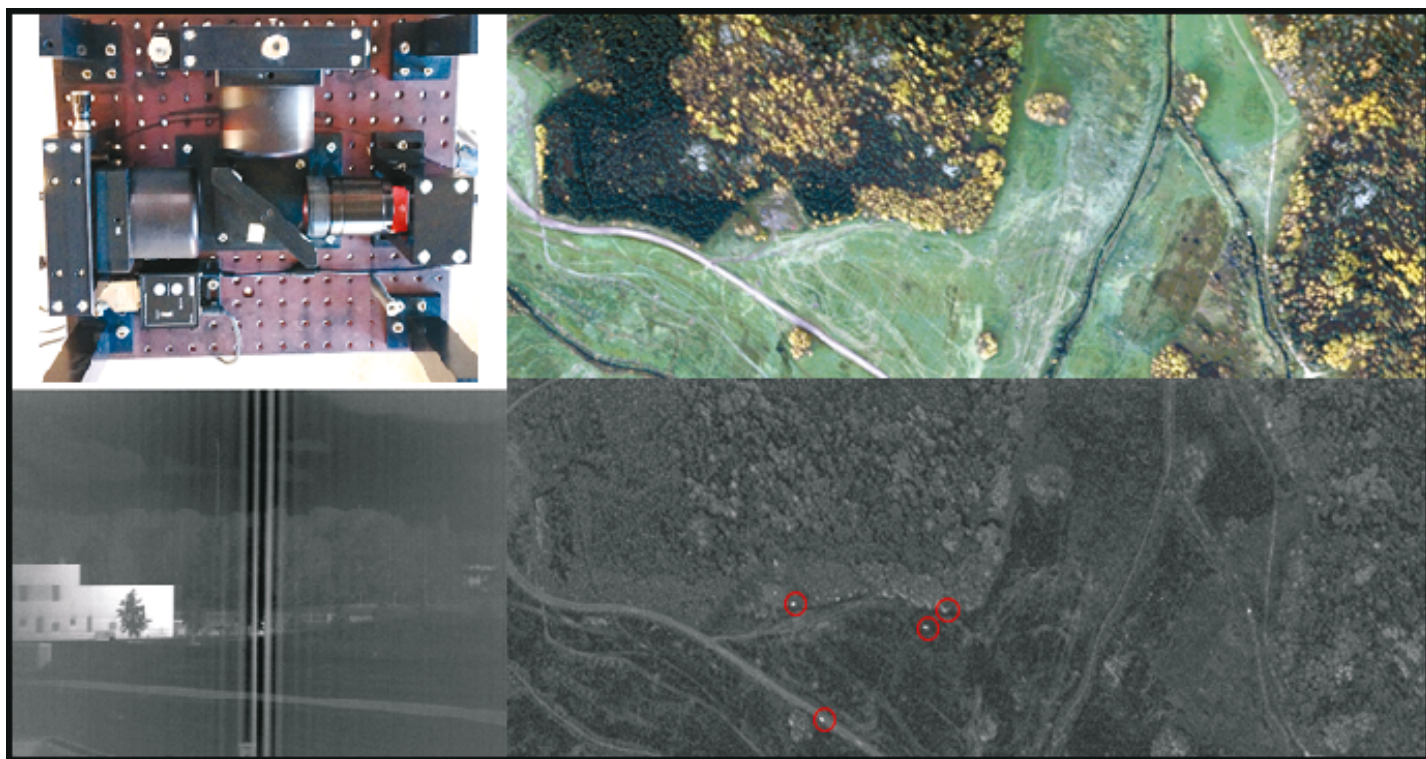


DAVID BERGSTRÖM, MIKAEL LUNDBERG,
DAVID GUSTAFSSON, THOMAS SVENSSON OCH NICLAS WADSTRÖMER



David Bergström, Mikael Lundberg, David
Gustafsson, Thomas Svensson och Niclas
Wadströmer

Hyperspektral avbildning

Statusrapport 2015

Titel	Hyperspektral avbildning - statusrapport 2015
Title	Hyperspectral imaging - status report 2015
Rapportnr/Report no	FOI-R--4150--SE
Månad/Month	November
Utgivningsår/Year	2015
Antal sidor/Pages	35 p
ISSN	1650-1942
Kund/Customer	FM (AF.9220412)
Forskningsområde	7. Sensorer och signaturanpassning
FoT-område	Sensorer och signaturanpassning
Projektnr/Project no	E54562
Godkänd av/Approved by	Martin Rantzer
Ansvarig avdelning	STS

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

Flygburna och satellitbaserade hyperspektrala system för militära tillämpningar har funnits under lång tid. Grundläggande användningsområden är måldetektion och identifiering av militära fordon, kamouflage och tillverkade material samt materialklassad terräng- och marinkartering. På grund av framgångar inom dessa områden har det varit en fortsatt stark utveckling av systemen i ett antal länder, både i Nordamerika, Europa och Asien. Nya mer kompakta och billigare sensortechniker gör att hyperspektral avbildning blir en allt mer realiserbar förmåga även för mindre plattformar så som små UAV:er och i handburna marktillämpningar.

Avancerade Spaningssensorer är ett treårigt FoT-projekt (2015-2017). Årets projektverksamhet har varit inriktad på fortsatt sensorutveckling samt mjukvaru- och algoritminventering inom signalbehandling av hyperspektrala bilddata.

Sensorutvecklingsarbetet sker på två fronter med två olika sensorer i olika våglängdsband. En hyperspektral sensor i långvågiga IR-området har tagits fram, med fokus 2015 på spektrala och radiometrisk kalibreringsfrågor. Ett nystartat utvecklingsprojekt har också påbörjats kring en hyperspektral sensor i det visuella och nära infraröda våglängdsområdet, där en konsumentkamera modifierats med ett specialfilter. Hög spatial upplösning, kombinerad med kompakthet och låg vikt, gör denna sensor unik i jämförelse med de allra flesta tillgängliga sensorer på marknaden.

Inom området signal- och bildbehandling av hyperspektrala data har en inventering genomförts vad gäller några tillgängliga mjukvaror och algoritmer. Den FOI-utvecklade verktygslådan HSI-toolbox, främst avsedd för egna forskningsändamål, har uppdaterats både vad gäller kod för olika algoritmer samt användarmanual. En övergripande värdering har också genomförts av den öppna mjukvaran Opticks och den mer kommersiella SOCET GXP® som idag används av Försvarmaktens bildtolkare. Genomgången har visat en realiserbarhet kring tillägg av hyperspektral funktionalitet i båda dessa mjukvaror.

Under kommande två år kommer projektet att fortsätta sensorutvecklingsarbetet med syfte att kunna demonstrera hyperspektral avbildningsteknik i relevanta operativa scenarier. Studier kommer också att startas upp kring maskininlärning via Deep Learning, i syfte att värdera teknikens potential vid hyperspektral bildanalys.

Nyckelord: *Hyperspektral avbildning, HSI, elektrooptiska sensorer, spaning, spektral kalibrering, radiometrisk kalibrering, signaturnatchning, anomalidetektion, materialklassning, Opticks, SOCET GXP®, HSI-toolbox*

Summary

Aerial and satellite based hyperspectral imaging systems for military applications have been available for a long time. Fundamental applications are target detection and identification of military vehicles, camouflage and man-made materials and terrain classification and mapping. New sensor technologies which are cheap and more compact in size show great promise in providing hyperspectral imaging capabilities to smaller platforms such as UAVs and handheld sensors for ground operations.

Avancerade Spaningssensorer is a three year project (2015-2017), where the activities in hyperspectral imaging during 2015 have been focused on sensor development and inventory and evaluation of software and algorithms for signal and image processing.

An interferometric sensor has been developed in the long wave infrared spectral range, where spectral and radiometric calibration has been the main focus of attention during the past year. A new development project of a consumer camera, modified with a linear variable filter, has also been started. The sensor promises very high spatial resolution with the compactness and low weight of a normal system camera.

In signal and image processing a MATLAB toolbox has been developed at FOI for hyperspectral imaging applications. The toolbox has been updated during 2015 with regards to both algorithm codes and manual. Evaluation has also been made of Opticks and SOCET GXP® for suitability as a graphical user interface for the toolbox as well as for creating plug-ins with hyperspectral functionality.

During the next couple of years, the project will continue the activities in sensor development in order to provide demonstration capabilities of the technology to the Swedish Armed Forces. Studies will also be made in Deep Learning as a potentially new signal processing framework for hyperspectral imaging.

Keywords: *Hyperspectral imaging, HSI, electro-optical sensors, reconnaissance, spectral calibration, radiometric calibration, signature matching, anomaly detection, material classification, Opticks, SOCET GXP®, HSI-toolbox*

Innehållsförteckning

1	Inledning	7
2	Introduktion till hyperspektral avbildning	9
2.1	Multi- och hyperspektrala sensorer	9
2.2	Tekniker för hyperspektral avbildning	10
2.3	Utökade förmågor för Försvarmakten	11
3	Hyperspektral sensorutveckling	15
3.1	Utveckling av hyperspektral LWIR-kamera.....	15
3.2	Utveckling av hyperspektral VNIR-kamera	19
4	Signalbehandling	23
4.1	HSI-toolbox i MATLAB	23
4.2	Opticks	26
4.3	SocetGXP	27
5	Framtida inriktning för projektet	31
5.1	Fortsatt utveckling av den hyperspektrala LWIR-kameran	31
5.2	Fortsatt utveckling av den hyperspektrala VNIR-kameran	31
5.3	Deep Learning för hyperspektrala tillämpningar	32
6	Slutsatser	33
7	Referenser	35

1 Inledning

FoT-projektet Avancerade Spaningssensorer, som pågår under 2015-2017, har som huvudsyfte att stärka FOI:s och Försvarsmaktens kunskap och kompetens inom spaning och övervakning med passiva elektrooptiska sensorer. Projektet upprätthåller också kompetens att kunna ge stöd till FMV vid upphandling och materielanskaffning samt syftar till att bidra till ett ökat samarbete nationellt och internationellt inom området.

Projektet studerar under den aktuella treårsperioden på teknikområden som bedöms ha särskild stor potential att kunna ge FM ny eller förbättrad spaningsförmåga: multi- och hyperspektral avbildning, polarimetrisk avbildning samt nya tekniker för mörkerförmåga. Projektet bedriver studier inom de aktuella teknikområdena med hänsyn tagen till hela den komplexa kedjan från signatur till sensor till mänsklig operatör/användare och har nära samarbeten med andra sensornära FoT-projekt samt kontakter inom Försvarsmakten för att säkerställa relevans i studieverksamheterna.

Denna rapport presenterar det arbete som genomförts under året (2015) i ett arbetspaket inom multi- och hyperspektral avbildning, där fokus legat på egen hyperspektral sensorutveckling samt inventering av signal- och bildbehandlingsmjukvaror och algoritmer anpassade för hyperspektral avbildning. Rapporten inleds med en kort introduktion till teknikområdet med fokus på de nya förmågor som hyperspektral teknik kan tillföras Försvarsmakten, se avsnitt 2 *Introduktion till hyperspektral avbildning*.

Den egna sensorutvecklingen i projektet har bedrivits kring två olika hyperspektrala sensorer i två olika våglängdsområden. En nystartad utveckling av en sensor i det visuella och nära infraröda våglängdsområdet (VNIR) har sjuats med initialt fokus på hårdvaruutveckling tillsammans med samarbetspartners och underleverantörer. I det långvågiga IR-området (LWIR) finns sedan tidigare en prototyp framtagen och här har under året inriktningen legat på kalibreringsfrågor. För ytterligare detaljer kring dessa arbeten se avsnitt 3 *Hyperspektral sensorutveckling*.

Inventeringen inom signal- och bildbehandling som har genomförts, har tittat både på egenutvecklade mjukvaror samt ett par kommersiella och icke-kommersiella alternativ. Inventeringen har syftat till att göra en översyn kring vilka algoritmer som finns tillgängliga samt de olika mjukvarornas tillämpbarhet ur FOI:s forskningsperspektiv. Arbetet kring detta presenteras under avsnitt 4 *Signalbehandling*.

Rapporten avslutas med en diskussion om projektets framtida verksamheter (se avsnitt 5 *Framtida inriktning för projektet*) samt slutsatser (se avsnitt 6 *Slutsatser*).

2 Introduktion till hyperspektral avbildning

Nedan följer en kort bakgrund till vad en hyperspektral sensor är för något samt några exempel på applikationer där denna teknik kan ge en förbättrad lägesbild jämfört med konventionella sensorer.

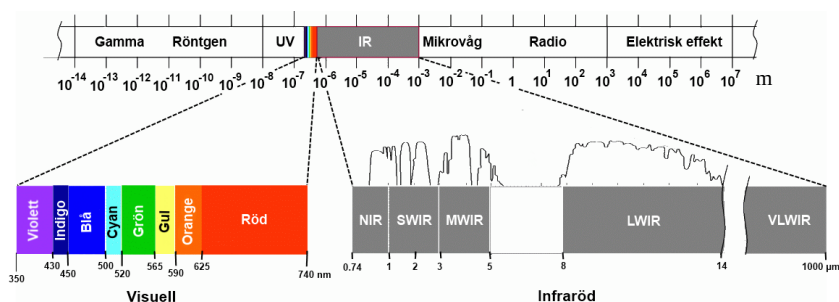
2.1 Multi- och hyperspektrala sensorer

En vanlig digital konsumentkamera har en sensor som avbildar en scen med de tre färgerna rött, grönt och blått. Den digitala färgbilden består av en datamatrix av pixlar (bildelement) i höjd och bredd där varje enskild pixel innehåller en mätning av de tre färgerna rött, grönt och blått vilket sammantaget ger en beskrivning av pixelns visuella färg. Den relativa signalstyrkan mellan de tre färgkanalerna specificerar olika färger. Exempelvis motsvarar en grön pixel en mätning där signalen är högre i det gröna bandet än i de två andra, en pixel som domineras av blått och rött blir violett och en pixel där alla tre värden är likvärdiga uppfattas som grå. Denna typ av kamera är en *multispektral* sensor som mäter i flera våglängdsband. En *monokrom* (svart-vit) kamera däremot mäter i endast ett våglängdsband och kan därför inte skilja mellan olika färger.

Med en konventionell spatialt (rumsligt) högupplöst färgkamera kan en människa diskriminera mellan olika objekt utifrån deras färg och form. Ofta kan vi dessutom med relativt stor säkerhet tolka vilket material objekten är gjorda av genom att sätta objekten i sitt sammanhang. Vi kan exempelvis säga att det vi ser i bilden är en gräsmatta eftersom den är grön och har samma struktur som en gräsmatta. Eller kan vi verkligen det? Skulle det inte lika gärna kunna vara konstgräs? Och är den där busken i bilden verkligen en buske? En metod som visat sig effektiv för att t.ex. kunna diskriminera mellan olika mål är att använda en hög spektral upplösning – hyperspektral avbildning.

Med en *hyperspektral* kamera avbildar man en scen i separata, smala våglängdsband, där antalet spektralband kan uppgå till flera hundra. Varje pixel motsvaras istället för färgerna rött, grönt och blått av en mer högupplöst spektral signatur (ett *spektrum*) över de spektralband sensorn mäter. Utseendet på detta spektrum är fysikaliskt kopplat till de material som faktiskt avbildats. Genom att jämföra dessa spektrum mot kända referenser är det möjligt att materialklassificera objekten i bilden.

Hyperspektrala sensorer existerar för hela det optiska våglängdsområdet, från det ultraviolette vidare till det visuella och nära infraröda till det termiskt infraröda området. Figur 1 visar en presentation över de elektromagnetiska våglängdsbanden där det optiska området ligger i våglängdsintervallet 10 nm - 1000 µm och omfattar ultraviolett (UV), visuellt (violet till rött) samt infrarött (IR).



Figur 1: Grafisk presentation av de olika våglängdsområden som omfattas av det optiska våglängdsområdet från ca 10 nm till 1000 µm (den undre skalan) och hur dessa är relaterade till andra spektralområden som röntgen, mikro- och radiovågor (den övre skalan; notera att våglängden här ges i enheten [m]).

Det senaste decenniets lavinartade utveckling av sensorer för konsumentkameror gagnar även de hyperspektrala sensorer som opererar i eller nära det visuella våglängdsbandet, vilka därför blivit billigare, mer högupplösta och ljuskänsliga. Hyperspektrala sensorer längre upp i det termiska området blir vanligtvis mer komplicerade, tyngre och dyra, men detta ska vägas mot att de är spektralt bättre anpassade för detektion av vissa specifika material och objekt (ex. gaser och mineraler men också kamouflage som ofta är bättre anpassade för kortare våglängder) samt att de inte bara kan användas dagtid utan även nattetid.

2.2 Tekniker för hyperspektral avbildning

Det finns ett antal olika metoder för att separera elektrooptisk strålning i spektralband. Tre klassiska huvudprinciper för att separera strålning i smala band för hyperspektrala sensorer är sensorer baserade på **filter**, **dispersion** samt **interferometri**.

I hyperspektrala sensorer som använder **filter** sker spektral separering genom selektiv filtrering av strålningen, med transmission av vissa våglängdsintervall och blockering av andra. Filtren kan vara fasta så att de endast släpper igenom ett fixt våglängdsband eller vara elektroniskt styrbara så att detta kan varieras. Strålningen kan antingen spektralfiltreras i tiden genom att byta eller styra filter sekventiellt, våglängdsband för våglängdsband, eller filtreras genom filterarrayer där olika delar av sensorn blir känsliga för olika spektralband. I det första fallet offras tidsupplösning och i det andra fallet offras spatial upplösning. Vilken teknik som är att föredra beror på de operativa kraven i den specifika tillämpningen. Tekniken är relativt billig och kan göras liten, lätt och effektsnål (låg SWaP) vilket ger den potential för handburna eller vapenmonterade sensorer samt på små lätta plattformar som UAV:er. Tekniken är också dominant på den civila marknaden inom industriella tillämpningar och för nya avancerade konsumentkameror.

I hyperspektrala sensorer som är baserade på **dispersiv** teknik passerar strålningen en smal spalt och separeras via ett gitter eller ett prisma i olika riktningar/vinklar som beror av strålningens våglängd (ett fenomen som kallas dispersion). Olika delar av sensorn kommer därmed att träffas av strålning med samma spatiala information men med olika spektralinnehåll. Den smala spalten som krävs för att begränsa kromatisk aberration (avbildningsfel) i sensorn medför dock en dämpning av mängden strålning som integreras och konverteras till en signal. Spalten innebär också att endast en rad eller kolumn avbildas i taget, vilket medför att en mekanisk skanning krävs för att avbilda en hel tvådimensionell scen. Detta kan åstadkommas antingen genom en plattformsrörelse (exempelvis från ett flygplan) eller genom att rotera sensorn och dess synfält. Tekniken möjliggör högre prestanda vad gäller spektralupplösning jämfört med filterbaserade tekniker och för de flesta flygburna civila och militära tillämpningarna är tekniken idag helt dominerande.

I hyperspektrala sensorer som är baserade på **interferometrisk** teknik delas den infallande strålningen upp i två kopior via en stråldelare, som sedan reflekteras mot var sin spegel. De två kopiorna kommer färdas något olika lång väg genom sensorn genom att den ena spegelns position är förskjuten i förhållande till den andra. Vägskillnaden ger upphov till ett s.k. optiskt interferensmönster (en intensitetsvariation) i vilket spektralinformationen är inkodad. En skanning av interferensmönstret över scenen och efterföljande signalbehandling används sedan för att avkoda/transformera den spektralmodulerade intensitetsvariationen till ett spektrum för varje pixel i kameran. Sensorer baserade på interferometerteknik är potentiellt mer kraftfulla, eftersom de släpper in allt ljus och alla våglängder samtidigt (utan spektral separation), med väsentligt bättre prestanda i form av bättre signal-till-brusförhållande som följd. Den känsliga interferometertekniken medger också sensorer med mycket hög spektralupplösning (högre än dispersiv teknik). Nackdelen med tekniken är att den kräver mekanisk skanning, har fler optiska komponenter och kan vara mindre robust pga. känslighet vid upplinjerings av optik. I regel innebär tekniken också större, tyngre och dyrare sensorer i slutändan, men i vissa högprestandatillämpningar kan detta vara motiverat.

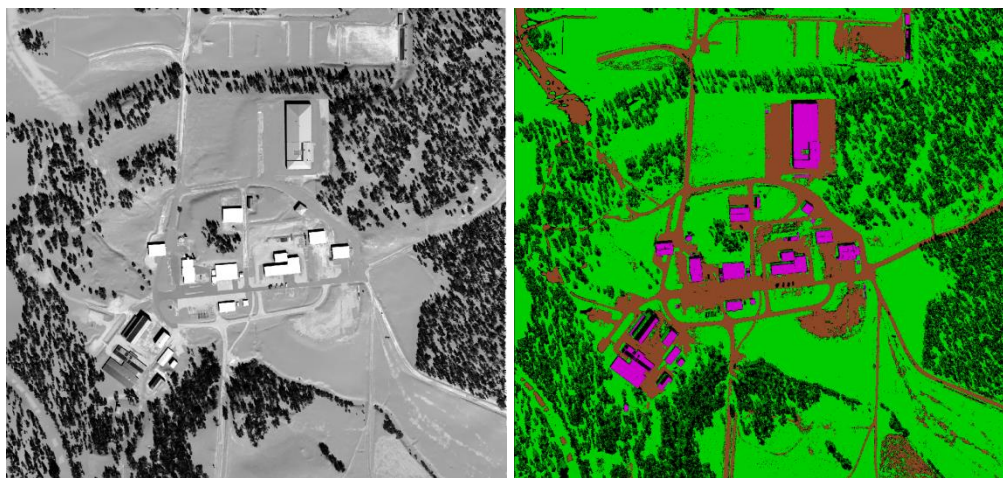
2.3 Utökade förmågor för Försvarsmakten

Jämfört med konventionella optiska spaningssensorer är således det stora mervärdet med en hyperspektral kamera att den i varje pixel mäter ett helt spektrum över många våglängdsband. Genom att kompensera för atmosfärens egenskaper och noggrant kalibrera sensordata är det möjligt att översätta dessa spektra till materialtyper. Här följer några exempel där tekniken kan bidra med en förbättrad spaningsförmåga för Försvarsmakten.

2.3.1 Materialklassificerad kartering

Med kalibrerade sensordata och ett referensbibliotek av inmätta spektrum för olika material kan den inmätta hyperspektrala bilden användas för automatisk materialklassificering. Alternativt kan små delområden i bilden användas för att extrahera referensspektra och sedan automatiskt klassificera övriga områden i bilderna med hjälp av dessa. Varje område i bilden materialklassificeras genom att jämföra bildpixlarnas spektrum med referenserna. En pixel tilldelas en specifik materialklass när den i tillräckligt hög grad motsvaras av en referens.

Figur 2 visar ett exempel på automatisk materialklassificering med metoden Spectral Angle Mapper (SAM) på en simulerad hyperspektral bild över Markstridsskolan i Kvarn. Till vänster i figuren visas bilden från våglängdsbandet 1.4 μm . Till höger i Figur 2 visas resultatet av den automatiska terrängklassificeringen där referensspektrum har definierats av tre olika takplåtsmaterial (visas i bilden i färgen magenta), tre olika vägmateriell (brunt), gräs (ljusgrönt) och skog (mörkgrönt). Bildområden som inte kan härröras till någon referens har tilldelats färgen svart.



Figur 2: (vänster) Ett spektralband (omkring 1.4 μm) från en simulerad hyperspektral sensor med 100 delband i VNIR från 0.4-1.4 μm . (höger) Materialklassificerad markscen med klasserna vägmateriell (brunt), takplåt (magenta), gräs (ljusgrön), skog (mörkgrönt) och okänt (svart).

2.3.2 Måldetektion med spektral signaturmatchning

I de fall där det finns referensspektrum för målobjekt och eventuellt även för bakgrunden är det möjligt att utföra måldetektionen specifikt för de eftersökta målen. I detta sammanhang finns ett flertal olika metoder men avsikten är densamma; att identifiera de pixlar i bilden som bäst överensstämmer med målens spektrala signatur och undertrycka ointressanta pixlar med spektrum tillhörande bakgrundsklassen.

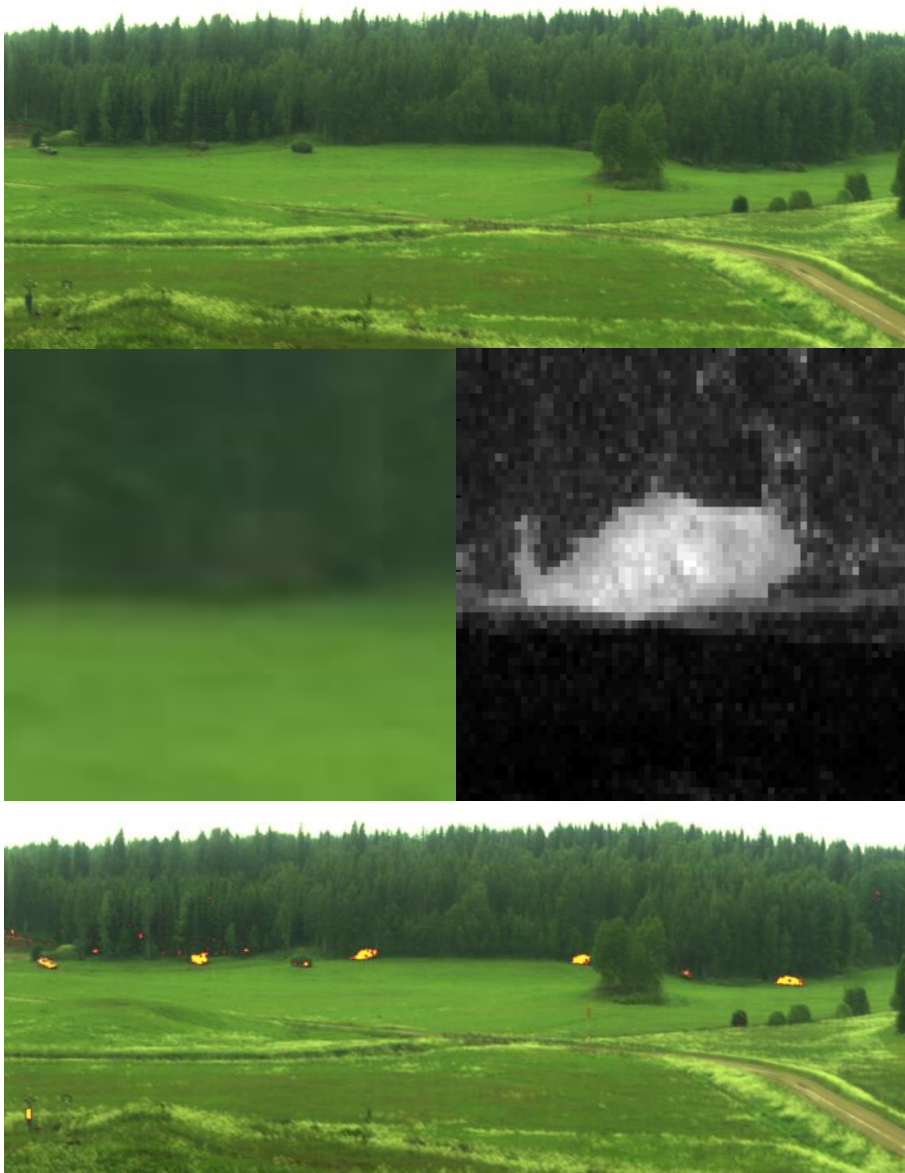
Figur 3 visar ett exempel på måldetektion med spektral signaturmatchning. En bildtolk har identifierat en stridsvagn som står uppställd nedanför byggnaden i mitten av bilden. Från denna observation erhålls ett referensspektrum. Därefter används detektionsalgoritmen ACE (Adaptive Coherence Estimator) på bilden. Med algoritmen detekteras ytterligare en stridsvagn som står dold i skogen. I exemplet är bildområdet relativt litet men det illustrerar ändå hur detta skulle kunna fungera i praktiken på ett betydligt större markområde. Med ett referensspektrum för ett specifikt objekt, antingen erhållet från samma hyperspektrala bild eller från ett referensbibliotek, kan operatören få hjälp att hitta nålen i höstacken.



Figur 3: Detektion av stridsvagnar med signaturbaserad måldetektion.

2.3.3 Måldetektion med anomalidetektion

Anomalidetektion är en metod för måldetektion som är användbar när det saknas referensspektrum för målen. Med denna metod görs antagandet att bilderna till största del utgörs av ointressant bakgrund. Genom att modellera det spektrala innehållet i bakgrundsomgivningarna och därefter jämföra varje bildpixel mot relevant bakgrundsmodell kan ett mått beräknas på hur bakgrundslika de olika pixlarnas spektrum är. När ett spektrum från en pixel avviker signifikant från bakgrundsstatistiken detekteras denna som en anomali. Dessa kan därefter skickas vidare till en algoritm eller operatör för vidare analys. Anomalidetektion är därmed inte i sig en metod att detektera specifika objekt utan används främst för att automatiskt hitta intressanta delområden för potentiella mål. Figur 4 visar ett exempel där anomalidetektion i en hyperspektral VNIR bild används för att detektera kamouflerade fordon i ett skogsbyn.



Figur 4: Exempel på hyperspektral anomalidetektion. Den övre bilden är en RGB-bild. I mitten till vänster visas en inzoomning på ett kamouflagenät i skogsbrynet. I mitten till höger har varje pixel förstärkts enligt anomalieresultatet från den hyperspektrala bildanalysen. Nederst visas anomalidetektionerna överlagrade i RGB-bilden.

2.3.4 Avancerad måligenkänning

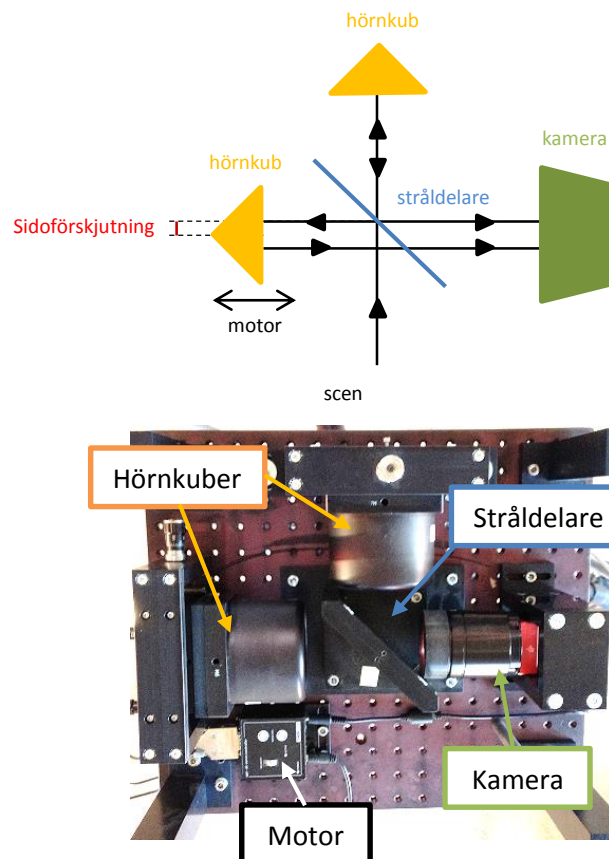
I ovanstående beskrivning av anomalidetektion och spektral matchning används enbart pixlarnas spektrala egenskaper för att identifiera pixlar som skiljer sig från bakgrunden. Med en spatialt högupplöst hyperspektral kamera eller annan kompletterande högupplöst kamera kan en kombination av såväl den spektrala signaturen som den spatiala signaturen (så som storlek, form, mönster och textur) för målen utnyttjas för att ytterligare förbättra detektionsförmågan.

3 Hyperspektral sensorutveckling

Inom projektet pågår två olika utvecklingsprojekt på hårdvarusidan, vars två huvudsyften är att ta fram sensordemonstratorer för hyperspektral avbildning i två olika våglängdsområden (LWIR och VNIR, se avsnitt 3.1 respektive 3.2) samt utveckla kompetens att kunna värdera olika tekniker och prestanda på komponent- och systemnivå. Utvecklings- och värderingsarbetet sker även i nära samarbete med andra FoT-projekt med koppling till området, exempelvis FoT Sensorer för upptäckt av IED och FoT Signaturmateriel.

3.1 Utveckling av hyperspektral LWIR-kamera

Sedan flera år tillbaka pågår en utveckling av en interferometrisk hyperspektral kamera med spektral känslighet i det långvågiga IR-området (8-12 μm). Kamerans design är baserad på en klassisk Michelson-interferometer, men med hörnkuber istället för plana speglar (se schematisk skiss och foto i Figur 5). Hörnkuberna gör upplinjeringen av instrumentet mindre känslig och sensorn mer robust.



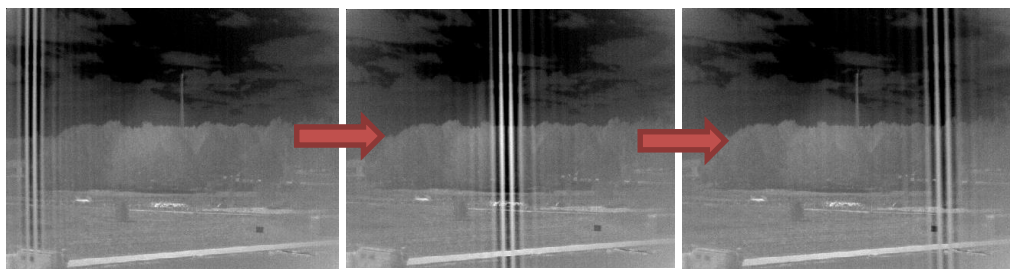
Figur 5: (övre) Schematisk skiss och (nedre) foto över den interferometriska kameran.

En annan modifiering som införts är att den ena hörnkuben sidoförskjutits från sitt symmetriläge (se skissen i Figur 5), vilket medför en spatial förskjutning i sidled av de två vågfrontskopierna 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 6.



Figur 6: Bildexempel med interferensmönster överlagrat horisontellt över kamerans bild. Skanning av en scen kan ske genom att svepa kamerans synfält över scenen medan interferensfönstret hålls fixt i kameran (exempelvis via sensorplattformens rörelse eller genom att rotera kameran).

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 detaljer i scenen samlas in. Den mekaniska skanningen kan ske på två olika sätt. Den första tekniken innebär en svepning av synfältet över scenen, erhållen genom en plattformsrörelse (via exempelvis ett flygplan) eller genom att rotera kameran på ett stativ. I den andra skanningstekniken, avsedd för stationära plattformar, hålls kamerans synfält fixt och interferensmönstret förflyttas istället över kamerans synfält, se illustration i Figur 7. Detta åstadkoms i instrumentet genom att förflytta den ena hörnkuben parallellt med den optiska axeln (närmare eller längre bort från stråldelaren), vilket medför att nollläget (zero path difference) för interferometern förskjuts i sidled över kameran. I instrumentet finns en DC-motor (se Figur 5) som kan translatera hörnkuben med hög precision och i lämplig hastighet.



Figur 7: Skanning av en stationär scen kan ske genom att flytta interferensmönstret i sidled över bilden, vilket görs genom att med en integrerad motor röra den ena hörnkuben i instrumentet (se tidigare skiss).

För att reducera storlek, vikt och kostnad används en okyld mikrobolometer-kamera i amorft kisel (Miricle 307K från Thermoteknix) som avbildande kamera i uppställningen. Kamerans bildhastighet är 50 Hz och den ger digitala bilder ut med 14 bitars dynamik. Temperaturupplösningen för kameran är ca 85 mK. Kameran är försedd med en 50 mm lins vilket ger sensorn det totala synfältet om ca $18^\circ \times 14^\circ$. Med ett pixelavstånd på 25 μm innebär detta en IFOV (pixelsynfält) på ca 0.5 mrad. Systemet är med andra ord kanske inget långgräckviddigt system i dagsläget (upplösningen blir ca 0.5 m på 1 km avstånd), men sensorn är modulerbar så att linsen och kameran kan enkelt bytas ut.

Nackdelar med att använda en okyld IR-kamera, kontra en kyld (i detektormaterialen MCT eller T2SL exempelvis), är sämre prestanda i form av sämre temperaturupplösning, längre responstid och lägre bildtakt samt större temperaturdrift. Temperaturdriften avspeglar sig i att man får artefakter, t.ex. i form av vinjetteringslika mörka hörn i bilder. Preliminära resultat från mätningar med denna prototyp har tidigare publicerats [1] och en utredning av brusegenskaperna har också gjorts [2]. En beskrivning av instrumentet ges också i tidigare FOI-rapport [3]. Några sammanfattande specifikationer kring det utvecklade hyperspektrala kamerasytemet ges i Tabell 1.

Det kan också vara värt att nämna att i litteraturen har liknande koncept även realiserats i VNIR, 0.4-1 μm [4] och i MWIR, 3-5 μm [5], den sistnämnda med en kamera baserad på kyld MCT-detektor. Flera resultat med okyld mikrobolometer-kamera i LWIR har också rapporterats med andra interferometerdesigner såsom Sagnac [6] och Fabry-Perot [7].

Tabell 1: Specifikationer och predikterad (teoretisk) prestanda för den hyperspektrala LWIR-kameran.

Hyperspektral LWIR-kamera	
Spektralområde	7 – 14 [μm]
Spektral upplösning (vid 10 μm)	≥ 22 [nm]
Antal spektralband	≤ 250
Spatial upplösning	640 x 480 [pixlar]
Bildtakt	50 [Hz]
Hyperspektral bildtakt	> 15 [s] för en spektral bilddatakub
Digital utgång	14 bitar
Lins	50 mm F/1.0
FOV	18.2° x 13.7°
IFOV	0.50 [mrad]
Storlek (b x h x l)	250 x 150 x 350 [mm]
Vikt	ca 20 kg

3.1.1 Insamling och förbehandling av data

I stationär mod (med synfältet stilla) byggs interferogram upp för varje pixel genom att flytta interferensmönstret över alla bildpixlar, med ca 1 pixels förflyttning per bild. Eftersom kamerans bildhastighet är 50 Hz och antalet pixlar att skanna i sidled är 640 innebär det att det tar minst ca 15 s att generera en komplett spektral datakub. I praktiken kanske man dock skannar något långsammare för att erhålla bättre signal/brus-förhållande.

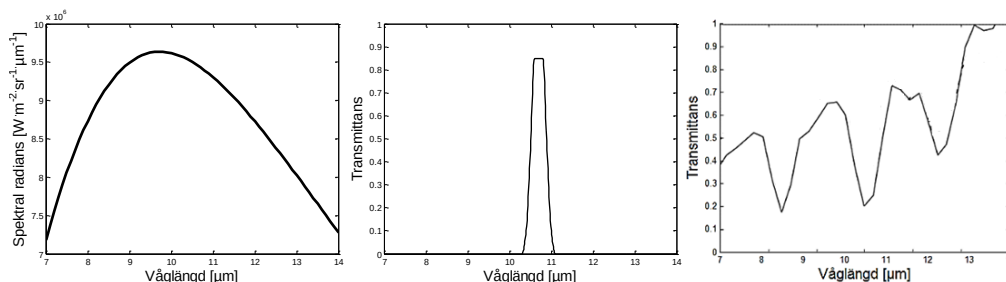
En egenskap hos alla detektormatriser är att pixelresponsen varierar mellan olika pixlar. Detta är mer signifikant för detektorer i det termiska IR-området och i synnerhet för okylda LWIR-kameror. Dessa har därför ofta en inbyggd automatisk korrektion där en homogen skiva regelbundet fälls ner framför detektorn varvid en uppdatering görs av korrektionskoefficienter. Eftersom insamling av data avbryts under den tid uppdatering görs tenderar funktionen att bli opraktisk vid mätning av ett utdraget förlopp såsom skanning av en scen. Den inbyggda automatiska korrektionen korregerar inte heller för inverkan av de optiska komponenterna mellan kameran och scenen. Den automatiska korrektionen kompletteras därför med bildinsamling från homogena ytor som täcker sensorns synfält. Med hjälp av dessa data kan bilden korrigeras. Metoden kallas för icke-uniformitetskorrektion (NUC). Om synfältet flyttas över scenen under skanningen (pushbroom-mod) kan insamlade bilddata från scenen användas för icke-uniformitetskorrektionen. Denna teknik kräver att tillräckligt mycket pixelstatistik samlas

in under den tid svepningen över scenen pågår, vilket i praktiken alltid är fallet om systemet är flygplansbaserat.

3.1.2 Spektral kalibrering

Signalbehandling av den modulerade signalen ger ett spektrum för varje pixel där de exakta våglängderna inte är kända. För att åstadkomma detta behöver sensorn kalibreras spektralt mot en referens med känd våglängd. En sådan referens kan exempelvis utgöras av en laserkälla, som har en smal bandbredd kring en mycket väldefinierad våglängd. Spektral kalibrering i det visuella och nära infraröda våglängdsområdet kan exempelvis göras med standardlaserkällorna röd HeNe (633 nm) och grön HeNe (543 nm) [8], frekvensdubblad (532 nm) eller normal (1064 nm) Nd:YAG eller någon av den mängd olika diodlasrar som finns tillgängliga i våglängdsområdet. I det långvågiga IR-området är exempelvis CO₂-lasern (10.6 µm) och olika kvantkaskadlasrar tillgängliga.

En svartkropp med en känd temperatur har en väldefinierad spektralfördelning via Plancks strålningslag, men eftersom källan är bredbandig och långsamt varierande med våglängd blir kalibreringen högst approximativ. Ett alternativ är då filter i form av tunna filmer med karaktäristiskt transmissionsspektrum framför svartkroppen, som svartkroppsstrålningen moduleras med. Lämpliga material har distinkta absorptionsband som är väldefinierade och därmed enkla att identifiera. Två sådana material som använts i LWIR är polypropylen (PP) och polyvinylklorid (PVC) [1][2]. PP har distinkta absorptionsband vid ca 8.5 µm, 10.2 µm och 11.9 µm. PVC har ett distinkt transmissions-band vid 11.8 µm. Ett annat alternativ är att använda bandpassfilter, antingen smala och med väldefinierad bandbredd eller bredare med väldefinierade flanker. Figur 8 jämför spektralfördelningen hos en svartkropp, ett smalbandigt bandpassfilter och en polypropylen-film.



Figur 8: (vänster) Spektralfördelningen mellan 7-14 µm hos en svartkropp vid temperaturen 25 °C. (mitten) Exempel på ett smalbandigt bandpassfilter och dess transmittansspektrum. (höger) Transmittansspektrum för en polypropylenfilm.

3.1.3 Radiometrisk kalibrering

Radiometrisk kalibrering av data är nödvändigt vid signaturmätning för ge resultaten en meningsfull fysikalisk enhet och möjliggöra jämförelse av mätningar vid olika tillfällen och med olika konfigurationer. Det är också nödvändigt i många tillämpningar där kvantitativ analys av olika materialegenskaper är efterfrågade, exempelvis inom civil fjärranalys så som jord- och vegetationskaraktärisering, meteorologi och klimatologi eller inom medicin.

För att kalibrera sensorns digitala nivåer (grånivåer) till en fysikalisk storhet (t.ex. radians) krävs en ljuskälla som är spårbar till en referensstandard. I det visuella, nära infraröda och kortvågiga infraröda våglängdsområdet används exempelvis bågglampor i deuterium och halogenlampor, där ljuset reflekteras och sprids mot en diffus och väldefinierad yta. I det termiska IR-området används kalibrerade svartkroppstrålare (hål- eller ytstrålare) vid minst två olika temperaturer, där spektralfördelningarna som funktion av våglängd är kända genom Plancks strålningslag. Vid den radiometriska kalibreringen samlas då

pixelinterferogram in för varje temperatur T hos svartkroppen, vilket sedan efter signalbehandling omvandlas till en fyrdimensionell bilddatakub (i,j,λ,T) , där (i,j) är pixelkoordinaterna i fokalplansmatrisen och λ är våglängden [9].

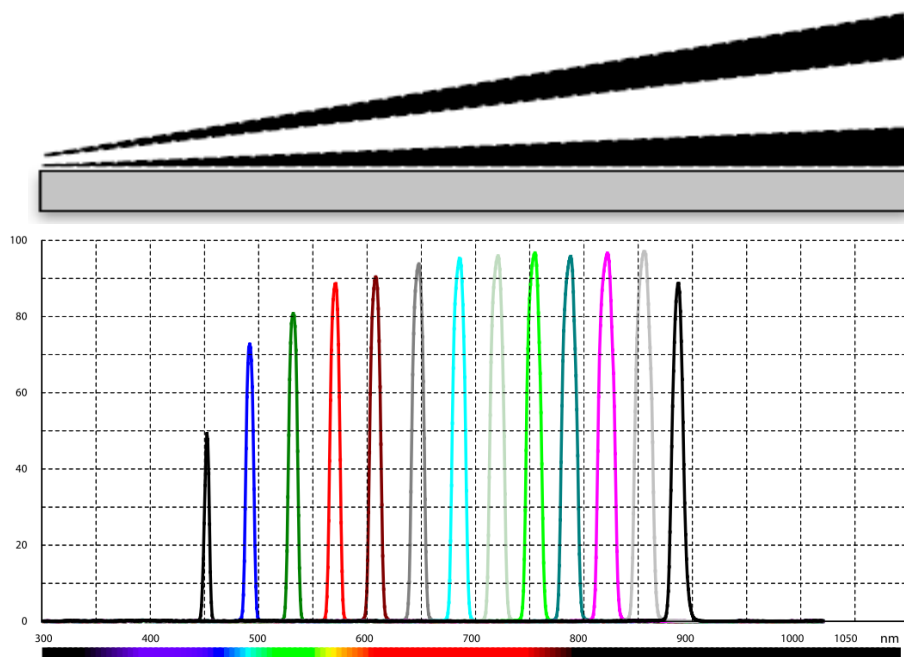
Ibland är det opraktiskt att inkludera strålningsreferenser internt i sensorn, eftersom de kräver plats, adderar vikt och slukar effekt. I dessa fall kan ytor i scenen nyttjas för exempelvis radiometrisk kalibrering om ytan är tillräckligt stor, högemissiv och har en temperatur som är känd eller kan uppskattas. Ett exempel är vattenytor från sjöar och hav. Ytor i scenen kan också användas för spektral kalibrering om ytan innehåller karaktäristisk spektral information (spektral emissivitetsvariation), så som sand och mineraler. Eftersom detekterad strålning har passerat luft från yta till sensor, kan även spektrala atmosfärslinjer i vissa fall användas. Kalibrering av denna typ kan benämnas scenbaserad kalibrering (eller vicarious calibration) och ger förstås inte samma noggrannhet som referensbaserade metoder, men kan användas för relativ kalibrering mot en tidigare absolut mätning gjord i lab [9].

3.2 Utveckling av hyperspektral VNIR-kamera

Konventionella hyperspektrala system är designade med hög spektral upplösning och relativt låg spatial upplösning. I praktiken är upplösning av små mål av stor vikt och en hög spatial upplösning med tillräcklig spektral upplösning är att föredra [10]. Optimal design beror på målets storlek och avstånd samt spektral variabilitet hos målet relativt bakgrunden. Fasta material uppvisar mestadels en långsam spektral variation och kan därför karakteriseras med relativt måttlig spektral upplösning. Den spektrala signaturen medger då inte bara detektion av ett material som ej uppträder i bakgrunden (anomalier) utan kan även användas för karakterisering med avseende på typ av material. Exempelvis kan olika typer av kamouflagefärg särskiljas. Den höga spatiala upplösningen medger även detektion och klassning av små mål på stora avstånd.

Vi ser nu en snabb utveckling mot låg vikt och kostnadseffektiva system för bärbara marktillämpningar och mini-UAVer. Speciellt är små elektriska flygsystem attraktiva då de tillåter effektivt utnyttjande på lokal nivå. För att uppnå detta krävs kompakta hyperspektrala system där lasten skall vara mindre än 2 till 3 kg beroende på typ av plattform. Konventionella hyperspektrala system tenderar att vara tunga, där spektrometerdelen ofta är skrymmande då den kräver kollimering och återavbildning.

En ny hyperspektral sensor utvecklas nu i samverkan mellan Renhorn Consulting AB, Delta Optical Thin Film och FOI. Sensorn utnyttjar ett s.k. linjärvariabelt filter, vilket är en dielektrisk multilagerstruktur vars tjocklek varierar över filtrets längd, se princip i Figur 9. Interna reflektioner mellan lagren ger konstruktiv och destruktiv interferens för olika våglängder i olika delar filtret, vilket gör att den spektrala transmissionen varierar från den ena änden till den andra.



Figur 9: (övre) Ett linjärvariabelt filter består av en multilagerstruktur vars tjocklek varierar över filtrets längd. (nedre) Tjockleksvariationen gör att olika våglängder släpps igenom i olika delar av filtret. (Källa: Delta Thin Film Optics)

Filtret monteras på en CMOS-array i en vanlig systemkamera (Canon 5D Mark III), se Figur 10, och innebär att systemet blir kompakt och med samma vikt som själva kameran. Sensorn får också en mycket hög spatial upplösning genom utnyttjandet av den stora fokalplansarrayen (22.3 megapixlar). I kameran är alla övriga filter, exempelvis Bayer-filter och IR-filter, borttagna.



Figur 10: I den hyperspektrala VNIR-kameran är det linjärvariabla filtret monterat ovanpå CMOS-arrayen (vänster) i en vanlig systemkamera (Canon 5D Mark III) (höger).

Predikterad prestanda för sensorn visas i Tabell 2. Fortsatt utveckling kring framför allt skanningsmetodik och signalbehandling är planerad för nästkommande år (2016).

Tabell 2: Specifikationer och predikterad (teoretisk) prestanda för den hyperspektrala VNIR-kameran.

Tekniska specifikationer	
Spektralområde	450-880 [nm]
Spektralupplösning	9-17 [nm]
Spektral sampling	≥ 0.07 [nm]
Antal spektralband	≤ 32
Spatial upplösning	≤ 3840 [pixlar]
Bildtakt	50 [Hz]
Hyperspektral bildtakt	> 20 [s] för en spektral bilddatakub
Digital utgång	14 [bitar]
Lins	85 mm F/1.4
FOV	$26^\circ \times 16^\circ$
IFOV	74 [μ rad]
Storlek (b x h x l)	152 x 116 x 146 [mm]
Vikt	ca 1.55 [kg]

4 Signalbehandling

Under 2015 har inventeringsarbete genomförts i syfte att skapa en översyn av mjukvaror och algoritmer för hyperspektral signal- och bildbehandling. Sedan många år tillbaka finns en toolbox i MATLAB framtagen på FOI som heter HSI-toolbox. Denna har nu uppdaterats, både vad gäller kod och manual, för att säkerställa fortsatt användbarhet. Avsnitt 4.1 *HSI-toolbox i MATLAB* beskriver toolboxen och dess huvudfunktioner. Under året har projektet även studerat ett par icke-kommersiella och kommersiella alternativ, i syfte att se vad dessa erbjuder i termer av funktionalitet och algoritmer samt deras lämplighet för användning inom vår forskning. Dessa är beskrivna under 4.2 *Opticks* och 4.3 *SocetGXP*.

4.1 HSI-toolbox i MATLAB

HSI-toolbox är en verktygslåda i MATLAB framtagen på FOI för arbete med hyperspektrala bilder. Utvecklingen av toolboxen har pågått av och till under många år vartefter behov av olika verktyg uppkommit. Verktygslådan kan användas för analys och visualisering av hyperspektrala bilddata, liksom för utveckling och utvärdering av automatiska algoritmer som behövs som stöd för en mänsklig operatör och i automatiska igenkänningssystem (ATR-system).

4.1.1 Datarepresentation

En hyperspektral bild har två spatiala dimensioner (i likhet med bilder från konventionella avbildande sensorer) och en spektral dimension. En hyperspektral bild i MATLAB representeras ofta av en tredimensionell matris. Beroende på antalet spektralband som är avbildade kan hyperspektrala bilder ta stor och ibland mycket stor plats i datorminnet. En hyperspektral bild med 100 spektralband tar lika mycket plats som 100 monokroma bilder med samma upplösning. HSI-toolboxen kan hantera stora bilder genom att associera datavariabler i MATLAB direkt med en fil, så att bara den del som behövs för bearbetning hämtas in från filen. Denna hantering sker helt automatiskt. En hyperspektral bild kan också i verktygslådan representeras av ett HSI-objekt som är associerat med en fil. Objektet hanteras då i MATLAB som om det vore en matris. För hyperspektrala sensorer förekommer många olika dataformat och HSI-objektet kan agera som en mellanhand, som formaterar om de data som hämtas från sensordatafilen till det format som verktygslådan förutsätter.

4.1.2 Kalibrering

Hyperspektrala bilder behöver ofta kalibreras för att reducera effekter från egenskaper som inte härrör från de material man vill känna igen. För reflekterande material påverkar exempelvis belysningen, från solen eller andra externa ljuskällor, den spektrala fördelningen hos strålningen som lämnar materialets yta. I hela optiska våglängdsområdet kommer också den spektralberoende transmissionen genom atmosfären omfördela strålningens spektralinhåll. I toolboxen finns en matematisk modell implementerad för hur atmosfären påverkar och beror på parametrar som lufttemperatur, lufttryck och relativ luftfuktighet. Dessa behöver vara kända eller estimeras ur bilder för att ta fram en funktion som beräknar strålningens förändring.

4.1.3 Materialsegmentering

En viktig aspekt av hyperspektral bildanalys utgörs av materialklassning. Materialklassning medger upprättande av kartor där olika delar av kartan är klassade som olika material (s.k. materialklassad kartering) eller upptäckt av objekt av känd eller avvikande spektral signatur (s.k. signaturnatchning respektive anomalidetektion). Målet med bildsegmentering av en

hyperspektral bild är att partitionera bilden i olika material. I toolboxen beskrivs material som en blandning av en eller flera klasser, där varje klass beskrivs av ett spektrum. Spektret kan antingen vara deterministiskt angivet eller stokastiskt beskrivet som en sannolikhetsfördelning. Algoritmer för att hitta klasser som på förhand inte är kända är iterativa och flera sådana metoder finns implementerade i verktygslådan. Metoderna är varianter av metoden Expectation-Maximization, som alternerar mellan att klassificera samplen och att anpassa beskrivningen av klassen till de samplar som hör till klassen.

4.1.4 Detektionsalgoritmer

För att upptäcka, känna igen och identifiera ett objekt utifrån dess spektrala utseende behövs en beskrivning i form av en spektral signatur. Denna signatur kan tas fram på olika sätt; den kan erhållas som ett sampel ur en hyperspektral bild, vara uppmätt genom laborativa mätningar på objektet eller kanske genom modellbeskrivningar eller simuleringar av objektet. I toolboxen ingår både deterministiska och stokastiska beskrivningar av spektrum och metoder för att estimerar parametrar från data. Om man antar att ett material bäst beskrivs av ett deterministiskt spektrum kan detta t.ex. beräknas som ett medelvärde av de spektrum som hör till materialet. Om man antar att ett material bäst beskrivs av en stokastisk modell kan man t.ex. beräkna medelvärde och varians eller kanske kovarians för de samplar som bedöms tillhöra materialet. I toolboxen ingår också metoder att upptäcka specifika spektrum och klassificera bilder, både genom att dela upp dem efter kända klasser men också genom att hitta nya klasser i data. Det finns även metoder för att utvärdera algoritmer, där statistik kan beräknas för de fel som klassificeraren gör. Beräkningarna resulterar i s.k. ROC-kurvor (Receiver Operating Curves), som visar sannolikheter för falska detektioner och missade detektioner. Metoder finns också för att beräkna ömsesidig information mellan stokastiska variabler, vilket är ett mått på hur mycket en variabel säger om en annan variabel.

För upptäckt av ett känt och eftersökt spektrum (s.k. signaturmått) jämförs det kända spektret med de spektrum som finns i aktuell bild. I verktygslådan finns flera vanliga jämförelsemått implementerade t.ex. Adaptive Matched Filter, Adaptive Cosine Detector och Adaptive Subspace Detector. Om man har tillgång till den sanna klassificeringen av en bild eller sann position av kända objekt så kan algoritmer för detektion av objekt utvärderas. Den kända klassificeringen jämförs då med den som åstadkoms av algoritmen och olika jämförelsemått kan beräknas.

Deterministiska beskrivningar av spektra kan vara ett enskilt spektrum eller en blandning av flera spektra (exempelvis en linjärkombination av flera spektrum). Ett aktuellt spektrum i en bild kommer sällan att stämma exakt överens med en modellbeskrivning och därför är det nödvändigt med likhetsmått mellan ett spektrum och modellen. För detta finns flera grundläggande jämförelsemått implementerade och ofta hänger en viss beskrivningsmodell ihop med ett visst avståndsmått.

Stokastiska modeller är statistiska beskrivningar av hur spektrum fördelas från ett givet material eller en given yta. Det kan till exempel vara ett spektrum med normalfördelad spridning i varje våglängdsbands intensitet, men det kan också vara ett medelvärde och en kovariansmatris som visar hur statistiska variationer samverkar mellan olika våglängdsband.

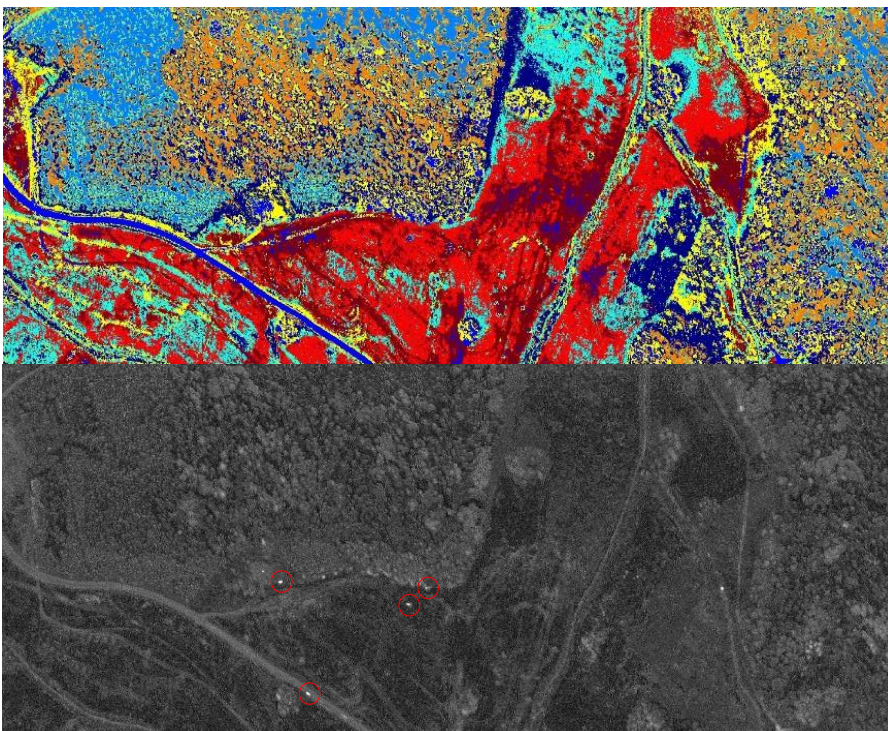
4.1.5 Exempel

I Figur 11 nedan visas ett bildexempel från en flygning över ett område bestående av mestadels naturlig terräng med skog och gräsfält. I området finns några kamouflagefärgade fordon utplacerade. Det är svårt att upptäcka fordonen i en vanlig visuell kamerabild.



Figur 11: En visuell RGB-bild över ett område med skog och gräsfält, där kamouflagefärgade fordon finns gömda i terrängen. Bilden (800 x 2000 pixlar) är tagen på 1000 meters höjd och visar ett område som är ca 450 x 1000 meter stort.

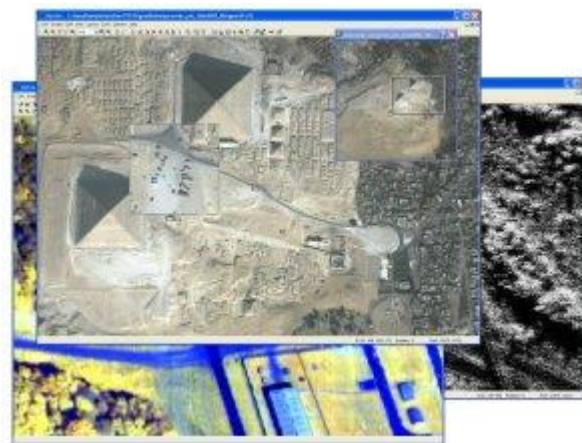
Vid överflygningen fanns det också tillgång en hyperspektral sensor. Sensorn är känslig i det visuella och nära infraröda området och insamlade data har 60 spektrala band med en markupplösning (storlek för en pixel) om 55 cm. En materialsegmentering gjordes av bilden, där samtliga pixlar klassades efter nio olika materialklasser som hittades i bilden med metoden *Stochastic Expectation Maximization*. Jämförelsemåttet *Mahalanobisavstånd* användes sedan för att mäta hur varje pixel avviker (det s.k. anomalivärdet) från den för bilden normala statistiska fördelningen. I Figur 12 visas den materialsegmenterade bilden samt en bild med anomalivärden för varje pixel. Anomalivärdet indikerar en sannolikhet för att pixeln ej hör till bakgrunden och i bilden är ljusa punkter starkt avvikande pixlar. Trots att markupplösningen var relativt ringa så kunde de kamouflerade fordonen enkelt plockas ut eftersom fordonen har ett spektrum som skiljer sig från den omkringliggande naturen.



Figur 12: (övre) Segmentering av området i nio olika materialklasser. (nedre) Anomalivärden som uttrycker hur mycket varje pixel avviker från den klass som pixeln liknar mest, där ljusa pixlar anger en stor avvikelse. Två kamouflagefärgade fordon, en person bil och en släpvagn är inringade.

4.2 Opticks

Opticks är en öppen (open source) programvara för analys av hyperspektrala bilder, se bildexempel ur användargränssnitt i Figur 13, ursprungligen utvecklad av Ball Aerospace för US Air Force. Opticks är ett gratisalternativ till kommersiella verktyg så som ENVI, Socet GXP, ERDAS IMAGINE och RemoteView. Programmet innehåller ett relativt komplett programpaket för grundläggande visualisering och analys av hyperspektrala bilder och stöder flertalet av de bildformat som är frekvent förekommande inom hyperspektral avbildning. Pga. sin öppna källkod är Opticks expanderbart och lämpar sig väl för forskning då nya algoritmer och funktioner enkelt kan läggas till vid behov.



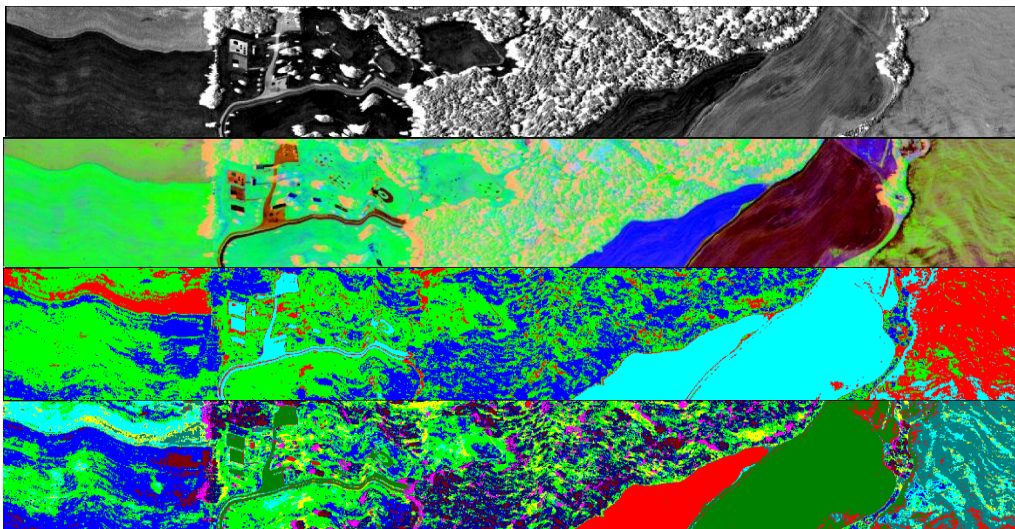
Figur 13: Opticks är en öppen mjukvara för analys av hyperspektrala bilder och finns tillgänglig för nedladdning och installation från www.opticks.org.

I programmet kan enskilda spektralband visas som monokroma bilder, men tre spektralband kan också väljas ut för **visualisering** som en falsk färgbild. Avvikande spektralvärden, höga och låga, kan på ett enkelt sätt filtreras bort vilket möjliggör visning av bilder med stor detaljrikedom inom ett begränsat intervall.

Detektion och materialklassificering görs vanligen med hjälp av s.k. **spektral signaturmatchning**, där uppmätta spektrala signaturer i bilder jämförs med sedan tidigare kända. De kända signaturerna kan ha erhållits genom tidigare hyperspektrala bilder, spektralmätningar i labb eller ute i fält eller kan vara beräknade (matematiskt modellerade) ur materialkännedom. De kända signaturerna kan också bestå av målsignaturer som extraherats och definierats i den befintliga hyperspektrala bilden/bildserien. Opticks stöder de mest beprövade detektions- och materialklassificeringsmetoderna, där målsignaturer antingen hämtas från ett målsignatursbibliotek eller från signaturer i bilden.

Detektion av objekt kan också göras i programmet genom s.k. **anomalidetektion**. Anomalier är spektrala signaturer som signifikant avviker från en normalmodell och metoden kräver ingen förkunskap om målsignaturer så som vid signaturmatchning. Vid anomalidetektion upptäcks därför objekt vars signatur avviker från sin omgivning mer än någon användardefinierad gräns. Exempelvis kan fordon i en skogsmiljö vanligen enkelt upptäckas med hjälp av anomalidetektion, eftersom fordonssignaturen avviker relativt mycket från de naturligt förekommande signaturerna i skogsmiljön (träd, buskar, gräs, mossa, jord, osv.). Opticks stöder de vanligaste anomalidetektionsmetoderna och erbjuder också stöd för materialsegmentering med hjälp av s.k. **klustring**. Vid klustring grupperas likartade spektralsignatur ihop och varje kluster innehåller därför signaturer med likartade spektrala egenskaper.

Hyperspektrala bilder innehåller stor mängd information och lagring och överföring av hyperspektrala bilder kan ibland utgöra en stor flaskhals i många tillämpningar. Information i olika (framförallt närliggande) spektralband är dock vanligen korrelerade (kopplade till varandra) och Opticks stöder s.k. **principalkomponentanalys** (PCA) för att reducera mängden redundant (överflödigt) information i en hyperspektral bild. Med hjälp av PCA kan den hyperspektrala bilden transformeras så att mängden redundant information minskas samtidigt som den så viktiga måldetektförmågan bevaras. Figur 14 visar exempel på hyperspektrala bilder skapade i Opticks med hjälp av PCA och segmentering av kluster.



Figur 14: De två översta bilderna visar en hyperspektral bild efter principalkomponentstransformation, där den första bilden visar den första principalkomponenten och där den andra bilden utgör en falsk färgbild som skapats ur de tre första komponenterna. De två nedersta bilderna visar segmentering genom gruppering av signaturer (klustring), där fyra respektive tio materialgrupper har använts.

4.3 SocetGXP

Programvaran SOCET GXP® som marknadsförs av BAE Systems är ett bildanalysverktyg som innehåller en uppsjö av olika funktioner och verktyg för många typer av sensordata såsom bilder (visuella, IR, SAR) och tredimensionella data (lidar och terrängdata). Programmet används idag av Försvarmaktens bildtolkare. Programmet inkluderar även en uppsättning verktyg för hyperspektrala bilder. SOCET GXP® är utvecklat för att inkludera hela analyskedjan från förbehandling av data, vidare till visualisering, bildtolkning och annotering samt avslutande rapportering av analysresultaten. Med programvaran följer dessutom ett API (Application Programming Interface), dvs. ett gränssnitt som möjliggör tredjepartsprogram att kommunicera och integreras med programvaran.

För att undersöka funktionaliteten i SOCET GXP® med speciellt fokus på hyperspektrala bilder och hur API:et kan användas för att utöka programmet med egenutvecklade algoritmer tillhandahöll BAE Systems på förfrågan en utvärderingslicens. Att köpa in programvaran för endast detta ändamål var inte aktuellt eftersom prisnivån för deras GeoAnalysis Bundle som inkluderar de hyperspektrala funktionerna ligger på \$18500.

Här nedan följer en sammanfattning av erfarenheter efter initiala tester av programmet.

4.3.1 Grundläggande funktioner

SOCET GXP® innehåller de grundläggande funktioner ett bildvisningsprogram för geografiska data bör innehålla. Det stöder ett stort antal standardfilyper för rasterdata (bilder), vektordata (annoteringar, gis-data) och 3D-data (höjddata, punktmoln). Dessutom finns möjligheter att importera mer exotiska bildformat genom att specificera hur data är lagrat på fil. Programmet hanterar också på ett bra sätt metadata med exempelvis geografisk information så att bilder direkt kan jämföras och relateras till samma geografiska område. Det finns även bra koppling till programvaran Google Earth så att man direkt kan synka den aktuella bildvyn i SOCET GXP® mot Google Earth och på så sätt få en karta över det exakta området som analyseras.

När programmet startar upp visas en vy som kallas ”Work space” från vilken man laddar och importerar data. I denna vy finns även ett flertal menyer med funktioner för exempelvis generering av s.k. ortorektifierade bilder (bilder med enhetlig skala utan geometriska distorsioner), terrängmodeller och georeferering (där varje pixel får en markkoordinat). För att visualisera och analysera specifika bilder öppnas dessa upp i ett nytt fönster. Denna vy kallas ”Multi port” och innehåller funktioner för bildanalys samlade i följande övergripande menyer:

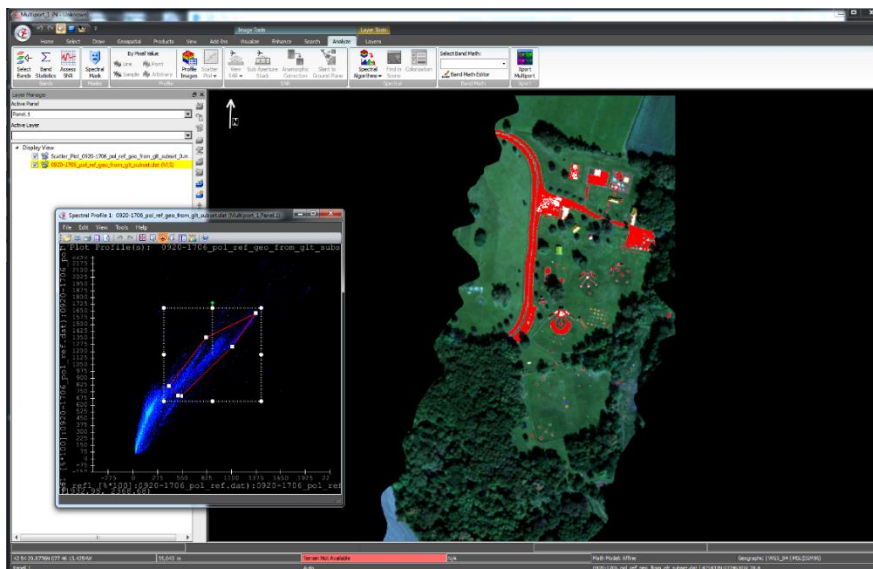
- Home – Grundläggande funktioner för att navigera och zooma
- Select – Verktyg för att markera områden och objekt
- Draw – Ritverktyg för annotering av bilder med figurer, symboler och text.
- Geospatial – Funktioner för fotogrammetri, terränggenerering, ortofoto, etc.
- Products – Verktyg för att exportera resultat och generera rapporter.
- View – Hanterar fönster och vyer som ska visas.
- Add-ins – Extra funktionalitet med tredjepartsprogram (ArcMap, ArcGis, ...).
- Visualize – Hantering för visning av flera bilder i samma vy (lager, mosaiker, ...).
- Enhance – Bildförbättring, ljusstyrka, kontrast, brusreducering, ...
- Search – Hjälpmedel för att söka igenom stora bilder.
- Analyze – Avancerade funktioner för främst multispektrala bilder och SAR.
- Google Earth – Funktioner kopplade till Google Earth.

Programmet har överlag ett relativt intuitivt och snyggt gränssnitt från vilket man snabbt kan hitta den funktion man letar efter. Speciellt är funktionerna för bildvisning (navigering, zoomning, ljus- och kontrastinställningar) och annotering (markering av objekt och regioner med symboler, ritverktyg och text) väl genomtänkta och kan skräddarsys efter behov. Eftersom programmet innehåller ett stort antal verktyg som kan vara både komplexa och även i många fall kan anpassas kräver det att användaren studerar den digra användarmanualen för att verkligen få ut det mesta av programmet.

4.3.2 Hyperspektrala funktioner

Under menyn ”Analyze” samlas de mer avancerade funktionerna för hyperspektrala bilder. Här väljer användaren exempelvis vilka band som ska ingå i visualiseringen eller band som kan maskas bort på grund av för mycket brus eller påverkan från atmosfären.

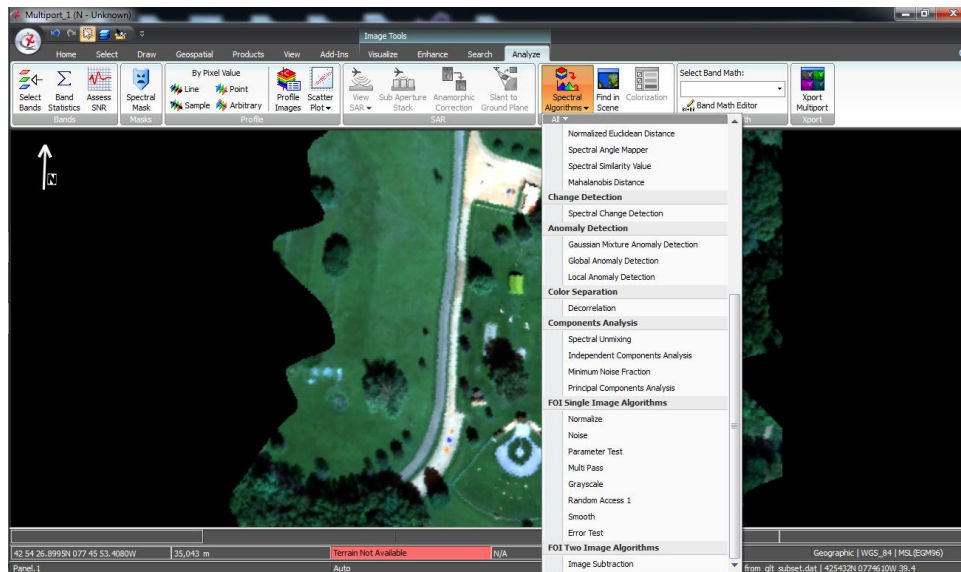
Figur 15 visar ett exempel på ett verktyg som kallas "Scatter plot" med vilket användaren kan analysera det spektrala innehållet i bilden och markera intressanta datapunkter som sedan direkt markeras i den visade bilden.



Figur 15: Med verktyget "Scatter plot" kan olika delband i den hyperspektrala bilden jämföras mot varandra. Genom att markera datapunkter som är unika för ett specifikt band kan användaren identifiera intressanta områden i bilden. I "Scatter plot"-fönstret ovan har en avvikande grupp av datapunkter markerats. Pixelar motsvarande dessa datapunkter markeras med rött i bilden och visar sig i detta fall motsvaras av vägliknande material. Hyperspektral bild: SHARE 2012: SpecTIR Hyperspectral Airborne Experiment 2012 [11][12].

Under "Spectral Algorithms", se Figur 16, återfinns en mängd intressanta algoritmer grupperade i följande kategorier:

- **Image Preprocessing**
Förbehandling i form av exempelvis brusreducering och kalibrering.
- **Unsupervised Classification**
Algoritmer som grupperar likartade pixlar i kluster utifrån pixlarnas spektrala innehåll utan att användaren i förväg definierar några spektrala referensklasser.
- **Supervised Classification**
Spektral signaturmatchning där användaren definierar referensspektrum.
- **Change Detection**
Detektion av förändringar mellan två bilder.
- **Anomaly Detection**
Hittar objekt i bilden genom att de skiljer sig spektralt från den omgivande bakgrunden.
- **Color Separation - Decorrelation**
Genererar en bild där banden inte är korrelerade och som kan användas för att hitta intressanta områden i bilden.
- **Components Analysis**
Datamängdskomprimerande metoder för att reducera antalet band i bilden till en mindre uppsättning band som ändå behåller majoriteten av informationsinnehållet (Principal Component Analysis, Independent Component Analysis, etc.).



Figur 16: Under "Spectral Algorithms" återfinns många intressanta algoritmer för detektion och klassificering. Under denna meny är det också möjligt att lägga till egna funktioner med hjälp av programvarans API. Hyperspektral bild: SHARE 2012: SpecTIR Hyperspectral Airborne Experiment 2012 [11][12].

Tyvärr visade det sig att programvaran hade stora problem när flera av dessa algoritmer skulle testas. Som indata användes en förhållandevis liten hyperspektral bild med storleken 285x483 pixlar och 360 spektralband. Denna testbild kommer från ett publikt dataset insamlat under mätkampanjen SHARE 2012: SpecTIR Hyperspectral Airborne Experiment 2012 [11][12]. Vissa av algoritmerna i Soxet GXP® fungerade oklanderligt, men i de algoritmer som kräver att användaren definierar referensspektrum från bilden eller ett referensbibliotek kraschade alternativt låstes programmet helt när referensspektrum skulle samplas från den aktuella bilden. Detta gjorde att dessa algoritmer inte gick att köra. I andra fall resulterade algoritmerna i enbart ett felmeddelande.

4.3.3 Gränssnitt för tredjepartsprogram

Programvarutillverkaren inkluderar även ett API (Application Programming Interface) till SO CET GXP® som gör det möjligt att kommunicera med och utveckla egna plug-ins till programmet. API:et använder programmeringsspråket C++ och kommer med en övergripande dokumentation av de tillgängliga anropen samt en uppsättning mer utförliga exempel för att komma igång med egna funktioner i programmet.

Det mest intressanta för vårt ändamål var att testa möjligheten att utöka SO CET GXP® med nya algoritmer för bildanalys. API:et har för detta en plug-in-arkitektur där en ny funktion kan läggas till under "Spectral Algorithms" i "Analyze" menyn. Genom att följa exempelkoden för algorithm-plugin kunde nya funktioner läggas till i programmenyn. Figur 16 visar hur denna meny ser ut efter att några nya funktioner lagts till under "FOI Single Image Algorithms" och "FOI Two Image Algorithms".

De initiala testerna visar att API:et gör det möjligt att utöka funktionaliteten i programvaran med egenskriven programkod. De medföljande exemplen underlättar arbetet att komma igång med detta men kunde gärna ha varit fler för att tydligare se API:ets potential. Exemplen var konfigurerade för Microsoft Visual Studio 2008 och enbart 32-bitar vilket gjorde jobbet att få igång exempelkoden större med nuvarande version av Visual Studio. För att verkligen förstå möjligheterna med och lära sig API:et krävs mycket tid och kontinuerligt arbete. En arbetsinsats som till en början kan vara lätt att underskatta tidsåtgången för.

5 Framtida inriktning för projektet

Under 2016 kommer projektet fortsätta utvecklingssatsningarna på sensorsidan, med planen att kunna demonstrera hyperspektral avbildningsteknik under projektets avslutande år (2017). En del av verksamheten för nästa år består därför av att finna lämpliga tillämpningar och praktiska former för detta, något som sker i samarbete med andra sensornära FoT-projekt med intresse för tekniken samt genom kontakter med Försvarmakten. Några möjliga utvecklingsspår, både på kortare och längre sikt beskrivs nedan under avsnitten 5.1 och 5.2. Inom hyperspektral signal- och bildbehandling kommer studier genomföras, både av bredare och djupare karaktär, kring vad nya ansatser inom Deep Learning kan tillföra området. Avsnitt 5.3 försöker förklara vad detta begrepp innebär samt studieinriktningen för nästa års verksamhet.

5.1 Fortsatt utveckling av den hyperspektrala LWIR-kameran

En framtida förbättring av den hyperspektrala LWIR-sensorn är att ersätta den okylda mikrobolometer-kameran i nuvarande design med en kyld MCT-kamera (eller möjligtvis T2SL), vilket skulle ge bättre signal/brus-prestanda och eventuellt högre insamlingstakt. Investeringskostnaden för en kyld LWIR-kamera med bred spektralrespons och hög spatial upplösning är dock fortfarande väldigt hög, men eventuellt kan ett lån av en sensor bli aktuellt. Prestandan hos okylda mikrobolometer-kameror blir dock allt bättre och ett mer ekonomiskt alternativ skulle vara att ersätta nuvarande kamera med en nyare. Detta skulle också medföra att nuvarande kompakta design kan bibehållas. En annan möjlig förbättring i nuvarande design vore att kyla och temperaturstabilisera de optiska komponenterna, i syfte att minska instrumentets termiska egenemission. Detta medför dock en mer skrymmande design och en högre effektförbrukning.

LWIR-sensors spektrala egenskaper och brusegenskaper har studerats tidigare [1][2], men med de nya modifikationerna av sensorn samt en eventuell ny kamera bör detta omvärderas. Inledande studier kring materialklassificering har gjorts över en statisk scen med olika mineralmaterial [3], flera liknande studier med militäroperativ materiel (ex. olika kamouflagematerial) kan vara tänkbara i ett nästa steg. Det bör noteras att användningsområdet för LWIR-sensorn i sin nuvarande design är något begränsat. Att exempelvis montera LWIR-sensorn i ett flygplan är inte realistiskt p.g.a. sensors vibrationskänslighet. En mer robust design, och därmed större flexibilitet i signaturmätningar, skulle fås om den gjordes monolitisk, d.v.s. i ett enda stycke. Detta är dock något som ej är möjligt inom ramarna för FoT-projektet utan kräver samarbeten knutna mot tillverkare.

En annan möjlig framtida vidareutveckling är också att tillföra en polarimetrisk förmåga i sensorn. Eftersom andra delar av projektet studerar och utvecklar tekniker för polarimetrisk avbildning i LWIR-området och intresse även finns från andra FoT-projekt kring tillämpningar av denna teknik, bör olika samarbeten och synergieffekter kunna utnyttjas.

5.2 Fortsatt utveckling av den hyperspektrala VNIR-kameran

Under 2016 ska den hyperspektrala VNIR-kameran vidareutvecklas vad gäller framför allt skanning, datainsamling, kalibrering och signal- och bildbehandling. För skanning är en metod med vridbord aktuell, där kameran monteras på en roterbar och motorstyrd platta som sveper synfältet över scenen. För datainsamling är synkning av kameravridning och bildtagning kritisk. Ett stort arbete kommer även att läggas på att ta fram metoder och rutiner

för spektral, radiometrisk och geometrisk kalibrering av den hyperspektrala kameran. Geometrisk kamerakalibrering syftar till att kunna översätta en pixel i kameran till en fysisk position i scenen och är särskilt kritisk för den valda sensordesignen. Vid utveckling av signalbehandling till kameran, ska den försöka anpassas till HSI-toolboxen.

Under senare delen av 2016 och sista året för projektet (2017) är planen sedan att utvärdera kamerans prestanda, inkluderande en demonstration av sensorn och tekniken. Arbetet sker i samarbete med andra FoT-projekt inom sensorområdet, med vilka diskussioner förs kring passande tillämpningar (exempelvis upptäckt av kamouflage, ytlagda minor och IED-hot).

5.3 Deep Learning för hyperspektrala tillämpningar

Deep Learning är en relativt ny ansats inom maskininlärning som har presenterat ytterst lovande resultat inom flertalet bildbehandlingstillämpningar och då speciellt svåra problem där alternativa ansatser framgångar har varit begränsade. Inom Deep Learning 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 oannoterad träningsdata med oövervakade (unsupervised) inlärningsmetoder, dvs. utan kunskap om vad bilderna föreställer/innehåller (bilar, träd, ansikten, osv.). En annan central metod inom Deep Learning är s.k. faltande neurala nätverk (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 tillgänglig data har i många tillämpningar gett avsevärt bättre resultat än en manuell särdragsextraktion, som vanligen kräver stor domänkänedom.

Under 2015 har en bredare studie genomförts kring Deep Learning, i syfte att identifiera möjliga tillämpningar där Försvarmakten kan få nytta av teknikerna. I denna studie har det framkommit att metoderna på senare tid börjat användas inom exempelvis hyperspektral avbildning och då primärt för måldetektion, målklassificering och materialsegmentering. Under 2016 kommer projektet därför genomföra fokuserade studier kring aktuell forskning inom området hyperspektral avbildning där metoderna används och vilka eventuella förbättringar de nya metoderna skulle kunna innebära jämfört med de mer konventionella som används idag. Studierna innebär både översiktliga litteraturstudier liksom mer praktiska experiment. De praktiska experimenten kommer i ett första steg att inrikta sig mot s.k. auto-encoders, en frekvent förekommande teknik inom Deep Learning där data avbildas på sig själv genom en latent representation av lägre dimension. Auto-encoders använder neurala nätverk för att åstadkomma en komprimerad representation och har potential att kunna användas i spektralbandsanalys för att avgöra vilka spektralband som innehåller relevant information och vilka band som innehåller redundant information. Detta skulle kunna underlätta visualisering av hyperspektrala bilder men även öka måldetektions- och målklassificeringsförmågan. Studier kommer att genomföras mot faltande neurala nätverk för automatisk särdragsextraktion, i syfte att förbättra detektions- och klassificeringsförmågan av utbredda mål.

6 Slutsatser

Årets verksamhet har fokuserat på fortsatt sensorutveckling samt mjukvaru- och algoritminventering inom signalbehandling.

Sensorutvecklingsarbetet sker på två fronter med två olika sensorer i två olika våglängdsband. Arbetet med den hyperspektrala interferometriska LWIR-sensorn har koncentrats kring spektrala och radiometriska kalibreringsfrågor och några möjliga kalibreringsmetoder har identifierats och utvärderats. Ett nystartat utvecklingsprojekt har också sjuösatts kring en hyperspektral sensor i VNIR-området, där en vanlig konsumentkamera (systemkamera) modifierats med ett specialfilter. Hög spatial upplösning, kombinerat med kompakt format och låg vikt gör sensorn unik i jämförelse med tillgängliga kommersiella sensorer på marknaden. Utvecklingssatsningarna fortsätter under nästa år med planen att demonstrera de båda sensorerna under projektets sista år.

Inom området signalbehandling av hyperspektrala bilddata har en översikt och uppdatering gjorts av den FOI-utvecklade HSI-toolboxen, främst avsedd för egna forskningsändamål. Förutom denna mjukvara har även en utvärdering genomförts av Opticks och SOCET GXP®. Det gemensamma för dessa programvaror är att de innehåller en snarlik uppsättning av algoritmer för materialklassificering, anomalidetektion och spektral signaturmåtkning. Fördelarna med vår egen HSI-toolbox är att den är helt anpassningsbar enligt våra egna önskemål, är skrivet i programmeringsspråket MATLAB och redan nu innehåller en bra uppsättning algoritmer. Nackdelarna är att det är få personer som vidareutvecklar koden och att den saknar ett bra grafiskt gränssnitt vilket skulle göra programmet mer användarvänligt. För detta ändamål skulle Opticks kunna vara ett bra komplement eftersom programmet är gratis, bygger på öppen källkod och har ett välutvecklat gränssnitt. Dessutom inkluderar Opticks ett programmeringsgränssnitt till MATLAB, vilket erbjuder möjligheten att direkt koppla ihop algoritmerna från HSI-toolbox med programmet. Programvaran SOCET GXP®, som används av Försvarsmaktens bildtolkare idag, innehåller en diger uppsättning av verktyg, funktioner och algoritmer samt har det mest utvecklade gränssnittet för geografiska data med stort fokus på visualisering och annotering för bildtolkningsändamål. Dessvärre visade det sig att programmets inbyggda hyperspektrala algoritmer i flera fall fallerade, men eftersom det är möjligt att lägga till nya egna funktioner med hjälp av det medföljande programmeringsgränssnittet skulle detta kunna åtgärdas. Under 2016 kommer studiearbetet inom signal- och bildbehandling att fokusera på de nya ansatser för mönsterigenkänning som området Deep Learning erbjuder.

7 Referenser

- [1] I. Renhorn, T. Svensson, S. Cronström, T. Hallberg, R. Persson, R. Lindell, G. Boreman, *Demonstration of a Corner-Cube-Interferometer LWIR Hyperspectral Imager*, *J Infrared Milli Terahz Waves*, 31:60-65 (2010)
- [2] D. Bergström, I. Renhorn, T. Svensson, R. Persson, T. Hallberg, R. Lindell, G. Boreman, *Noise-properties of a corner-cube Michelson interferometer LWIR hyperspectral imager*, *Infrared Technology and Applications XXXVI*, Proc. of SPIE Vol. 7660, 76602F (2010)
- [3] D. Bergström, M. Lundberg, B. Levin, T. Svensson, M. Axelsson, L. Axelsson, J. Eriksson, T. Hallberg, C. Åkerlind, E. Bilock, J. Hedborg, O. Friman, I. Renhorn, *IR-spaning 2012-2014, Slutrapport* (2014)
- [4] Y. Ferrec, J. Taboury, H. Sauer, P. Chavel, P. Fournet, C. Coudrain, J. Deschamps, J. Primot, *Experimental results from an airborne static Fourier transform imaging spectrometer*, *Applied Optics*, Vol.50, No.30 (2011)
- [5] N. Matallah, H. Sauer, F. Goudail, J-C. Fontanella, Y. Ferrec, J. Taboury, P. Chaval, *Design and first results of a Fourier Transform imaging spectrometer in the 3-5 μm range*, Proc. of SPIE Vol. 8167 (2015)
- [6] P. Lucey, K. Horton, T. Williams, B. Denevi, *High-performance Sagnac interferometer using uncooled detectors for infrared hyperspectral applications*, Proc. of SPIE, Vol.6565 (2007)
- [7] P. Lucey, J. Hinrichs, J. Akagi, *A compact LWIR hyperspectral system employing a microbolometer array and a variable gap Fabry-Perot interferometer employed as a Fourier transform spectrometer*, Proc. of SPIE, Vol.8390 (2012)
- [8] I. Fadi, T. Svensson, *Avbildande spektrometri baserad på Sagnac-interferometern*, FOI-D--0326--SE (2008)
- [9] M. Eismann, *Hyperspectral Remote Sensing*, SPIE Press (2012)
- [10] I. Renhorn, V. Achard, M. Axelsson, K. Benoist, D. Borghys, X. Briottet, R. Dekker, A. Dimmeler, O. Friman, I. Kåsen, S. Matteoli, M. Lo Moro, T. Olsvik Opsahl, M. van Persie, S. Resta, H. Schilling, P. Schwering, M. Shimoni, T. Vegard Haavardsholm and F. Viallefont, *Hyperspectral reconnaissance in urban environment*, Proc. SPIE 8704, *Infrared Technology and Applications XXXIX*, 87040L (2013)
- [11] A-M Giannandrea, N. Raqueno, D. Messinger, J. Faulring, J. Kerekes, J. van Aardt, K. Canham, S. Hagstrom, E. Ontiveros, A. Gerace, J. Kaufman, K. Vongsy, H. Griffith, B. Bartlett, E. Ientilucci, J. Meola, L. Scarff, B. Daniels, *The SHARE 2012 Data Campaign*, Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XIX, Baltimore (USA) (2013)
- [12] Webb-sida: <http://www.rit.edu/cos/share2012/>, *SHARE 2012: SpecTIR Hyperspectral Airborne Experiment 2012*, Data Courtesy of: Digital Imaging and Remote Sensing Laboratory, Chester F. Carlson Center for Imaging Science, Rochester Institute of Technology, Rochester, NY USA.

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