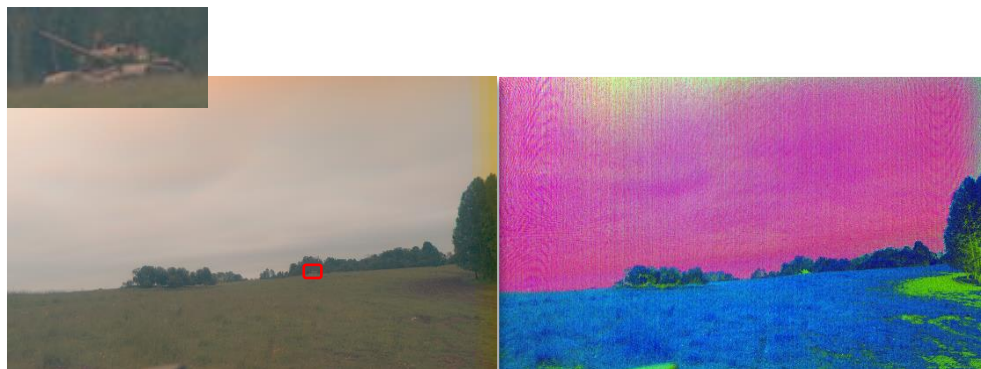
Med maskininläring kan ett neuralt nätverk utifrån data lära sig att visuellt framhäva viss information. Metrikinläring kan användas för att bestämma ett avståndsmått sådant att spektrum från samma material har mindre avstånd än spektrum från olika material. Vid inläringen får man en transformation där varje spektrum transformeras till en abstrakt punkt sådan att lika spektrum hamnar nära varandra och olika spektrum långt ifrån varandra. Inläringen kräver tillgång till spektrum och information om vilket material spektrumet tillhör.

Vid metrikinläring önskas ett avståndsmått konstrueras så att ett stort avstånd erhålls mellan hyperspektrala signaturer från olika material och ett litet avstånd erhålls mellan hyperspektrala signaturer från samma material. Med det framtagna avståndsmåttet grupperas implicit de spektrala signaturerna efter material. Vid visualisering med avståndsmåttet kommer spektrala signaturer från samma material ha likartad färg och spektrala signaturer från olika material ha olika färg. Färgkontrasten mellan spektrala signaturer för olika material försöker man göra så stor som möjligt. Visualisering med metrikinläring leder till en materialsegmentering av bilden, där varje material har sin egen färg som är väl separerad från andra material i scenen.

Metrikinläring är en datadriven metod som utgör en variant av den AutoEncoder som beskrevs i föregående avsnitt. Metoden tar fram ett optimalt avståndsmått baserad på tillgänglig sensordata och kräver således en uppsättning spektrum med de material som normalt förekommer i scenen. Då en hyperspektral bild vanligen innehåller ett stort antal spektrum är ofta annotering av en eller ett fåtal hyperspektrala kuber tillräckligt för denna metrikinläring.

En målsättning med metrikinläringen är en visuell uppdelning (segmentering) av bilder i olika material för att underlätta tolkning av scenen. Genom att framhäva relevant information underlättas detektion och klassificering av mål. I Figur 24 visas en scen där ett

relativt svårupptäckt militärfordon är parkerat i ett skogsbryn. Vid infärgningen från metrikinlärningen framträder dock fordonet relativt tydligt som en avvikelse i den relativt homogena skogsbakgrunden.



Figur 24. Till vänster visas en rekonstruerad färgbild från den hyperspektrala kuben (som en vanlig RGB-bild), till höger visas en metrikinlärnd infärgning av den hyperspektrala bildinformationen. Infärgningen är konstruerad så att färgdifferensen mellan de olika kända materialtyperna i scenen – gräs, löv, himmel och jord – är maximal. Genom materialsegmenteringen framträder militärfordonet i skogsbrynet tydligt.

4.5 Fältförsök

Inom projektet har ett flertal mätningar genomförts med de egenutvecklade hyperspektrala sensorerna. Målsättningen med många av dessa har varit att utreda specifika sensoregenskaper. I projektet har även två mer omfattande insamlingskampanjer genomförts. Dessa beskrivs mer detaljerat nedan.

4.5.1 Försök på MSS i Skövde: detektion av militärfordon

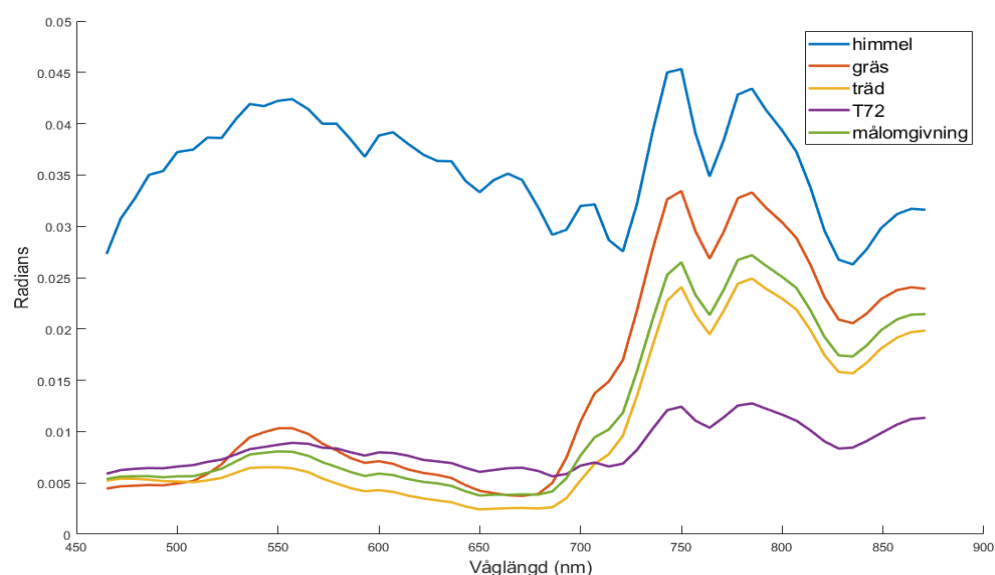
Under juni 2019 genomfördes en mätkampanj på MSS i Skövde där flera FoT-projekt medverkade. Fokus för mätkampanjen var detektion av olika militärfordon på olika avstånd vid mark-till-mark-spaning. Signaturer från ett antal målobjekt samlades in under olika ljus- och väderförhållanden och under olika aktiviteter, där framför allt den termiska signaturen påverkades och undergick stora variationer. I kampanjen användes den linjärvariabelfiltrerade kameran som beskrevs under avsnitt 4.2 (här benämnd LVF-kamera). Militärfordonen som användes vid insamlingskampanjen var stridsvagnen T-72 och pansarterrängbilen BTR-70.

Hyperspektrala bilddata samlades in med LVF-kameran över ett fält med målobjekten (militärfordonen) utplacerade mot en skogsbakgrund. Primärt fokus vid analys av insamlade data har varit visualisering och detektion av målobjekt med liten spatial utbredning. Ljusförhållandet i scenen och förekomsten av skuggor påverkade starkt möjligheten att visuellt särskilja målen från sin bakgrund. Utöver detta påverkade även höjdvariationer i scenen, höjdskillnad mellan kamera och målobjekt samt vegetation i scenen som helt eller delvis kunde skymma målobjektet. I Figur 25 visas en typisk scen från insamlingen, där en delvis skymd (av högt gräs) T-72 var utplacerad framför ett skogsparti.



Figur 25. Typisk scen från Skövde-försöket, här en RGB-bild med en T-72 i skogsbrynet till vänster.

För att kunna analysera insamlade data och använda dessa som träningsdata har de hyperspektrala kuberna annoterats. Annotering har gjorts genom att tilldela varje pixel ett material med specifika spektrala egenskaper. Vid annoteringen gjordes en grovskalig uppdelning av scenen i fem objektstyper – tre olika bakgrundsmaterial, ett gränsområde och ett målobjekt. Medelspektrum för de olika regionerna visas i Figur 26. Inom det visuella våglängdsområdet (435 - 740 nm) är de spektrala signaturerna ganska lika varandra (förutom himmel), medan skillnaden dem emellan ökar inom NIR-området (740 - 900 nm).



Figur 26. Medelspektrum för de olika materialtyper/regioner som annoterats.

Metrikinlärning har därefter använts för att visualisera och lyfta fram den hyperspektrala informationen i bilderna. Ett resultat visas i Figur 27, där samma scen delats upp i materialknutna regioner och där målet framträder tydligt mot skogsbakgrunden.



Figur 27. Till vänster visas RGB-bild med T-72 i vänster skogsbryn. Till höger visas en hyperspektral materialsegmentering av bilden, där de olika områdena har färgkodats så att himmel är grön, skog är ljusblå, gräs är mellanblått och gränsområdena är mörkblåa. Målobjektet är segmenterat med en omslutande gul rektangel.

Anomalier kan också upptäckas med analystekniker som utnyttjar medelvärdesanalys (*eng. sliding windows*). Det område i bilden som analyseras består av två olika fönster. Ett fönster består i detta fall av en inre rektangel och en större yttre rektangel, där den yttre rektangeln omsluter den inre. Av huvudintresse vid analys är framför allt informationen i den inre rektangeln samt i randområdet till denna (dvs. den del av den yttre rektangeln som inte överlappar den inre). Vid analysen flyttas fönstret över bilden och medelvärden för inre rektangel och randområde estimeras. Om medelvärdet för de två områdena avviker så betraktas den inre rektangeln som en anomali. Bakgrunden antas vanligen vara normalfördelad. Storleken på den inre och yttre rektangeln är avgörande för vilka mål som kan detekteras med denna typ av metod. I Figur 28 visas ett resultat för hyperspektral anomalidetektion i en scen från Skövde-försöket.



Figur 28. Vänster: En T-72 framför ett skogsbryn. Höger: En anomalibild som skapats med en teknik med ett glidande fönster (*sliding windows*). Anomalibilden visar sannolikhet för anomali, där ljusa pixlar indikerar en hög sannolikhet och mörka pixlar en låg sannolikhet. Gränsområden mellan olika material får högre sannolikhet vilket framträder tydligt i exempelvis gränsområdet mellan himmel och skog. Vid tröskling av anomalivärdena är det enbart militärfordonet som blir kvar.

4.5.2 Insamlingsförsök på FOI: anomalidetektion i gräsyta

Våren 2020 genomfördes under fyra veckor ett antal insamlingar med LVF-kameran mot en gräsyta innehållande målobjekt med olika spektral signatur och spatial utbredning. LVF-kameran var placerad över en plan gräsyta, riktad lodrätt ned mot denna. Målsättningen med insamlingen och efterföljande analys var att värdera förmågan att upptäcka målobjekt med okänd signatur, var utseende inom det visuella våglängdsområdet liknade bakgrunden (gräset i detta fall). Då de spektrala signaturerna för målobjekten i scenen betraktades som

okända – vi vet inte exakt vilka objekt som eftersöks – måste anomalidetektion användas för att upptäcka dessa.

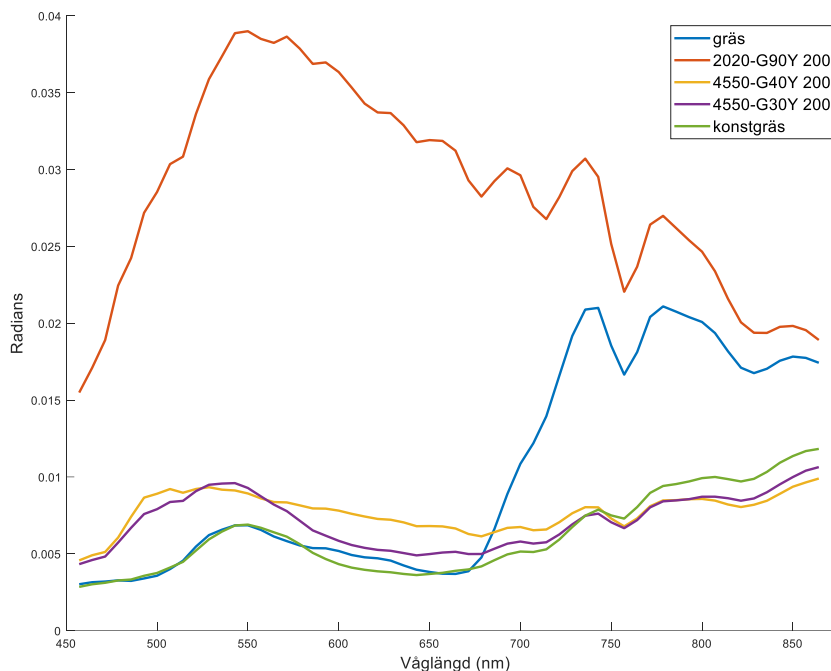
Bakgrunden utgjordes av en relativt homogen gräsyta med naturliga färgvariationer. Målobjekten utgjordes av metallkvadrater målade i tre olika kulörer, två kamouflagenät samt konstgräs av plast. Metallkvadraterna fanns i fem olika storlekar: 200, 100, 50, 25 och 10 mm. Kamouflagenäten bestod av ett billigare nät från Biltema samt ett äldre nät från Saab Barracuda (524). Då kamouflagenäten vara komponerade i flera olika färger placerades mindre tygbitar av dessa i olika nyanser ut i scenen. Utöver målobjekten var även spektrala och geometriska kalibreringstavlor utplacerade som referenser. Figur 29 visar en översiktssbild av scenen.



Figur 29. Översiktssbild av scenen och de olika materialen som användes vid datainsamlingen. Bakgrunden utgjordes av en relativt homogen gräsyta med naturliga variationer. Målobjekten som användes var tre typer av målade metallkvadrater, två uppstyckade kamouflagenät samt konstgräs.

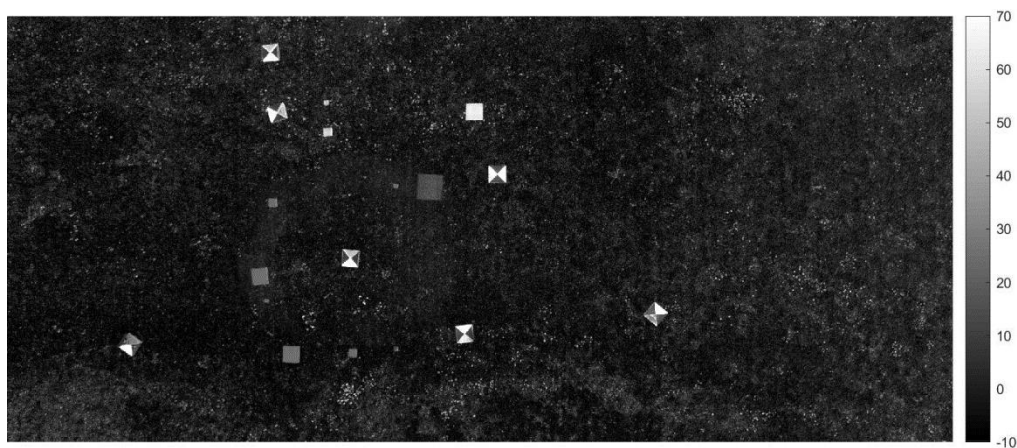
Insamlade data har därefter annoterats för att kunna användas i analys och som träningsdata. Vid annoteringen har alla målobjekt i samma material (men med olika storlek) annoterats med en mask som innehåller materialklass och objektens spatiala utbredning.

Medelvärden för estimerade spektrala signaturer för de olika målen och bakgrunden visas i Figur 30. Inom det visuella våglängdsområdet (435 - 740 nm) är de spektrala signaturerna ganska lika bakgrunden, medan skillnaden ökar inom NIR-området (740 - 870 nm).



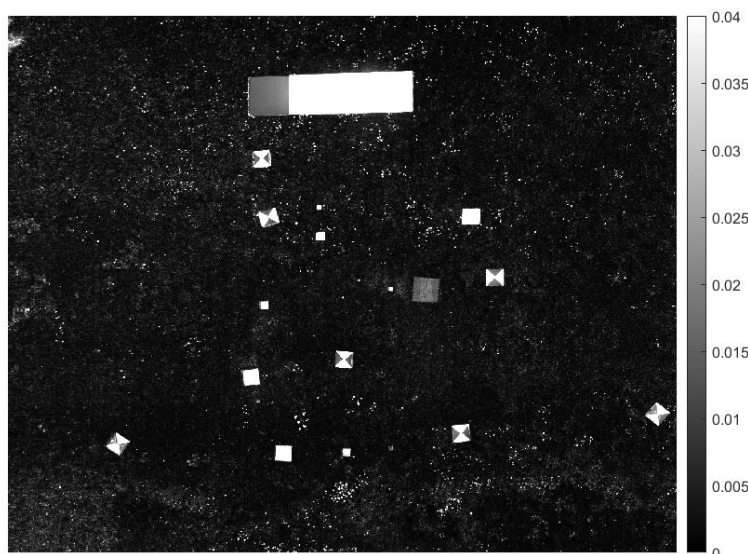
Figur 30. Medelspektrum för målobjekt och bakgrund i försöket.

En alternativ ansats till anomalidetektion är underrumsmetoder. Vid underrumsmetoder representeras bakgrund på ett effektivt sätt, med så få parametrar som möjligt samtidigt som all viktig information bevaras. Data som inte finns i bakgrunden kommer att representeras dåligt med dessa parametrar och kommer generera ett relativt stort fel (en så kallad residual). Magnituden på felet kan därefter användas för detektion av anomalier. En välkänd underrumsmetod är Gauss-mixtur-modellering (GMM). I Figur 31 visas approximeringsfelet (residualen) vid användning av GMM optimerad på bakgrundsgräset. De flesta målobjekten i scenen framträder relativt tydligt i bilden med denna metod.



Figur 31. Exempel på anomalidetektion med gaussmixturmodellering. Varje pixels intensitet beskriver hur mycket pixeln avviker från gaussmixturmodellen. Kalibreringstavlorna med trianglar och några kvadratiska tavlor avviker väsentligt från normalmodellen. Många av de vita prickarna i bilden är små blommor som också avviker väsentligt från normalmodellen. I det här fallet blir det många falsklarm.

En alternativ ansats till anomalidetektion är den AutoEncoder-baserade metod som redan diskuterats i avsnitt 4.4.2. Figur 32 visar resulterande anomalibild med denna metod som jämförelse. Flertalet av målen framträder i bilden och jämfört med GMM-metoden framträder anomalierna mer distinkt med denna metod.



Figur 32. Exempel på anomalidetektion med AutoEncoder, där ljusa pixlar indikerar ett stort rekonstruktionsfel och därmed en hög sannolikhet för anomali.

4.6 Internationella samarbeten

Under treårsperioden har vi deltagit i ett samarbete inom Nato-gruppen SET-240 med inriktning mot hyperspektral avbildning i LWIR-området. Samarbetet i gruppen har pågått under åren 2016-2019. Detaljerade resultat från SET-240 publiceras i en kommande Nato-rapport.

SET-240 "Exploitation of longwave infrared airborne hyperspectral data" är en uppföljningsgrupp till gruppen SET-190 "Phenomenology and exploitation of thermal hyperspectral sensing" (jan 2013 – dec 2015) som huvudsakligen var en stor datainsamlingskampanj i Kanada under augusti 2014 där hyperspektrala sensorer flögs över ett väl uppmätt testområde. I gruppen SET-240 har syftet varit att analysera större delen av insamlat data från denna mätkampanj för att demonstrera de militära fördelarna med termisk hyperspektral avbildning för tillämpningar så som detektion av oexploderad ammunition (OXA), improviserade sprängladdningar (IED) och återigenkänning av fordon. Sverige deltog inte i SET-190, men genom medverkan i SET-240 har FOI har fått tillgång till ett omfattande och unikt dataset där mätningar med alla då (2014) tillgängliga kommersiella termiska hyperspektrala flygburna sensorer finns med. I datasetet ingår även det amerikanska systemet SEBASS (utvecklad av Aerospace Corporation i USA) som är ett avancerat och högpresterande hyperspektralt LWIR-system. Utöver detta finns även en stor mängd markmätningar och kalibreringsdata tillgängliga.

Deltagande nationer och organisationer i gruppen är Kanada (DRDC), Belgien (RMA), Tyskland (Fraunhofer IOSB), Nederländerna (TNO), Norge (FFI), Sverige (FOI), Turkiet (METU, Hacettepe U, ASELSAN och HAVELSAN), USA (ARFL, NVESD och SpecTIR) och Nato (NATO ACT/JCBRN Def COE). De europeiska deltagande länderna och organisationerna var tidigare med i det framgångsrika EDA-projektet DUCAS (Detection in Urban scenario using Combined Airborne imaging Sensors). [12]

I gruppen har FOI bidragit med analyser baserade på AutoEncoder för bakgrundsmodellering och anomalidetektion. Olika konfigurationer av AutoEncoder har

utvärderats primärt för detektion av IED:er och OXA. Tillämpning av AutoEncoder för anomalidetektion i hyperspektrala bilddata är ett tämligen utforskat område som genererat lovande resultat som i många fall varit i paritet med forskningsfronten och vissa fall presterat bättre. Under projektet började fler organisationer - framför allt Kanada (DRDC), USA (ARFL) och Norge (FFI) - att studera alternativa AutoEncoder-ansatser för anomali-detektion.

Under 2020 har gruppen sammanfattat alla resultat i en slutrapport. Data från SET-190 samt ett dataset med gasutsläpp från NVESD analyserades. Spektralvariation har undersökts och förklarats i olika scenarion. Rekommendationer för hur insamling och analys kan göras för en flygburen hyperspektral LWIR-sensor kombinerat med VNIR och SWIR presenteras. Både traditionell signalbehandling och nya ansatser med maskininlärning har använts bland annat i ett delförsök för att detektera OXA. Även tillämpningar inom CBRNE har analyseras, t.ex. gaser. Fördelar som nämns med den hyperspektrala förmågan är avancerad elektrooptisk ISR-förmåga både dag och natt för detektion av subpixelmål baserat på deras kemiska sammansättning. Hyperspektral avbildning ger detektioner med högre konfidens än traditionella EO sensorer. Hyperspektrala system försvårar för en motståndare när det gäller motmedel eller maskering. För framtiden ser man bland annat maskininlärning som ett intressant område för förbättrad analys av hyperspektrala data.

Gruppen arrangerade även en workshop (SET-277 Workshop on Phenomenology and Exploitation of Hyperspectral Sensing within NATO) där resultat från SET-240 och närliggande forskningsresultat kunde presenteras för en bredare publik. FOI presenterade två bidrag vid workshopen. [13, 14]

4.7 Referenser

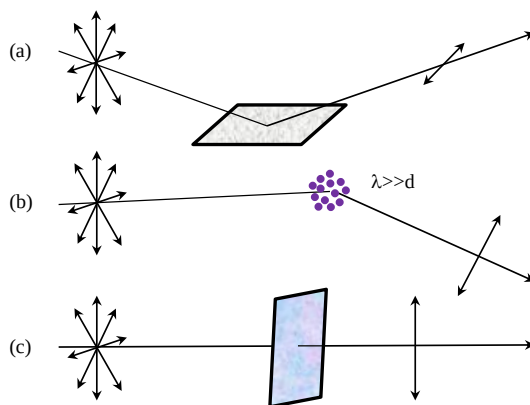
- [9] I. G. Renhorn, D. Bergström, J. Hedborg, D. Letalick, och S. Möller, "High spatial resolution hyperspectral camera based on a linear variable filter", *Optical Engineering*, Vol. 55, Nr. 11, sidor 114105-1-9, 2016.
- [10] D. Gustafsson, H. Petersson, M. Axelsson, och D. Bergström, "Spectral cube reconstruction for a high resolution hyperspectral camera based on a linear variable filter", *WHISPERS*, Amsterdam (Nederländerna), 2018.
- [11] T. Svensson, D. Bergström, L. Axelsson, M. Fridlund, och T. Hallberg, "Design, calibration and characterization of a low-cost spatial Fourier transform LWIR hyperspectral camera with spatial and temporal scanning modes", *Proc. SPIE*, Vol. 10644, sidor 106440X-1-16, 2018.
- [12] I. Renhorn, "DUCAS – Executive summary", FOI Memo 4686, 2013.
- [13] M. Axelsson, N. Wadströmer, D. Gustafsson, H. Petersson, och D. Bergström, "Anomaly detection in hyperspectral LWIR imagery using autoencoders", *NATO SET-277 Workshop on Phenomenology and Exploitation of Hyperspectral Sensing within NATO*, Bryssel (Belgien), 2019.
- [14] D. Gustafsson, M. Axelsson, H. Petersson, A. Brorsson, och D. Bergström, "Spatial Registration and Spectral Reconstruction of a Linear Variable Filtered Hyperspectral Camera", *NATO SET-277 Workshop on Phenomenology and Exploitation of Hyperspectral Sensing within NATO*, Bryssel (Belgien), 2019.

5 Polarimetrisk avbildning

Arbetet inom teknikområdet polarimetrisk avbildning har under perioden inriktats mot studier kring möjligheter och begränsningar med olika teknologier för optiska polarimetriska sensorer samt hur de kan komplettera konventionell optisk avbildning i olika tillämpningar. Mycket arbete mot tillämpningar, såsom signaturfrågor och anomalidetektion, görs även i samarbete med andra projekt, exempelvis ”Signaturmodellering”, ”Signaturmaterial” och ”Detektion av IED”. Innan projektarbetet presenteras följer en kort orientering och bakgrund om teknikområdet.

5.1 Teknisk orientering och bakgrund

I konventionell och multi- eller hyperspektral optisk avbildning utnyttjas skillnader i ljusets irradians- och våglängdsfördelning för att skapa kontrast mellan olika föremål och särskilja dem i en scen. Polarimetrisk avbildning kompletterar detta genom att även registrera i vilken riktning strålningsfältet oscillerar, dvs. fältets polarisation. Många naturliga strålkällor uppvisar en slumpmässig polarisation och uppfattas som opolariserade. Polarisationskontraster kan väsentligen uppstå genom reflektion eller emission från ytor som betraktas i en vinkel från ytnormalen, genom spridning i gas eller vid brytning i vissa transparenta material, se Figur 33.

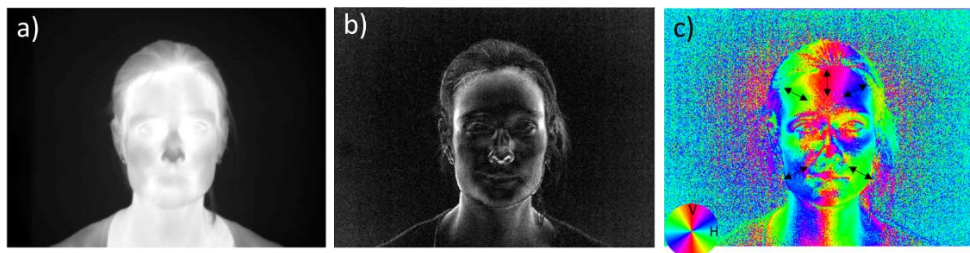


Figur 33. Tre exempel på fenomen som kan påverka strålningens polarisationsegenskaper. a) Reflektion, b) spridning i en gas, c) brytning genom vissa transparenta medier.

För reflektion och emission gäller generellt att slätare ytor och mer strykande betraktningssvinkel ger upphov till en högre grad av polarisation än skrovliga ytor och små infallsvinklar. Polarisationsriktningen är beroende på geometrin strålkälla-objekt-sensor. Polarimetrisk information utgör ett komplement till konventionell avbildning och kan ge information om ytstruktur och geometri. Exempel på några potentiella tillämpningar är detektion av konstgjorda föremål i naturligt klottrig miljö, förbättrad igenkänning, UAV-detektion och siktförbättring i dis.

Strålningens polarisationsegenskaper mäts genom att scenen avbildas med polarisationsfilter i minst tre olika riktningar. Vanligen används fyra olika riktningar: 0, 45, 90 samt 135 grader. Flera tekniska lösningar med varierande komplexitet finns för att åstadkomma detta. Ur insamlade sensordata beräknas dels scenens opolariserade del samt även grad av linjärpolarisation och riktning på den linjärpolariserade komponenten (eng. *degree of linear polarization* (DoLP) respektive *angle of polarization* (AoP)). Områden med

hög DoLP uppvisar en väldefinierad AoP medan opolariserade, eller svagt polariserade, områden kännetecknas av en slumpmässig AoP, se Figur 34.



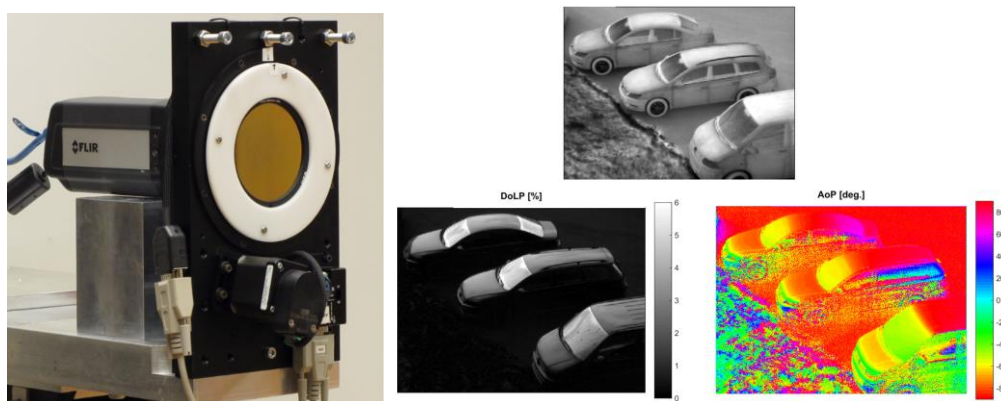
Figur 34. Exempel på data från en termisk polarimetrisk sensor. a) Termisk opolariserad (såsom en konventionell termisk sensor hade registrerat porträttet), b) grad av linjärpolarisation (DoLP) och c) färgkodad polarisationsriktning (AoP). Termiskt emitterad strålning är i samma plan som ytnormalen och sensorn som pilarna visar.

Jämfört med en konventionell, icke polarisationskänslig, sensor orsakar filtreringssteget en dämpning av signalen med upp till en faktor två. Polarisationskänslighet kommer alltså till priset av en lägre signalnivå och därmed något försämrad signal/brus-kvot. Beroende på vilken sensorteknologi som används tillkommer även kostnader i form av lägre tids- eller spatial upplösning samt ofta högre inköpspris eller vikt och systemkomplexitet. På senare år har kommersiellt tillgängliga polarisationskameror för det visuella området börjat dyka upp i högre grad vilket innebär att priserna går ner.

Graden av polarisation som förekommer vid de utomhusmätningar som gjorts ligger generellt i området 0 - 10%, även om betydligt högre nivåer går att hitta. Den polarimetriska signaturen kan alltså förväntas vara betydligt svagare än den opolariserade och de tillämpningar där nytan kanske främst finns rör detektion i klottrig miljö snarare än räckviddsförbättring.

5.2 Polarimetrisk rekonstruktion

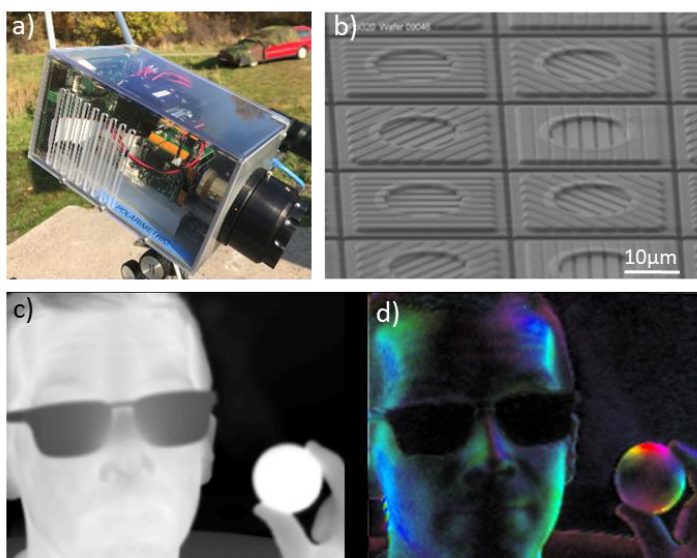
Inom projektet har tidigare ett sensorsystem med roterande polarisationsfilter tagits fram, se Figur 35. [15] Systemet samlar in data i olika polarisationstillstånd sekventiellt enligt division-of-time-principen och lämpar sig därför för statiska scener. Typiska insamlingstider för ett dataset (fyra bilder) ligger på 10-tals sekunder. Kamera och polarisationsfilter för olika våglängdsband är utbytbara efter behov. I projektet har uteslutande det termiska långvågsbandet studerats med systemet.



Figur 35. (t.v.) Sensorsystem med roterande polarisationsfilter. Exempel på inspelad data (t.h.). [15]

Systemet lämpar sig för signatur- och referensmätningar då rutiner för datainsamling samt geometrisk och radiometrisk/polarimetrisk kalibrering finns. Exempel på tillämpningar som undersökts är dygnsvariation av termisk/polarimetrisk signatur, detektion av störd jord/grävspår, detektion genom kamouflage och anomalidetektion mot klottrig bakgrund. Till fördelarna med denna teknik räknas flexibiliteten, den är enkel att anpassa för olika kameror och våglängdsband, samt bildkvalitet då kamerans fulla upplösning kan användas utan rekonstruktion och artefakter.

Det finns en strävan mot snabbare metoder för insamling av polarimetriska data och då allra helst s.k. snapshot-teknologier. Gemensamt för dessa är att scenen registreras i flera polarisationstillstånd samtidigt istället för sekventiellt som t.ex. en sensor med roterande filter gör. Genom ett VINNOVA-finansierat samarbetsprojekt med IRnova har FOI deltagit i utvecklingen av en polarimetrisk ögonblickskamera med kvantbrunnsdetektor (QWIP) för det långvågiga termiska IR-bandet, se Figur 36a och b. Med 1D-gitter på pixelnivå registreras, enligt division-of-focal-plane-principen, samtidigt fyra polarisationsriktningar. Detta medger avbildning av dynamiska scener och rörlig kamera. Polarimetriska innehållet beräknas utifrån information från fyra grannpixlar med olika filtrering över hela scenen. För denna typ av sensor finns alltså begränsningen att ett objekt måste registreras av fyra pixlar för att kunna analyseras, dvs. den spatiala upplösningen reduceras jämfört med den ofiltrerade sensorn. I Figur 36c och d visas ett exempel från en dynamisk scen där sensorsystemet med roterande filter inte fungerar.

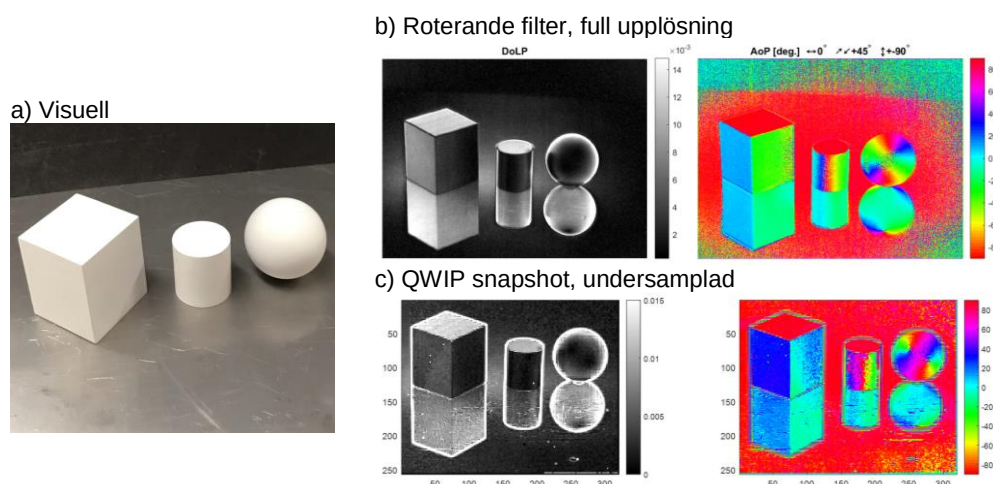


Figur 36. a) IRnovas demonstrationskamera för termisk-polarimetrisk avbildning. b) visas SEM-mikrograf av polariserande gitter i fyra olika riktningar på baksidan av pixelelementen på QWIP-sensorn. Exempel på från en dynamisk scen visas i c) termisk bild och d) motsvarande fusionerad termisk/polarimetrisk bild.

Motsvarande teknologi med polarisationsfilter i varje pixel för det visuella våglängdsområdet finns kommersiellt tillgänglig idag och FOI har två sådana kameror. En insamlings- och visualiseringsrutin med stöd för olika kameror med pixellerade filter är utvecklad inom projektet. Programvaran kan köras på enkortsdator med batteridrift och har demonstrerats i både handhållna och drönarmonterade konfigurationer.

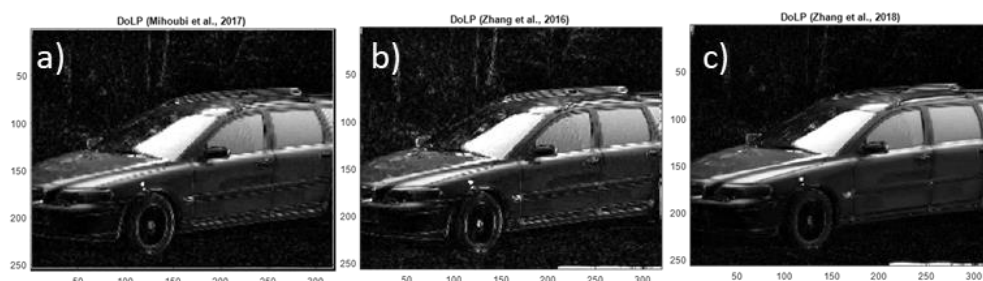
Kostnaden för förmågan till ögonblicksbilder kommer i fallet med pixellerade filter som lägre spatial sampling. Rekonstruktionen försvåras av att de olika filtrerade pixlarna samplar olika punkter i scenen. Delar av scenen som innehåller höga spatiala frekvenser, t.ex. kanter eller punktmål, orsakar artefakter. Figur 37 visar en jämförelse mellan data från sensorn med roterande filter som samplar scenen långsamt men i full upplösning och IRnovas

polarimetriska QWIP-sensor med pixellerat filter. Artefakter syns tydligt i områden med kanter och även vid de små reporna i underlaget i bilderna från QWIP-sensorn. I jämförelsen mellan sensorerna ska man observera att sensorn med roterande filter har fler pixlar jämfört med QWIP-sensorn och bilderna från den förstnämnda sensorn dessutom är uppbyggd av åtskilliga mätningar av scenen medan bilderna från QWIP-sensorn kommer från en enskild exponering av scenen. Brusnivån skiljer sig därför markant.



Figur 37. Exempel på rekonstruktionsartefakter i en scen med tre högreflekterande geometriska föremål på en reflekterande metallskiva. I a) visuell vy. Rekonstruerad grad av polarisation och polarisationsriktning från termiska sensorer med b) roterande filter och full upplösning samt c) pixellerat filter och undersamplad scen.

Det enda sättet att eliminera artefakterna är att applicera ett lågpasfilter som tar bort det höga frekvensinnehållet innan samplingen. Två exempel på metoder för lågpasfiltrering är mikrosampling av detektorn eller defokuserad optik. Ingen av dessa är dock särskilt attraktiva då man förlorar i upplösning. Det pågår därför arbete på flera håll med olika signalbehandlingsmetoder för att eliminera artefakter i efterhand. Enklare metoder, såsom att applicera oskärpa med olika faltningskärnor fungerar i vissa fall. Något mer avancerade metoder tar hänsyn till innehållet i scenen och försöker rekonstruera längs med kanter istället för tvärs. Exempel på ytterligare mer avancerade metoder är iterativa självlärande algoritmer som utnyttjar likheter hos olika delar av scenen för att på så sätt ge en tätare effektiv sampling. I Figur 38 visas resultaten från rekonstruktion med tre representativa metoder. [16-18]

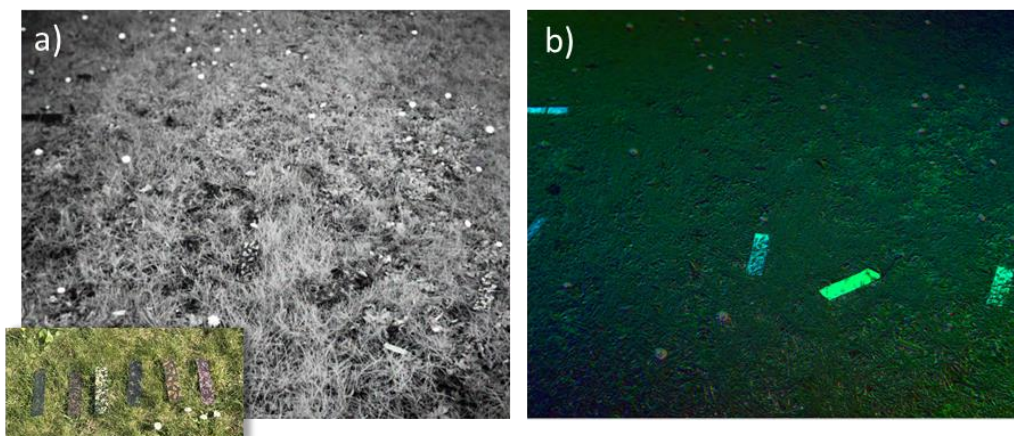


Figur 38. Exempel på DoLP-bilder med olika rekonstruktionsalgoritmer. I a) snabb och enkel viktad bilinjär interpolation [16]. I b) bikubisk spline-interpolation [17] som tar hänsyn till gradienter i bilden. I c) Långsam gles självliknande representation som iterativt använder korrelation mellan olika områden i bilden för att fylla i saknad information. [18]

Framförallt den iterativa metoden som utnyttjar självliknande regioner i bilden, Figur 38c, ger till synes mycket bra resultat men det är i alla dessa fall viktigt att komma ihåg att det är en artificiell rekonstruktion av saknad information. Polarisationsegenskaperna i undersamlade regioner går inte att återskapa utan ytterligare information eller antagande om scenen. Fortsatt forskning på rekonstruktionsmetoder som undertrycker kantartefakter är ändå av stort värde, framförallt på data som ska presenteras för en mänsklig observatör. En intressant riktning för framtiden är att titta på sekvenser av bilder och utnyttja naturliga kamera- och scenrörelser för att höja den spatiala samplingen, likt vad som görs inom super-resolution.

5.3 Bildfusion

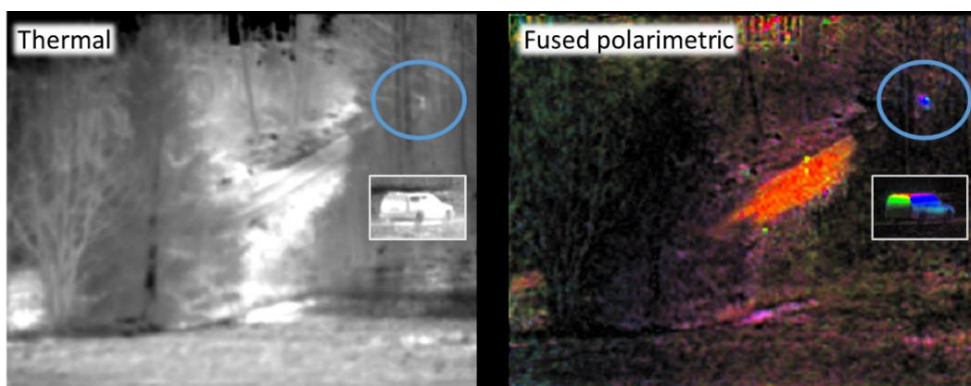
Till skillnad från en datorbaserad detektionsalgoritm, som kan arbeta med flera modaliteter av en scen parallellt, är detektion av en mänsklig observatör begränsad till information om färg och ljusnivå. Det främsta målet för en bildfusionsalgoritm är att hitta karaktäristik i de olika modaliteterna och presentera en sammansatt bild där anomalier framträder på ett så bra sätt som möjligt. Det kan även finnas en vinst om en fusionsalgoritm kan dölja eventuella rekonstruktionsartefakter och presentera en skenbart bättre bild för observatören. Ett vanligt förekommande sätt att presentera polarimetriska bilder är att koda in AoP, DoLP och grånivå i en HSV-färgrymd. Undersökningar har dock visat att det inte är ovanligt att intressanta föremål har lägre DoLP än omgivningen. I många fall är det inte anmärkningsvärt hög eller låg DoLP som karaktäriserar anomalier utan snarare det faktum att polarisationen är relativt homogen över den intressanta ytan eller att AoP avviker från omgivningen. En naturlig klottrig miljö, med hög grad av lokal polarisationsvarians, kan alltså kännetecknas av både hög och låg DoLP men ofta också av slumpmässigt varierande AoP. Lokal varians, både i grad av polarisation och även polarisationsriktning, har funnits vara effektiva markörer, framförallt vid anomalidetektion mot en naturlig bakgrund. Områden där polarisationsegenskaperna varierar långsamt kan t.ex. färgläggas i en bild för att markera för en observatör. Exemplet i Figur 39 visar metoden för några plastföremål som kan skönjas i den visuella bilden men som, på grund av kamouflagemönstret, är svåra att särskilja från omgivningen.



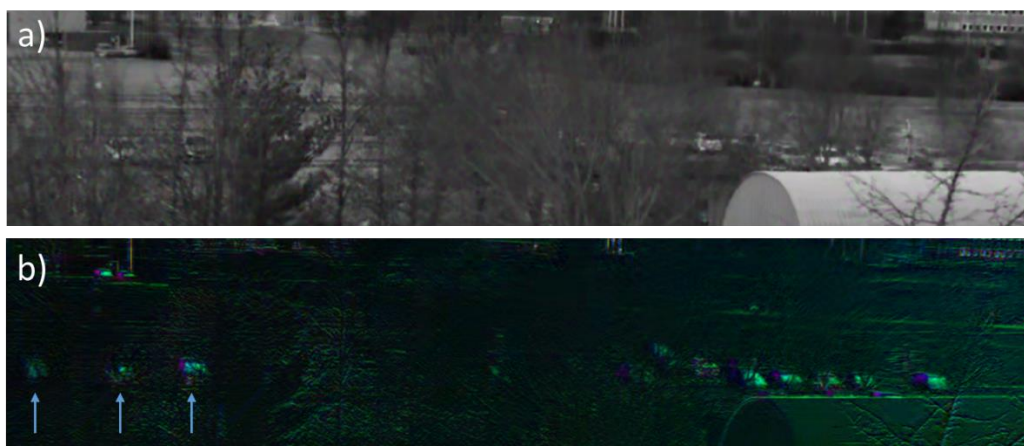
Figur 39. Plastremсор med olika kamouflagemönster mot gräsbakgrund. I a) visas en pankromatisk visuell bild med fem plastremсор utspridda. Den infälda bilden visar ett färgfoto av de olika remсорna. I b) visas motsvarande fusionerad visuell/polarimetrisk bild.

Liknande exempel som ovan finns för andra plast- och metallföremål eller kablar som av olika skäl är svåra att urskilja från omgivningen. Fusionsmetoden är särskilt effektiv på delvis dolda föremål där förgrunden, t.ex. gräs eller träd, bryter upp den geometriska strukturen och en observatör inte kan leta efter kanter eller andra karaktäristiska drag.

Exempel på detektion av bilar visas i det termiska långvågsbandet, Figur 40, och i det visuella bandet, Figur 41.



Figur 40. Exempel på förbättrad detektionsförmåga med fusionerad termisk/polarimetrisk kamera. Konventionell termisk (t.v.) och fusionerad termisk/polarimetrisk (t.h.) med vy mot en skogsväg där en bil syns delvis dold (inringad) bakom ett skogsparti. De infällda bilderna visar bilen. Registreringen är gjord med IRnovas polarimetriska QWIP-kamera.



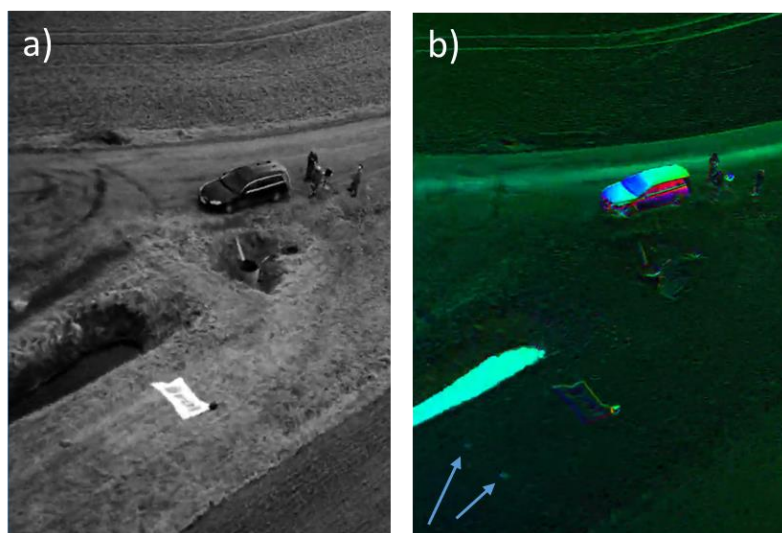
Figur 41. Exempel på förbättrad detektionsförmåga med fusionerad visuell/polarimetrisk kamera. I a) visas en konventionell visuell vy mot en parkering med bilar som delvis är skymda av ett trädparti i förgrunden. I b) visas motsvarande fusionerade polarimetriska bild. Några av bilarna är markerade med blå pilar.

Fortsatt utveckling av fusionsalgoritmer för presentation av polarimetrisk data pågår. Intressanta utvecklingsspår är t.ex. blandning av spatiala frekvenser, där högfrekvent innehåll från den konventionella bilden blandas med lågfrekvent innehåll från de polarimetriska bilderna. Förhoppningen är att det ska dölja eventuella rekonstruktionsartefakter. Kombinerat med vidareutveckling av metoder för polarimetrisk anomali-detektion kan det ge en förbättrad förmåga att urskilja intressanta föremål i en klottrig miljö.

5.4 Samarbeten

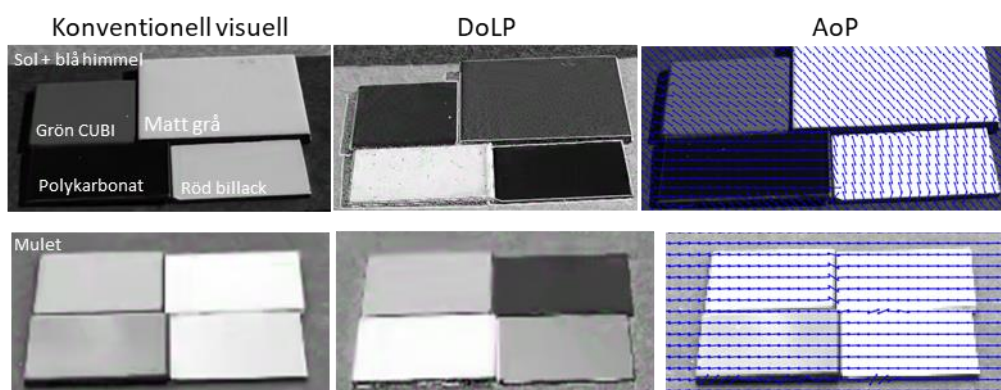
Samarbetet med IRnova kring den polarimetriska QWIP-sensorn har redan nämnts. Erfarenheter från arbetet inom FoT om polarimetrisk analys har gjort att FOI kunnat bidra till samarbetsprojektet med kunskap om metoder för kalibrering, rekonstruktion och presentation.

Inom FOI har samarbete inom polarimetrisk avbildning bedrivits med FoT-projektet Detektion av IED där polarimetriska kameror för det visuella området använts från drönarplattformar, se Figur 42.



Figur 42. Polarimetrisk detektion från drönare i samarbete med projektet Sensorer för C-IED. Konventionell visuell bild i a). Fusionerad visuell/polarimetrisk bild i b). Bilen, ett vattenfylld dike och två utlagda plastföremål (blå pilar) syns tydligt.

Tillsammans med FoT-projekten Signaturmodellering och Signaturmaterial genomförs en studie för att undersöka hur polarimetriska signaturer kan modelleras och karaktäriseras på labb eller i fält. Speciellt i det visuella våglängdsbandet är sambandet intressant då reflekterad himmelsstrålning, som är polariserad, gör att polarisationssignaturen från en yta kan ändras beroende på i vilken riktning solen står. I samband med detta har en fältstudie gjorts för att samla in underlag till modellutveckling med målsättningen att kunna förutsäga polarimetrisk signatur för olika material i olika situationer, se Figur 43.



Figur 43. Fyra horisontella provtyper med olika glans, avbildade i 60 graders betraktelsesvinkel utomhus en dag med sol och klarblå himmel (överst) respektive mulet (nederst). DoLP och AoP för de olika ytorna påverkas olika i de olika belysningsfallen. Horisontell polarisation hade förväntats från provtyperna i scenen men de diffust spridande ytorna påverkas tydligt i olika grad av den polariserade himmelsstrålningen (blå himmel, övre raden).

5.5 Referenser

- [15] J. Eriksson, D. Bergström, och I. Renhorn, "Characterization and performance of a LWIR polarimetric imager", *Proc. SPIE*, Vol. 10434, sidor 1043407-1-16, 2017.
- [16] S. Mihoubi, P.-J. Lapray, och L. Bigué, "Survey of demosaicking methods for polarization filter array images", *Sensors*, Vol. 18, Nr. 11, sidor 3688:1-20, 2018.
- [17] J. Zhang, H. Luo, B. Hui, och Z. Chang, "Image interpolation for division of focal plane polarimeters with intensity correlation", *Optics Express*, Vol. 24, Nr. 18, sidor 20799-20807, 2016.
- [18] J. Zhang, H. Luo, R. Liang, A. Ahmed, X. Zhang, B. Hui, och Z. Chang, "Sparse representation-based demosaicing method for microgrid polarimeter imagery", *Optics Letters*, Vol. 43, Nr. 14, sidor 3265-3268, 2018.

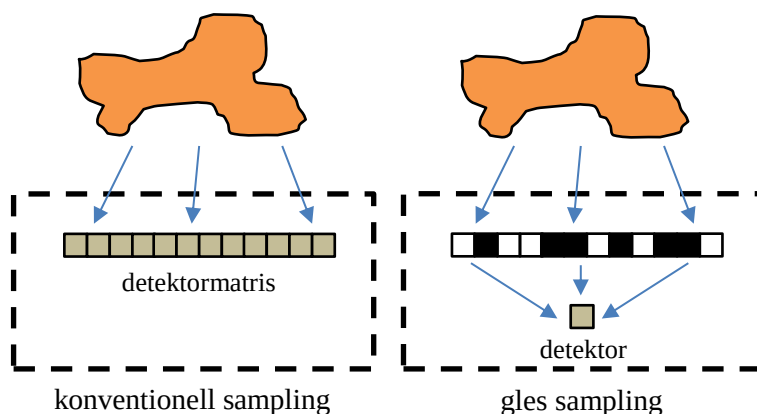
6 Compressive imaging

Arbetet inom teknikområdet Compressive Imaging har under perioden inriktats mot vidareutveckling av några olika mätuppställningar baserade på ett koncept för en enpixelkamera i SWIR-området. Systemen har värderats i olika tillämpningar, med speciellt fokus på detektion av korta ljuspulser och mynningsflammar. Arbetet har bland annat presenterats på en Nato-workshop (SET-265). Innan projektresultaten presenteras följer först en kort introduktion och bakgrund till ämnet.

6.1 Teknisk orientering och bakgrund

Compressive Sensing (CS) är ett relativt nytt teknikområde i gränslandet mellan sensorteknik, signalbehandling och matematik. Tekniken innehåller ett metodramverk för hur och med vilken noggrannhet högupplöst data kan estimeras ur ett fåtal mätpunkter av en signal genom användning av nya smartare mätstrategier och signalrekonstruktionsmetoder. I avbildningssammanhang kallas tekniken Compressive Imaging (CI) och beskriver metoder för hur information från punkter i en scen kan mätas in och återskapas, med mycket färre mätningar än antalet önskade pixlar i resulterande bild.

En förutsättning för att CS och CI ska lyckas är att signalen som ska mätas innehåller redundant information (är informationsgles eller komprimerbar). Det är en lyckosam omständighet att de flesta signaler vi människor är intresserade av faktiskt är glesa eller komprimerbara i något avseende. Ett konkret bevis på detta är framgången hos moderna bild- och videokompressionsmetoder som kan reducera storleken på bilder och videosekvenser 10 - 100 ggr utan någon försämring av upplevd bildkvalitet. Att mäta med en sådan hög samplingstäthet och sedan kasta bort en så stor andel av uppmätta data vid efterföljande komprimering är dock ett stort slöseri och CS/CI föreslår istället att med sparsamhet som motiv mäta en komprimerad representation direkt. För att åstadkomma detta införs en ny mätstrategi, där linjära och oberoende projektioner av data mäts istället för en direkt punkt-till-punkt-kopia av mätobjektet så som hos konventionella mätmetoder (se illustration i Figur 44). [19]



Figur 44. Principiella skillnaden mellan traditionell sampling (vänster) med stort antal mätpunkter/detektorer i en matris och gles sampling (höger) med slumpmässiga projektioner mot en enskild detektor (eller ett fåtal). [19]

Linjära och oberoende projektioner åstadkoms genom att insignalen moduleras (varieras) på något förutbestämt sätt innan den samplas. Ett vanligt sätt är att använda slumpmässiga variationer vid denna signalmodulation. Med kunskap om införd signalmodulering kan signalen sedan återskapas eller rekonstrueras med en algoritm som är anpassad mot den

specifika modulationen. Matematiskt innebär signalrekonstruktionen att hitta lösningen till ett underbestämt linjärt system av ekvationer, där det finns fler obekanta storheter än tillgängliga ekvationer eller mätpunkter. Enligt grundläggande matematisk teori saknar dessa typer av problem en unik lösning, men teorin inom CI lär oss att en delmängd av dessa problem faktiskt går att lösa om det vi eftersöker har gleshet och komprimerbarhet.

De största fördelarna som CI tillför, jämfört med konventionell avbildningsteknik, är att tekniken reducerar krav på hårdvara, energiåtgång, lagring och kommunikation. Tekniken ger också tillgång till högre upplösning av data inom områden där den tekniska utvecklingen kanske inte kommit så långt ännu, exempelvis för avbildning inom mer exotiska våglängdsband där endast enskilda detektorelement eller lågupplösta pixelmatiser hittills tagits fram (så som i THz-området). Tekniken innebär även stor potential för snabbare och enklare insamling av multidimensionella data, så som hyperspektrala, polarimetriska och tredimensionella bilddata, där konventionella mätmetoder är långsamma p.g.a. tidskrävande skanningsprinciper.

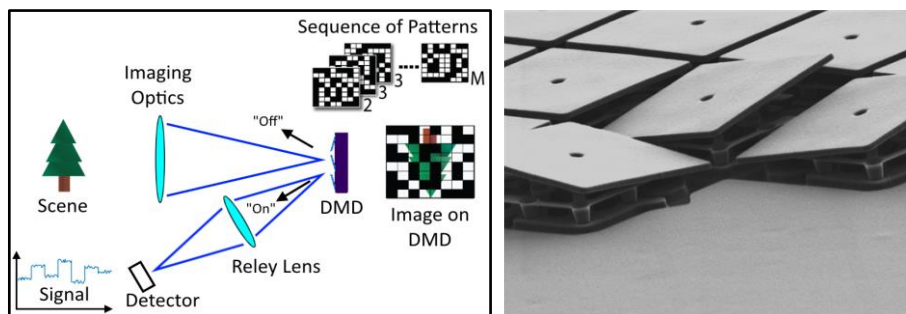
De största nackdelarna och framtida utmaningarna för teknikområdet är det ökade beräknings- och minneskravet som uppstår vid signalrekonstruktionen. En ny och lovande forskningsinriktning i sammanhanget är att utnyttja ansatser från djup maskininlärning, vilka verkar ha potential såväl för utveckling av nya och mer beräkningseffektiva rekonstruktionsalgoritmer [20, 21], som för upptäckt av avvikande förändringar (anomalier) redan i indatasignalen utan att någon fullständig bildrekonstruktion behövs. [22]

Med tanke på för- och nackdelar med tekniken bedöms CI ha högst potential för tillämpningar med hårda krav gällande storlek, vikt, effektförbrukning och kostnad för insamlingssystem och plattform, men där frihet ges att kunna exploatera sensordata på annan plats där kravbilden kan se annorlunda ut. Exempel skulle kunna vara sensorer ombord på mindre obemannade plattformar (UAV, UGV, mikrosatelliter, mm.) eller sensorer för övervakning med hög uthållighet, där sensorerna behöver vara små och energisnåla men där data kan länkas över till en separat och oberoende exploateringsstation för rekonstruktion och vidare analys.

6.2 Utveckling av enpixelkameror i SWIR

Under treårsperioden har projektet arbetat med utveckling av flera olika mätsystem, alla baserade på ett koncept med en enpixelkamera i SWIR-området. Den huvudsakliga orsaken till valt våglängdsområde har varit tillgången till lättöverkomliga och billiga komponenter samt det faktum att högupplösta kameror i SWIR fortsatt är relativt dyra (> 150 kkr för VGA-upplösning eller bättre).

En enpixelkamera, se skiss i Figur 45, består av en kodad optisk apertur som avbildar linjära projektioner av en scen på en enskild detektor (fotodiod) för efterföljande rekonstruktion i en justerbart hög upplösning. Ett vanligt sätt att åstadkomma en kodad apertur är att låta infallande ljus från scenen fokuseras på en reflekterande mikrospiegelmatris (*eng.* digital micromirror device eller DMD). En DMD (se bild i Figur 45) utgörs av en matris av små mikrospelar som kan riktas i två lägen, mot detektorn ("på") respektive från detektorn ("av"). Genom att slumpmässigt variera dessa mönster av spegelinställningar, erhålls binära mätmatriser som utgör de linjära projektioner som bildrekonstruktionen kräver.



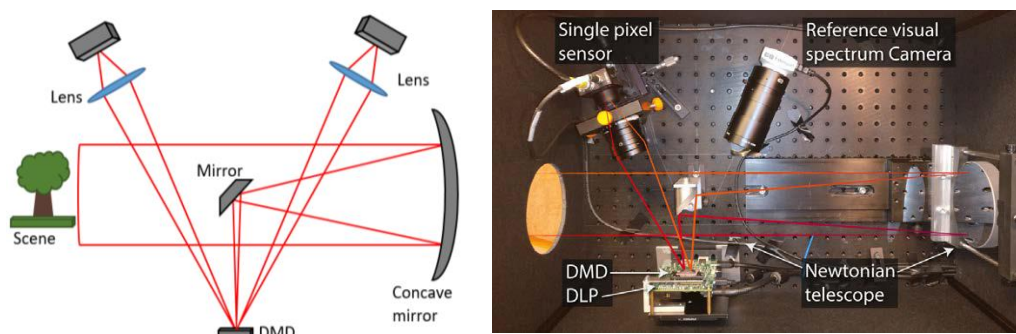
Figur 45. (vänster) Skiss på en singelpixelkamera, där scenen fokuseras på en mikrospjelmatriks (DMD) som växlar mellan olika slumpmässiga mönster (mätmatriser). En detektor summerar ljuset från alla mikrospjelar som står i läge "på". Den uppmätta signalen från detektorn utgörs av ett pulståg som sedan kan återställas till en bild med hjälp av en rekonstruktionsalgoritm. (höger) Bild på uppförstorad del av DMD-matris.

Vid bildrekonstruktionen används vanligen en standardalgoritm vid namn TVAL3, som bygger på minimering av gradienter (riktningsförändringar av intensitet) med hjälp av konceptet Total Variation. TVAL3 har visat sig hantera naturliga bilder med innehåll av skarpa kanter och jämna ytor väldigt bra, men det finns även alternativa rekonstruktionsalgoritmer som kan vara mer lämpliga i andra sammanhang. Komprimeringen i den rekonstruerade bilden kan sedan mätas med begreppet samplingskvot (*eng.* sampling ratio, förkortad SR), som anger antalet mätningar (eller använda mätmatriser) dividerat med antalet pixlar i den återställda bilden. En högre samplingskvot innebär generellt sett en högre bildkvalitet, på bekostnad av en längre mättid. Bildkvaliteten ökar dock endast upp till viss en gräns, där ytterligare mätningar sedan inte tillför mer information. Gränsen för när bildkvaliteten är tillräckligt hög beror på informationsglesheten i scenen som avbildas, ju glesare desto färre mätningar behövs. Gränsen beror även på vad bilden ska användas till, exempelvis kräver detektion inte lika hög bildkvalitet som klassificering eller identifiering. Enpixelkameror har tagits fram både i det visuella området [23] och i IR-området [24].

Nedan presenteras två av de mätsystem som tagits fram i projektet för studier kring möjliga tillämpningar för CI i allmänhet och för enpixelkameror i SWIR i synnerhet.

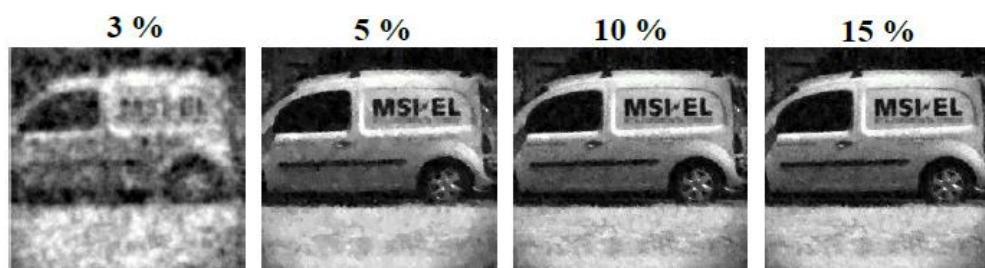
6.2.1 Multispektral enpixelkamera med reflektiv optik

Ett mätsystem med en enpixelkamera baserad på reflektiv (spjelmaterad) optik togs fram tidigt i projektet. Reflektiv optik har fördelen att alla våglängder fokuseras på samma sätt, utan kromatisk aberration, vilket ger skarpere bilder vid avbildning över ett bredare spektralband. En annan fördel är att systemet kan verka multispektralt, dvs. titta i flera spektralband samtidigt, med god pixel-till-pixel-matchning mellan spektralbanden. Spjelo-optiken hade fokallängden 443 mm (F/4.1), vilket gav systemet ett synfält av ca 22×13.5 μ rad (ca en tusendels grad) och därmed en relativt lång räckvidd i förhållande till många liknande system som tagits fram. Enpixelkameran byggdes med möjligheten att använda antingen en eller två detektorer, se skiss och bild på systemet i Figur 46.



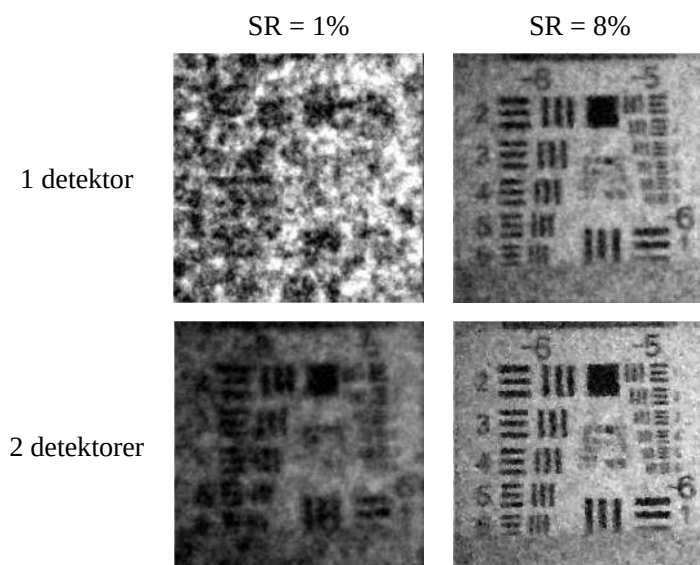
Figur 46. T.v. skiss på en enpixelkamera med reflektiv (newtonsk) optik och två detektorer, en i vardera reflektionsriktningen från DMD-matrisen. T.h. bild på den fysiska mätuppställningen. [25, 26]

Den tidiga prototypen använde en billig och relativt långsam DMD-matris (DLP4500EVM från Texas Instruments), där mätmatriser kunde strömmas till systemet i 1440 Hz. DMD-matrisen har 1140 x 912 mikrospeglar med spegelavståndet 10.8 μm . För avbildning i SWIR användes en eller två fotodioder i indium gallium arsenid (PDA20C/M från Thorlabs). I Figur 47 visas bildexempel från SWIR, där endast en fotodetektor använts. Bilderna visar tydligt hur bildkvaliteten successivt förbättras vid ökande samplingskvot (efter fler mätningar). Med en fotodetektor erhålls normalt en relativt god bildkvalitet vid en samplingskvot på ca 10% (något beroende av scen- och ljusförhållanden), med högre samplingskvot är förbättringarna ringa.



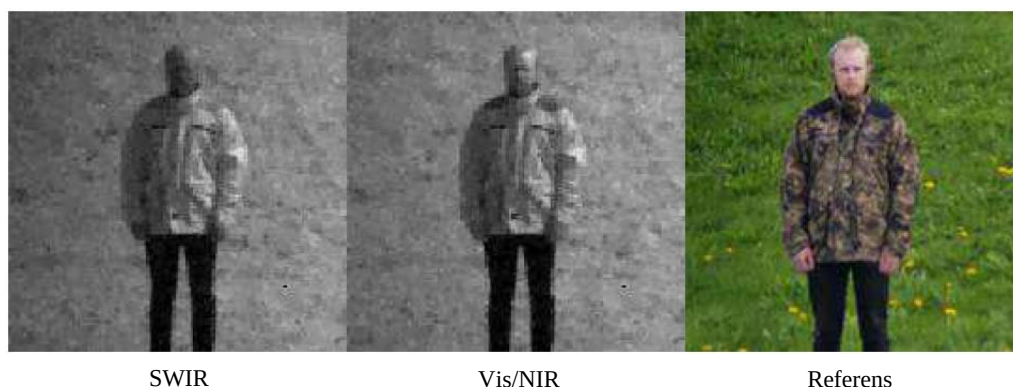
Figur 47. SWIR-bilder tagna med mätsystemet (med en detektor) i 512x512 pixlar upplösning med olika samplingskvot (antal mätningar per pixel). Samplingskvoterna 3%, 5%, 10% och 15% motsvarar 5, 9, 18 respektive 27 sekunders insamlingstid för det aktuella systemet i den aktuella upplösningen. [25, 26]

Användandet av två detektorer gör att signal-till-brus-förhållandet kan ökas, genom att man bättre utnyttjar det infallande ljuset (med endast en detektor kastas hälften av ljuset bort). Figur 48 visar en mätning av en referenstavla för jämförelser mellan en respektive två detektorer, för samplingskvoterna 1 respektive 8%. Bildkvaliteten visar en tydlig förbättring vid användning av två detektorer. Eftersom bättre bildkvalitet uppnås efter färre mätningar med två detektorer, innebär detta att systemet kan köras i en högre bildtakt och med kortare insamlingstid. Två detektorer gör också systemet mer robust för förändringar i scenen, exempelvis på grund av ändrade ljusförhållanden, rörelser eller optisk turbulens, genom att både signalen och dess komplement mäts upp och kan kombineras för korrektion av olika bakgrundsförändringar.



Figur 48. SWIR-bilder tagna av en referenstavla i 512x512 pixlar upplösning med samplingskvoterna 1% respektive 8%, för 1 respektive 2 detektorer. [25, 26]

Två detektorer möjliggör även multispektral avbildning genom att använda detektorer med känslighet i olika spektralband. Vid test av multispektral förmåga byttes en av SWIR-detektorerna ut mot en kisel-detektor med känslighet i det visuella och nära infraröda våglängdsområdet (PDA36A från Thorlabs, med känslighet i 300-1100 nm). Figur 49 visar bildexempel tagna med systemet i denna multispektrala mod, tillsammans med en visuell referensbild från en vanlig RGB-kamera. Nyansskillnader i bilder från enpixelkameran, exempelvis i hud och i kläder, beror i detta fall av olika spektral innehåll i de båda spektralbanden.

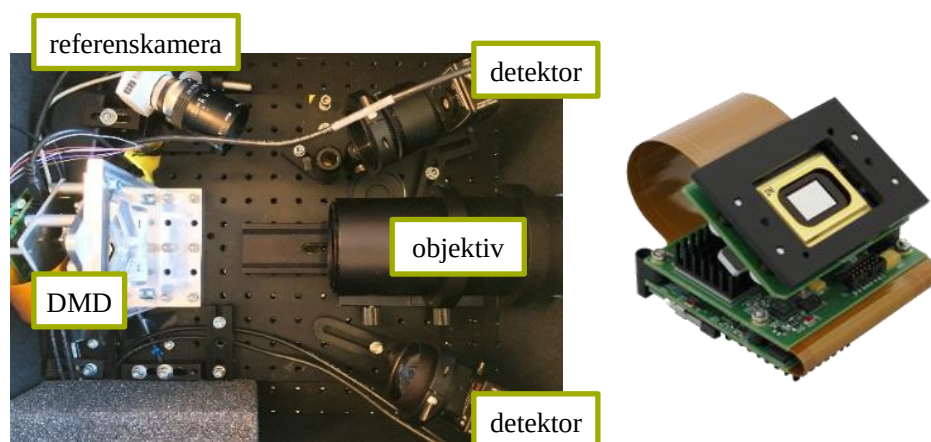


Figur 49. Bilder i 128x128 pixlars upplösning från multispektralt mätsystem med detektorer i SWIR (800-1700 nm) och Vis/NIR (350-1100nm), tillsammans med en referensbild från en vanlig visuell RGB-kamera. [25, 26]

6.2.2 Snabb enpixelkamera för detektion av mynningsflammar

En nackdel med den första prototypen var den långsamma insamlingstiden, vilket innebär att avbildade scener måste vara relativt stationära för avbildning vid högre upplösning. För att snabba upp systemet införskaffades därför en ny DMD-matris från tyska Vialux (Vialux V7000-VIS), med möjlighet att strömma binära spegelmönster med hela 22.3 kHz (dvs. 15 ggr snabbare än tidigare använd DMD). DMD-matrisen har 1024 x 768 mikrospeglar med spegelavståndet 13.7 μm . Strömning tillåts från en extern dator eller från ett internminne med ett lagringsutrymme om 21845 binära spegelmönster. I det nya systemet används två detektorer av samma typ som i det tidigare beskrivna systemet, men spegeloptiken är utbytt mot ett objektiv med transmission i både Vis/NIR och SWIR. Objektivet har fokallängden

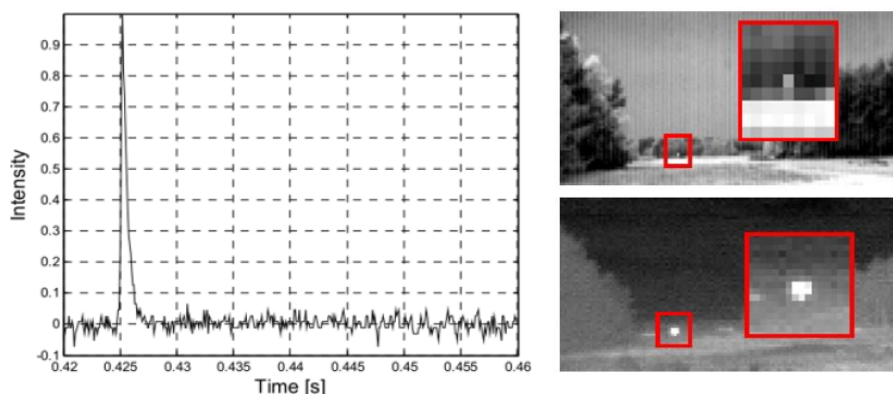
200 mm, vilket ger ett synfält om ca 4 x 3 grader. Förutom att objektivet ger ett större synfält, gör det även systemet mer kompakt i förhållande till det tidigare, se bild i Figur 50.



Figur 50. T.v.: Bild på modifierat system, med objektivet som fokuserar scenen på DMD-matrisen där reflekterat ljus går till den ena eller andra detektorn. En visuell kamera (referenskamera) används för upplinjerat av komponenter samt för att ta referensbilder av scener. T.h.: Bild på den snabbare DMD-komponenten (Vialux V7000-VIS).

Inom projektet har systemet utvecklats och testats för detektion och lokalisering av snabba ljuspulser, exempelvis mynningsflammar. Konventionella metoder för så kallad Hostile Fire Detection (HFD) är antingen akustiska, radarbaserade eller optiska (eller en kombination av dessa). [27] Akustiska system finns operativa, men lokaliseringsprecisionen är inte alltid tillräcklig för motåtgärder, som försvaras ytterligare då ljudet kan reflekteras mot t ex en husvägg. En annan nackdel är att ljudet kommer efter projektilen. Radarbaserade metoder kan detektera och spåra själva projektilen, men eftersom ett sådant system är aktivt kan det vara röjande och utgör därmed en risk vid användning. En tredje möjlighet är att använda elektrooptiska metoder, antingen aktiva (laserbaserade) eller helt passiva. Laserbaserade metoder har hög upplösning för detektion av projektil så väl som av optik, men innebär röjningsrisker eftersom det är en aktiv teknik. [28] Passiva metoder går oftast ut på att detektera och lokalisera mynningsflamman.

En mynningsflamma från ett eldhandvapen (exempelvis från ett krypskyttegevär) har en tidslängd av ca 1 millisekund (se exempel i Figur 51), vilket ställer höga krav på snabbhet hos detektionssensor. Mynningsflammar är relativt svaga i det visuella bandet och kan vara svåra att detektera med vanliga kiselbaserade sensorer, särskilt under dagtid (att vapen även kan vara utrustade med flamdämpare gör inte uppgiften enklare). Mynningsflammans signatur är som starkast i det mellanvågiga IR-området (MWIR, 3 - 5 μm), men sensorer i MWIR har nackdelen att de behöver kylas och kan vara stora, tunga, dyra och dra mycket ström. Kameror i SWIR-området lider inte lika mycket av dessa problem, men snabba kameror (>1 kHz) är fortfarande relativt dyra och energikrävande. I många fall är bildtakten ändå inte tillräckligt hög för att kunna lösa upp den korta temporala signaturen hos mynningsflamman, vilket ökar risken för falsklarm från exempelvis solreflexer eller bilstrålkastare. Den stora datamängden som genereras ställer också stora krav på beräkningskraft för analys av alla bilder.

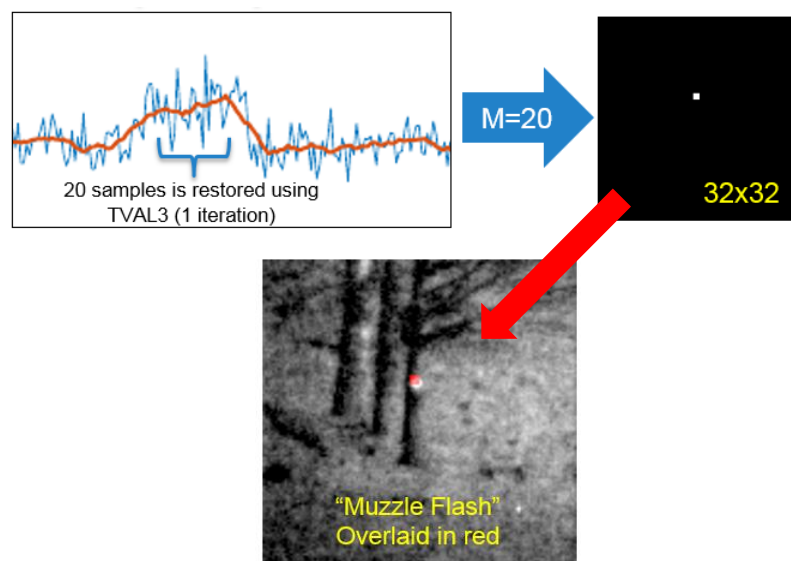


Figur 51. T.v.: Temporal signatur i SWIR för en mynningsflamma från ett eldhandvapen (kaliber 7,62 mm). T.h.: Bilder på mynningsflamma från ett krypskyttegevär på 1000 meters avstånd i SWIR (ovan) och i MWIR (nedan). De röda rutorna markerar vapnets och mynningsflammans position, med infällda uppförstoringar. [27]

Alternativa HFD-system i SWIR har tagits fram baserade på flera (19 st) fotodioder, vardera med egen optik. Att fotodioder används innebär att temporal signatur kan samplas i högre takt, för inmätning av strålningsnivå och reducering av falsklarm. Systemet är även utrustat med akustiska mikrofoner för ytterligare minskning av falsklarmsfrekvens. Systemet är dock relativt stort och tillåter endast en grov lokalisering av mynningsflamman. [27]

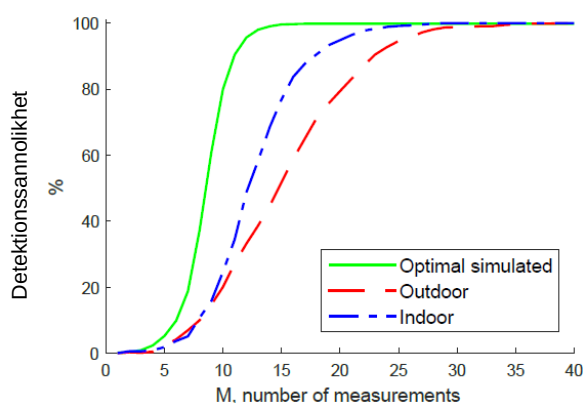
I projektet har den framtagna snabbare enpixelkameran utvärderats för detektion av korta ljuspulser av samma typ som en mynningsflamma. Den höga strömningstakten hos DMD-matrisen (22 kHz) tillsammans med den höga samplingstakten av signalen från fotodetektor (ca 1 miljard sampel per sekund), skapar goda förutsättningar för upplösning av den temporala signaturen hos mynningsflamman, samtidigt som både låg- och högupplösta bilder av scenen kan rekonstrueras för lokalisering av mynningsflamman och för klassificering av hot.

I Figur 52 visas resultat från ett utomhusexperiment på 350 meters avstånd med en simulerad mynningsflamma, i detta fall bestående av en kortare laserpuls. Laserpulsens tydliga lösning i signalen från fotodioden tack vare den höga samplingstakten hos systemet. En klassificering av upptäckta hot kan tidigt göras genom att betrakta råsignalens intensitet och temporala variation, vilket kan matchas mot en tänkbar hotsignatur (exempelvis en mynningsflamma). Genom att subtrahera tidigare uppmätt signal (innan upptäckt hot) kan en bakgrundsreducering av signalen göras. Bakgrundsreduceringen gör signalen glesare och mindre brusig och gör det möjligt att efter endast ca 20 projicerade mätmatriser på DMD (ca 1 ms insamlingstid) lokalisera pulsen i en rekonstruerad lågupplöst bild. Med fler mätmatriser kan även en högre upplöst bild rekonstrueras, vilket exempelvis kan användas för klassificering av hotet eller för att öka den allmänna situationsuppfattningen. [29]



Figur 52. Mätning mot en scen utomhus på avståndet 350 m, där en kort laserpuls belyser en reflex uppsatt i ett träd. Överst t.v.: Signal från fotodiod i enpixelkamera vid strömning av mätmatriser, som visar laserpulsens tydligt upplöst. Överst t.h.: Lågupplöst bild rekonstruerad från endast 20 sampel (mätmatriser) med laserreflex tydligt lokaliserad. Underst: Laserpulsens överlagrad på en bild som rekonstruerats med högre upplösning för förbättrad situationsuppfattning och klassificering av hot. [29]

Figur 53 visar en jämförelse på uppskattad prestanda för detektion och lokalisering med den snabba enpixelkameran, både för simulerade data samt för uppmätta data på laserpulser inomhus och utomhus. Systemet kräver dock ytterligare tillämpningsinriktade studier mot verkliga mynningsflammar för att verkligen bekräfta dess förmåga, men i jämförelse med konkurrerande system kan enpixelkameran systemet göras mycket billigt, strömsnålt, erbjuder stor flexibilitet i val av spektralband, samt temporal och spatiell upplösning. Det är också troligt att systemet kan användas för andra typer av transienta hot, så som reflexer i optik (t.ex. för optikspaning), explosioner eller avfyrning av missiler på långa avstånd.



Figur 53. Uppskattad sannolikhet för detektion och lokalisering av korta ljuspulser med det snabba enpixelkameran systemet. Grön kurva är digitalt simulerade brusfria data. Blå kurva är uppmätta data inomhus på 50 m avstånd. Röd kurva är data uppmätt utomhus under dagtid på 350 m avstånd. För ca 90% sannolikhet krävs ca 12 mätningar för upptäckt och lokalisering av simulerad ljuspuls, ca 20 mätningar för en ljuspuls inomhus och ca 25 mätningar för ljuspuls utomhus.

6.3 Internationella samarbeten

Projektet deltog 2019 i en Nato-arrangerad workshop i Salamanca (Spanien), SET-265 "Compressive Sensing Applications for Radar/ESM and EO/IR Imaging", där ett bidrag om experiment kring detektion och lokalisering av ljuspulser presenterades. [29]

6.4 Referenser

- [19] D. Bergström, C. Brännlund, D. Gustafsson, och A. Brorsson, "Compressed Sensing - En orientering om tekniken och dess potential (AF.9220418)", FOI Memo 6490, 2018.
- [20] C. F. Higham, R. Murray-Smith, M. J. Padgett, och M. P. Edgar, "Deep learning for real-time single-pixel video", *Scientific Reports*, Vol. 8, Nr. 1, sidor 1-9, 2018.
- [21] G. M. Gibson, S. Johnson, och M. J. Padgett, "Single-pixel imaging 12 years on: a review", *Optics Express*, Vol. 28, Nr. 19, sidor 28190-28208, 2020.
- [22] J. Chen, L. Lu, Y. Xu, och K. F. Kelly, "High-speed anomaly detection with single pixel camera", *Imaging and Applied Optics*, San Francisco, California, 2017.
- [23] M. F. Duarte, M. A. Davenport, D. Takhar, J. N. Laska, T. Sun, K. F. Kelly, och R. G. Baraniuk, "Single-pixel imaging via compressive sampling", *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol. 25, Nr. 2, sidor 83-91, 2008.
- [24] L. McMackin, M. A. Herman, B. Chatterjee, och M. Weldon, "A high-resolution SWIR camera via compressed sensing", *Proc. SPIE*, Vol. 8353, sidor 835303-1-10, 2012.
- [25] M. Oja och S. Olsson, "Stand-alone Dual Sensing Single Pixel Camera in SWIR", Examensarbete, LiU-ITN-TEK-A--19/024--SE, 2019.
- [26] M. Oja, S. Olsson, C. Brännlund, A. Brorsson, D. Bergström, och D. Gustafsson, "Dual Single Pixel Imaging in SWIR using Compressed Sensing", *VISIGRAPP (VISAPP)*, Valetta (Malta), 2020.
- [27] J. Krieg, C. Eisele, och D. Seiffer, "Electro-optical muzzle flash detection", *Proc. SPIE*, Vol. 9987, sidor 99870A-1-8, 2016.
- [28] C. Brännlund, J. Tidström, M. Henriksson, och L. Sjöqvist, "Combined hostile fire and optics detection", *Proc. SPIE*, Vol. 8896, sidor 88960I-1-10, 2013.
- [29] C. Brännlund, D. Bergström, A. Brorsson, D. Gustafsson, M. Oja, och S. Olsson, "Detection and localization of light flashes using a single pixel camera in SWIR", *SET-265 RSM on Compressive Sensing Applications for Radar/ESM and EO/IR Imaging*, Salamanca (Spanien), 2019.

Bilaga: Rapporter, vetenskapliga artiklar och konferensbidrag samt examensarbeten

Nedan följer en sammanställning av rapporter, vetenskapliga artiklar och konferens-bidrag och examensarbeten som producerats i projektet under åren 2018-2020.

Rapporter:

David Bergström, Carl Brännlund, David Gustafsson och Andreas Brorsson, "Compressed Sensing – En orientering om tekniken och dess potential (AF.9220418)", FOI Memo 6490, 2018.

David Bergström, "Digitala mörkersensorer – Tekniska förutsättningar och nya operativa förmågor", FOI Memo 6883, 2019.

Stefan Nilsson, David Bergström, m.fl., "UAS ur ett sensorperspektiv – möjligheter och hot", FOI Memo 6845, 2019.

David Bergström, David Gustafsson, Johan Eriksson, Carl Brännlund, Thomas Svensson, Britta Levin, Daniel Svedbrand, Maria Axelsson, Niclas Wadströmer, Henrik Petersson, Linnéa Axelsson, Sebastian Möller, Tomas Hallberg, Christina Åkerlind och Andreas Brorsson, "Avancerade Spaningssensorer 2018-2020 – Slutrapport", FOI-R--5051--SE, 2020.

Konferensbidrag:

Thomas Svensson, David Bergström, Linnéa Axelsson, Martin Fridlund och Tomas Hallberg, "Design, calibration and characterization of a low cost spatial Fourier Transform LWIR hyperspectral camera with spatial and temporal scanning modes", SPIE DCS Defence + Security, Anaheim (USA), 2018.

Thomas Svensson och Tomas Hallberg, "Infrared absorption bands measured with an uncooled interferometric LWIR hyperspectral camera", SPIE DCS Defence + Security, Anaheim (USA), 2018.

Johan Eriksson, David Gustafsson och Niclas Wadströmer, "A polarimetric longwave thermal imager", Svenska bildanalyssymposiet (SSBA), Stockholm, 2018.

Adam Nyberg, David Gustafsson, Henrik Petersson och David Bergström, "Transforming thermal images to visible spectrum images using Deep Learning", Swedish Symposium on Deep Learning (SSDL), Göteborg, 2018.

Adam Nyberg, Abdelrahman Eldesokey, David Bergström och David Gustafsson, "Unpaired Thermal to Visible Spectrum Transfer using Adversarial Training", MULA/ECCV, München (Tyskland), 2018.

Tomas Hallberg, Johan Eriksson, Stefan Björkert och Hans Kariis, "Optical polarization and the dependence of angle of incidence for different surfaces: comparison between different wavelengths from UV to IR", SPIE Security + Defence, Berlin (Tyskland), 2018.

Maria Axelsson, Mikael Lundberg, Staffan Rattfält, David Gustafsson, Henrik Petersson och David Bergström, "Blood trace detection in crime scenes using a hyperspectral camera based on a linear variable filter", WHISPERS, Amsterdam (Nederländerna), 2018.

David Gustafsson, Henrik Petersson, Maria Axelsson och David Bergström, "Spectral cube reconstruction for a high resolution hyperspectral camera based on a linear variable filter", WHISPERS, Amsterdam (Nederländerna), 2018.

David Bergström och Johan Eriksson, "Thermal polarimetric imaging", Quantum Structure Infrared Photodetectors (QSIP), Stockholm, 2018.

Thomas Svensson, David Gustafsson och Niclas Wadströmer, "A low-cost spatial Fourier transform LWIR hyperspectral camera", Svenska bildanalyssymposiet (SSBA), Göteborg, 2019.

Andreas Brorsson, Carl Brännlund, David Bergström och David Gustafsson, "Compressed Imaging at Long Range in SWIR", Scandinavian Conference on Image Analysis (SCIA), Norrköping, 2019.

David Gustafsson, Maria Axelsson, Henrik Petersson, Andreas Brorsson och David Bergström, "Spatial Registration and Spectral Reconstruction of a Linear Variable Filtered Hyperspectral Camera", NATO SET-277 workshop on Phenomenology and Exploitation of Hyperspectral Sensing within NATO, Bryssel (Belgien), 2019.

Maria Axelsson, Niclas Wadströmer, David Gustafsson, Henrik Petersson och David Bergström, "Anomaly detection in hyperspectral LWIR imagery using autoencoders", NATO SET-277 Workshop on Phenomenology and Exploitation of Hyperspectral Sensing within NATO, Bryssel (Belgien), 2019.

Carl Brännlund, Andreas Brorsson, David Bergström, David Gustafsson, Martin Oja och Sebastian Olsson, "Detection and localization of light flashes using a single pixel camera in SWIR", NATO SET-265 Specialist meeting on Compressive Sensing applications for Radar/ESM and EO/IR imaging, Salamanca (Spanien), 2019.

Martin Oja, Sebastian Olsson, Carl Brännlund, Andreas Brorsson, David Bergström och David Gustafsson, "Dual Single Pixel Imaging in SWIR using Compressed Sensing", International Conference on Computer Vision Theory and Applications (VISAPP), 2020.

David Bergström, David Gustafsson, Britta Levin, Daniel Svedbrand och Sebastian Möller, "Assessing Object ID Performance of Digital Night Vision VNIR/LWIR fusion", SPIE D+S 2020, Edinburgh (Skottland), 2020.

Examensarbeten:

Adam Nyberg, "Transforming Thermal Images to Visible Spectrum Images using Deep Learning", Linköpings Universitet (LiU), LiTH-ISY-EX-18/5167-SE, 2018.

Martin Oja och Sebastian Olsson, "Stand-alone Dual Sensing Single Pixel Camera in SWIR", Linköpings Universitet (LiU), LiU-ITN-TEK-A--19/024--SE, 2019.

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



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
164 90 Stockholm

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

www.foi.se