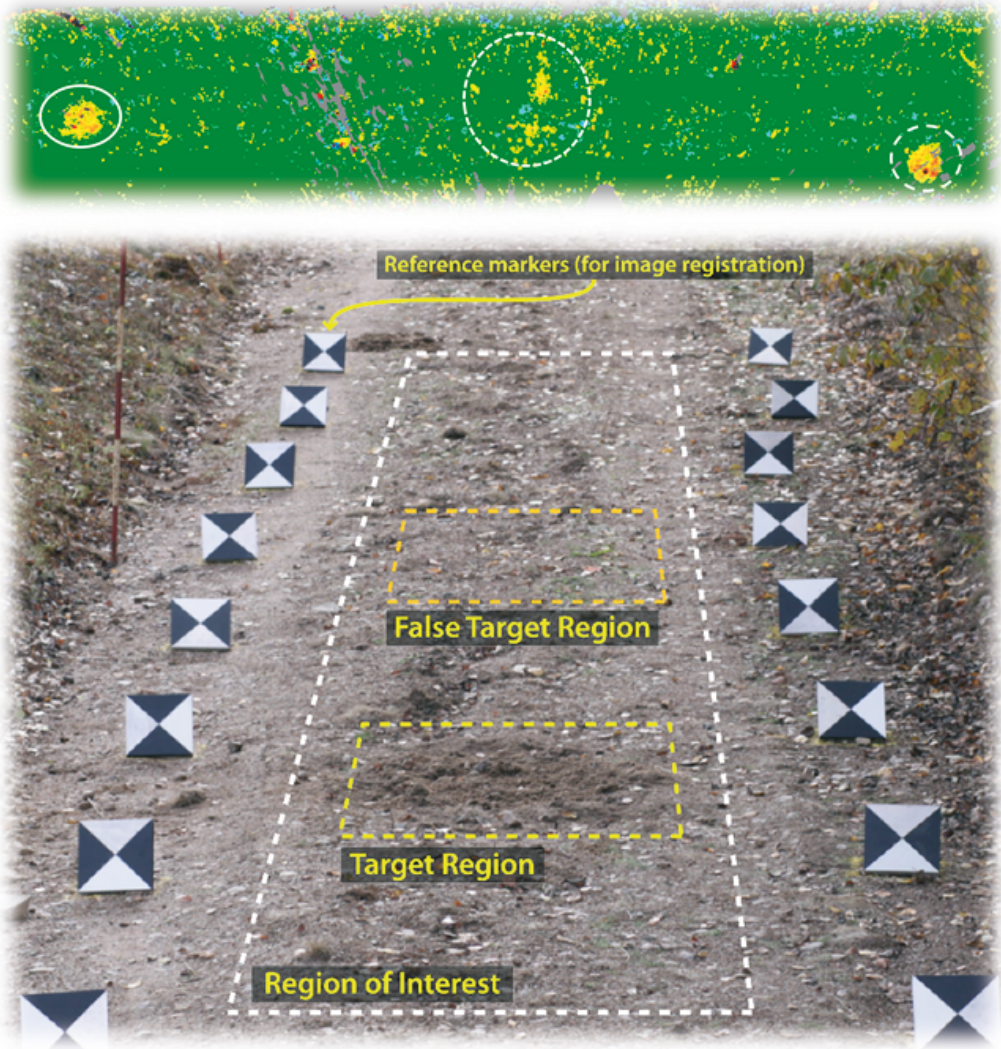


DIETMAR LETALICK, PER-OLOF FRÖLIND, MARTIN GLIMTOFT,
DAVID GUSTAFSSON, JULIA HEDBORG, IDA JOHANSSON,
HÅKAN LARSSON, HENRIK PETERSSON, MATTIAS SVANQVIST, MATILDA ÅGREN



Dietmar Letalick, Per-Olof Frölind, Martin Glimtoft,
David Gustafsson, Julia Hedborg, Ida Johansson,
Håkan Larsson, Henrik Petersson, Mattias
Svanqvist, Matilda Ågren

Sensorer för upptäckt av IED

Slutrapport 2015

Titel	Sensorer för upptäckt av IED. Slutrapport 2015
Title	Sensors for detection of IED:s. End report 2015
Rapportnr/Report no	FOI-R--4187--SE
Månad/Month	December
Utgivningsår/Year	2015
Antal sidor/Pages	45 p
ISSN	1650-1942
Kund/Customer	FM Best.nr. AF.9220412
Forskningsområde	7. Sensorer och signaturanpassning
FoT-område	Sensorer och signaturanpassning
Projektnr/Project no	E54569
Godkänd av/Approved by	Per Johannesson
Ansvarig avdelning	STS

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

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

Sammanfattning

Sensorfusion och tekniken med samverkande sensorer är en möjlighet att hantera det komplexa problemet att upptäcka IED:er. Som ett första steg i arbetet med sensorfusion beskrivs i denna rapport arbetet med bildalstrande passiva elektro-optiska (EO) sensorer för fusionsprocessen. Fortsatt arbete kommer att inkludera även andra sensorer, med målet att utveckla en generell fusionsplattform med fusion på beslutsnivå.

Ett fältförsök har genomförts med syfte att samla in mätdata för användning till utveckling av algoritmer för sensorfusion. En grusväg med nedgrävda IED:er och tillhörande komponenter registrerades med flera olika EO-sensorer. Bildintensitet och markytans textur utnyttjades för att detektera grävda områden. En intressant iakttagelse är att grävspår kunde detekteras under minst två veckor efter nedgrävning. Resultaten indikerar att automatisk detektion av områden som avviker i förhållande till "normalbilden" (dvs. ej grävda områden) är möjlig.

Även aktiva sensorer i form av 3D-lidar och Ramanspektroskopi har utnyttjats och utvecklats i projektet. 3D-lidar har främst använts för förändringsdetektion. Tekniken för avståndsdetektion av explosivämnesspår baserat på Ramanspektroskopi har vidareutvecklats och förbättrats. En metod för undertryckning av fluorescens genom användning av en Kerr-cell har implementerats. Med denna metod förbättras känsligheten genom ett förbättrat signal-till-brusförhållande. Vidare har tekniken med kodad apertur använts för att möjliggöra avbildande mätningar med utnyttjande av en spektrometer.

En viktig del i projektet har varit internationella kontakter och internationellt utbyte, vilket har givit kunskap om teknikutveckling och intressanta forsknings-spår. Medverkan i olika arbetsgrupper inom NATO, EDA och EU redovisas, bl.a. deltagande i två fältförsök.

Nyckelord: IED, sensorfusion, detektion av explosivämnen, elektrooptiska sensorer, 3D-lidar

Summary

Sensor fusion and technologies with interacting sensors is a possibility to deal with the complex problem of IED detection. In this report, fusion of imaging passive electro-optical (EO) sensors is described as a first step in the development of a sensor fusion process. Continued work will include other sensors, with the aim of developing a general platform for decision level fusion.

A field trial was carried out with the purpose of collecting data to be used for the development of algorithms for sensor fusion. A dirt road with buried IEDs and components registered with several EO sensors. Image intensity and ground surface texture is used for detecting the disturbed areas. An interesting observation is that the digging traces were detectable at least two weeks after the burial. The results indicate that automatic detection of anomalous areas is possible.

Also active sensors like 3-D lidar and Raman spectroscopy have been used and developed in the project. 3-D lidar has mainly been used for change detection. The technology for stand-off detection of explosive traces based on Raman spectroscopy has been further developed and improved. A method for suppressing the fluorescence by using a Kerr cell was implemented. This improves the sensitivity by increasing the signal-to-noise ratio. Furthermore, the technique of compressive sensing with a coded aperture was used to allow imaging using a spectrometer.

An important part of the project has been international contacts and international exchanges, which has increased the knowledge of technology and interesting research tracks. Participation in various working groups within NATO, EDA and the EU is reported.

Keywords: IED, sensor fusion, detection of explosives, electro-optical sensors, 3-D lidar

Innehållsförteckning

1	Inledning	6
1.1	Internationella utvecklingstrender	6
1.2	Rapportstruktur	7
2	Scenarier och hot	8
3	Anomalidetektion med elektrooptiska sensorer	9
3.1	Laboratiemätningar i reststrålebandet.....	9
3.2	Fältförsök	9
4	Modellering av värmetransport i marken	16
4.1	PolSig.....	17
5	Sensorfusion	19
5.1	Inledande arbete	19
5.2	Utformning av generisk fusionsplattform	20
5.3	Utformning av sensornära fusionsmetoder.....	21
5.4	Slutsatser och förslag på fortsatt arbete	27
6	Radarsensorer för upptäckt av IED	28
7	Ramanspektroskopi för detektion av explosivämnesspår	29
7.1	Optisk Kerr-grindning	30
7.2	Kodad apertur	32
7.3	Möjlig utveckling	35
8	Internationell samverkan	37
8.1	NATO	37
8.2	EDA.....	39
8.3	EU EDD WG	39
9	Diskussion	41
10	Publikationslista	42
11	Referenser	44

1 Inledning

Denna rapport utgör slutrapport för FoT-projektet *Sensorer för upptäckt av IED*. Syftet med projektet har varit att studera användbara sensorer och tekniker och att därmed nå en starkt förmåga till detektion och lokalisering av IED:er och tillhörande komponenter. Projektet bedöms ligga på TRL 2-4. Eftersom IED:er kan skilja sig väsentligt både avseende utformning och placering är det ett mycket komplext problem att upptäcka dessa. Ingen enskild sensor lär ha förmågan att klara alla situationer. Istället lyfts sensorfusion och tekniken med samverkande sensorer fram som en möjlighet att komma framåt.

Under projektperioden har därför arbetet med sensorfusion varit en viktig del. Vi har valt att särskilt studera bildalstrande passiva elektrooptiska (EO) sensorer för fusionsprocessen. Dessutom har vi arbetat med aktiva sensorer i form av 3D-laserradar och Ramanspektroskopi.

På sikt bedöms en generell fusionsplattform, där fusionen sker på beslutsnivå, vara ett utvecklingsmål. En sådan plattform, exempelvis geo-baserad, ger möjlighet att utnyttja kunskap om geografiska risksektorer och hantera hur olika sensorer arbetar ihop i form av invisning, sensorstyrning mm. Som ett första steg har vi i projektet valt att utforma sensornära metoder för fusion mellan EO-sensorer. Målsättningen har varit att utforma ett koncept med adaptivitet i sensorsystemet så att avvikelser från ”normalbilden” kan detekteras. Detta beskrivs närmare i kapitel 5.

Under projektperioden har ingen experimentell verksamhet på radarområdet bedrivits; aktiviteten har begränsats till omvärldsbevakning och modellering av radarmålares för vissa IED-typer. Telekrigaspekter (exempelvis radioutlösta IED:er) behandlas inte i detta projekt.

1.1 Internationella utvecklingstrender

Internationella trender är fortsatt satsning på EO-sensorer; både bredbandiga sensorer och hyperspektrala sensorer. Hyperspektrala sensorer utvecklas i LWIR och längre våglängdsband för detektion av explosivämnen. För att möta hotet från sidverkande IED:er utvecklas sidtittande radar baserat på markfordon. Som komplement till mikrovågsradar har även akustisk syntetisk aperturteknik föreslagits. En förbättrad detektionsförmåga har demonstrerats med en sådan sensorkombination.

För detektion av nedgrävda objekt är markpenetrerande radar (GPR) en intressant sensor, trots begränsningar exempelvis i fuktig mark. Framåttittande (FLGPR) och även flygburna system har demonstrerats. Som komplement till GPR i fuktiga områden nämns även laservibrometri.

1.2 Rapportstruktur

I kapitel 2 presenteras kortfattat de hotscenarier som har legat till grund för arbetet i projektet. Laboratiemätningar på störd jord samt ett fältförsök för datainsamling beskrivs i kapitel 3, där även förändringsdetektion med 3D-lidar beskrivs. En modell för värmetransport i marken presenteras i kapitel 4. Arbetet med sensorfusion behandlas i kapitel 5. Markpenetrerande radar avhandlas i kapitel 6 och Ramanspektroskopi för detektion av explosivämnesspår i kapitel 7. Internationell samverkan rapporteras i kapitel 8.

2 Scenarier och hot

I projektets inledning utarbetades tre arbetsscenarier att ligga till grund för det fortsatta arbetet och de sensorstrategier som studerats[1]:

- Uppsutten patrull och konvoj på grusväg med en nedgrävd offerutlöst IED (*Victim operated IED*, VOIED) och utlösning med tryckplatta.
- Konvoj med lätt pansrade eller oskyddade fordon och fjärrutlöst splitterladdning (*Directional Fragmentation Charge*, DFC) som placerats i ett träd.
- Uppsutten patrull på gata i urban miljö med en självmordsbombare i ett fordon (*Suicide vehicle borne IED*, SVBIED) som kolliderar med ett patrullfordon.

Nedgrävda IED:er kan hittas på platser där marken möjliggör enkel utgrävning. Vanligtvis är de utplacerade på platser där det finns mycket trafik, kanske på grund av att vägen utgör den enda länken mellan två platser och därför är av stor strategisk betydelse. Grusvägar är idealiska med IED begrävd på djup mellan 5 cm till 1 m. Grusvägar innebär också att fordonens hastighet är ganska låg.

IED:er vid vägkanten är typiska för krisområden där väginfrastrukturen är av någorlunda hög kvalitet, med asfalterade eller hårdgjorda vägbanor, vilket medför att det inte är lätt att gräva ner en IED (även om det är möjligt). Dessa typer av IED:er är vanligen dolda för att smälta in i den omgivande miljön. De kan exempelvis döljas i träd eller buskage. Placeringen kan vara upp till 20 m vid sidan av vägen.

En IED som placerats i eller på ett fordon (t.ex. bilar, motorcyklar, cyklar, djur) benämns *Vehicle Borne IED* (VBIED), alternativt *Suicide Vehicle Borne IED* (SVBIED). En VBIED finns ofta i ett stillastående fordon, medan ett rörligt fordon utgör en SVBIED. Huvudladdningen utgörs vanligen av en stor sprängladdning, från 50 kg upp till kanske flera ton (beroende på fordonstyp).

3 Anomalidetektion med elektrooptiska sensorer

Att kunna detektera störd jord på avstånd, för att upptäcka om någon nyligen har grävt ner en IED i t.ex. en grusväg, kan vara av stor vikt i områden med IED:er. Anomalier på markytan kan exempelvis vara det som brukar kallas ”störd jord”, dvs. spår i ytan efter grävning. Sensortekniker som har undersökts är hyper-spektrala sensorer, bredbandiga EO-sensorer i olika våglängdsband – från visuellt till LWIR – samt 3D-laserradar (3D-lidar). Andra anomalier som kan detekteras är skillnader i emission på markytan till följd av underliggande objekt. Detta har studerats tidigare [2] men inte i detta projekt.

I detta kapitel beskrivs laboratoriemätningar av den s.k. reststråleeffekten orsakad av störd jord, samt ett fältförsök med passiva EO-sensorer och 3D-lidar.

3.1 Laboratoriemätningar i reststrålebandet

En metod som tidigare har undersökts är att utnyttja det så kallade reststrålebandet (*Reststrahlen*) för kvarts, ett våglängdsområde i det termiska infraröda området med extra hög reflektans. Kvarts är ett mycket vanligt mineral och den största komponenten i vanlig sand. Enligt teorin beror reflektansen i reststrålebandet av kornstorleken hos jorden/sanden och då små partiklar kommer upp till ytan vid grävning kan det indikera att någon har grävt ner en IED på platsen. Då en tidigare studie av reststrålebandet i störd sand gav tvetydiga resultat har en mer systematisk studie gjorts på ren kvarts för att undersöka fenomenet och hur kornstorleken verkligen påverkar resultatet. Spektrala mätningar gjordes med en FTIR-spektrometer och det visade sig att kornen måste bli mycket små innan reflektansen i reststrålebandet förändrades. Även om effekten var tydlig är det tveksamt om den är detekterbar i ett verkligt scenario där kvartssanden är uppblandad med andra mineral och kornstorleken betydligt mer varierad än vid de genomförda laboratoriemätningarna. [3]

3.2 Fältförsök

I oktober 2014 utfördes ett omfattande försök [4] med syfte att samla in mätdata som kan användas för detektion av jord som störts som följd av nedgrävning av IED:er. Scenariot som efterliknades vid försöket var IED:er nedgrävda i grusväg med tryckplatta som utlösningmekanism. Sammanfattningsvis syftade försöket till att:

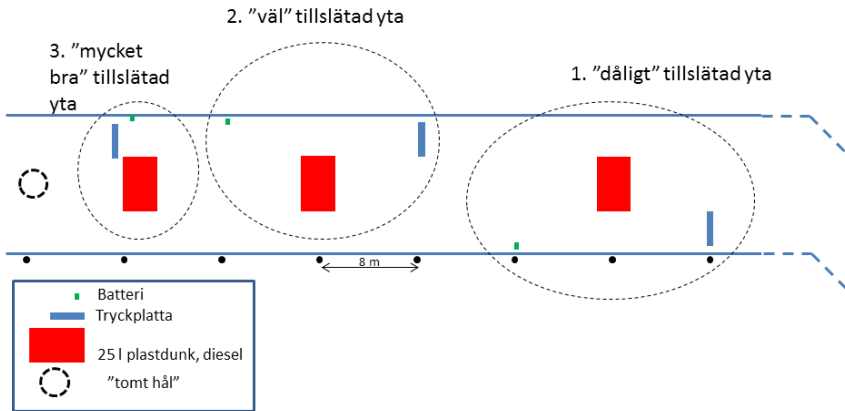
- Samla in mätdata som kan användas för utveckling av metoder att detektera IED:er nedgrävda i vägbanan.

- Undersöka om det med passiva bildalstrande sensorer i visuellt och IR respektive 3D-lidar går att detektera spår efter föremål som nyligen har grävts ner i en grusväg.
- Utvärdera algoritmer för detektion av störd jord genom fusion av flera våglängdsband.
- Undersöka om eventuella spår efter grävningen finns kvar efter några veckor.

Då föremål grävs ner i marken bildas det spår på ytan i form av strukturförändringar, förändring av fukthalten samt förändring av jordens/grusets kornstorlek då sammansättningen av jorden kan vara annorlunda under ytan och material som legat längre ner kommer upp till ytan vid grävning. Ett föremål som ligger nedgrävt strax under ytan kan också värmas upp eller kylas ner i annan takt än kringliggande mark vilket resulterar i temperaturskillnader vid ytan. Förhoppningen är att dessa effekter ska kunna detekteras av bildalstrande sensorer som är känsliga i olika våglängdsband, från visuellt till långvågs-IR (LWIR). Exempelvis kan skillnader i mikrostruktur och färg ses i visuellt och eller SWIR (*short wave infrared*) medan skillnader i temperaturer kan detekteras av LWIR. Vissa band i SWIR är också känsliga för fuktighet. Vilka av dessa effekter som uppkommer beror på vilken typ av mark det är samt omgivande faktorer såsom väderförhållanden.

Försöksplatsen Lilla Gåra valdes eftersom det fanns en grusväg som kunde användas ostört där under en längre period. Grusvägen delades in i två sträckor på 45 m respektive 65 m där den första sträckan fungerade som referens utan nedgrävda föremål.

För att efterlikna verkliga grävspår från en IED grävdes 20 l dieseldunkar ner tillsammans med tryckplatta och batteripack ungefär enligt figur 1 i den längre vägsträckan. Figur 2 visar en dieseldunk, tryckplatta och batteripack under och efter nedgrävning i grusvägen.



Figur 1: Ungefärliga positioner längs vägsträckan för de nedgrävda objekten. Efter nedgrävning slätades vägytan till med varierande noggrannhet: "dåligt", "väl" och "mycket bra" tillslätad.



Figur 2: Komplet IED med dieseldunk, batteripack samt tryckplatta under nedgrävning (t.v.) samt efter nedgrävning (t.h.).

3.2.1 Passiva EO-sensorer

För att detektera positionerna för de nedgrävda föremålen användes passiva bildalstrande sensorer i visuellt och IR samt aktiva lidar-sensorer. Sensorerna placerades på taket på en Land Rover så att synfältens mittpunkter hamnade ca 15 m framför bilen. Land Rover kördes längs grusvägen och stannades varannan meter och bilder spelades in med samtliga sensorer (figur 3). De passiva sensorer som användes visas i tabell 1.

För att kunna fusionera bilder från de olika kamerorna i efterhand placerades markörer som ger tydliga kanter i alla våglängdsband ut längs vägkanten. Data från både referenssträckan och sträckan med nedgrävda objekt spelades in före nedgrävning, precis efter nedgrävning, dagarna efter samt efter ca två veckor. Mer om resultatet av mätningarna presenteras i avsnitt 5.3.2 i denna rapport.

Tabell 1. Lista över de passiva sensorer som användes vid försöket på Lilla Gåra.

Förkortning	Kamera	Våglängdsområde	Synfält	Upplösning
RGB	Canon 5D MkII	1: Röd 2: Grön 3: Blå	24° × 16°	5616 × 3744
SWIR	FLIR X6580SC	1,5–2,8 µm	11° × 8.8°	640 × 512
MWIR		3–5 µm		
LWIR	FLIR SC660	7,5–13 µm	12° × 9°	640 × 480



Figur 3: Land Rover med de passiva sensorerna monterade på taket under mätning av referenssträckan.

3.2.2 3D-lidar

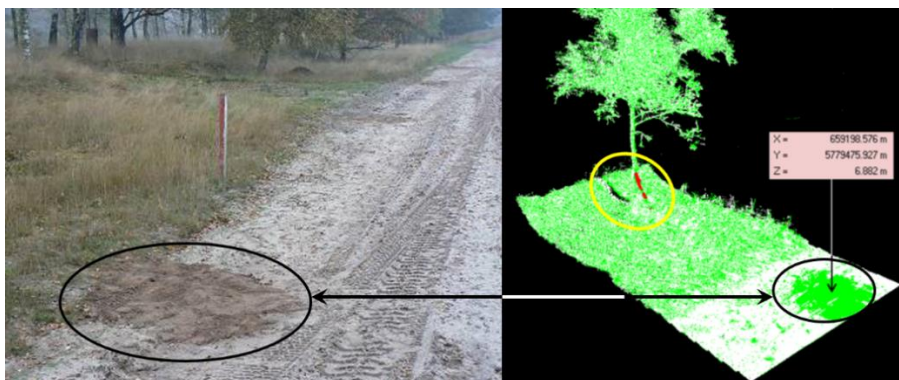
Förändringsanalys är metoden som i första hand används för att detektera störd jord ur data insamlad med 3D-lidar. Det innebär att två mätningar genomförda med ett tidsmellanrum, vanligen timmar till dagar, jämförs med varandra. Den första mätningen benämns referensmätning. Den andra mätningen benämns testmätning. För detektion av störd jord är det i huvudsak skillnaden i markytans höjd som är intressant att studera.

2012 genomfördes ett NATO-försök i nederländska Amersfoort. Försöket gick ut på att detektera främst ytlagda IED:er och indikatorer på insurgentverksamhet.

FOI deltog med statistiska mätningar (stillastående var 50:e meter) med laserskannern Riegl VZ-400 från taket på en bil. Under 2013 vidareutvecklades algoritmer för att automatiskt detektera förändringar. Automatisk detektion av objekt ned till ungefär 1 dm³ i storlek kunde demonstreras, under förutsättning att sensorn har fri siktlinje till objektet [5, 6]. Förändringar i markytan kunde visualiseras genom att enkelfärga de två punktmolnen (referens respektive test) i olika färger. Förändringen syns som en ökad densitet av den ena eller andra kulören beroende på om material har tagits bort eller lagts dit i förhållande till referensmätningen, se figur 4.

Vid försöken i Lilla Gåra 2014 användes på nytt den statistiska laserskannern Riegl VZ-400, men nu stående på stativ på marken. Mätningar genomfördes även med en egenutvecklad 3D-UAV (multirotorkoncept med 3D-lidar (Velodyne HPL-32E) integrerad i multirotorn tillsammans med tröghetsnavigering) [7]. För att inte riskera skador på multirotorn, som även skulle användas vid en demonstration i ett annat projekt, monterades den på taket på en Land Rover på ca 2,5 m höjd, se figur 5. Hela sensorkonceptet fungerade som vid flygning, med den skillnaden att motorerna inte startades. Höjden motsvarade den ungefärliga höjd en riktig flygning ska utföras på för att leta förändringar av störd jord.

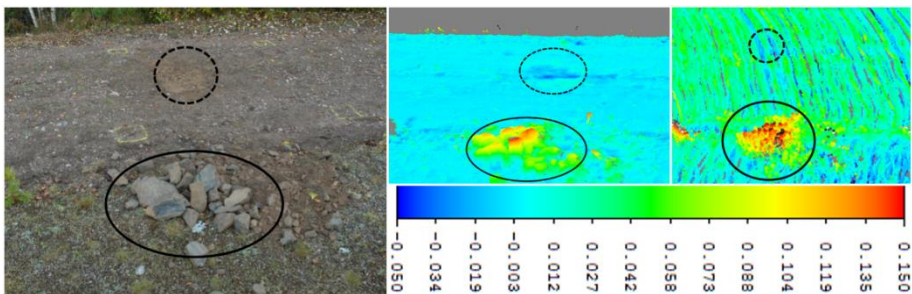
Figur 6 visar ett resultat från förändringsanalys av data från de båda aktiva lidar-systemen; färgskalan visar förändringen i höjdlid. Ytskiktet på vägbanan grävdes till ett djup av ca 5 cm, vidare lades en stenhög vid sidan om vägbanan. I data från båda sensorernas kan stenhögen tydligt noteras, medan den tillslutade ytan tydligt kan ses i analysen av data från den statistiska skannern (stativmonterade), men knappast kan synas i data från den dynamiska (multirotorn) annat än som en minimal förändring noterbart i bruset när vi vet platsen. Fortsatt utveckling av efterbehandlingen av data kommer att minska bruset i registreringen till lägre nivåer, så att förändringsanalys av störd jord ska kunna göras även från ett sensor-system placerat i en multirotor.



Figur 4. Visualiserad störd jord syns som en förtätning av den i det här fallet gröna kulören, vilket indikerar pålagd jord i förhållande till referensmätningen. Notera också den automatiskt detekterade pinnen som markerar den nedgrävda IED:n.

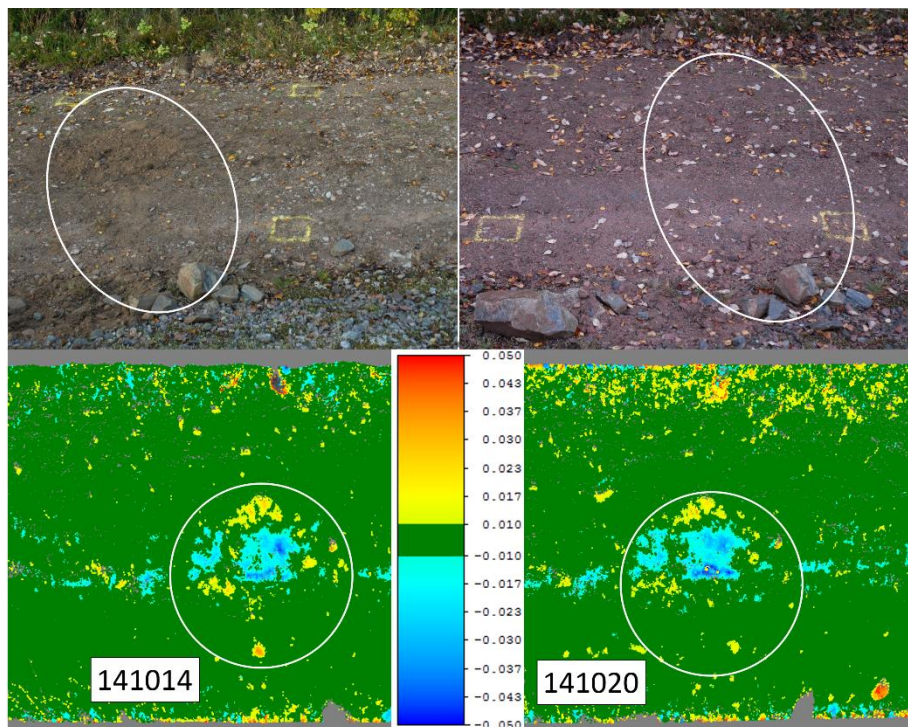


Figur 5. Laserskanner Riegl VZ-400 på stativ och laserskanner Velodyne HLP-32E monterad i en multirotor som i sin tur monterades på taket på en Land Rover.

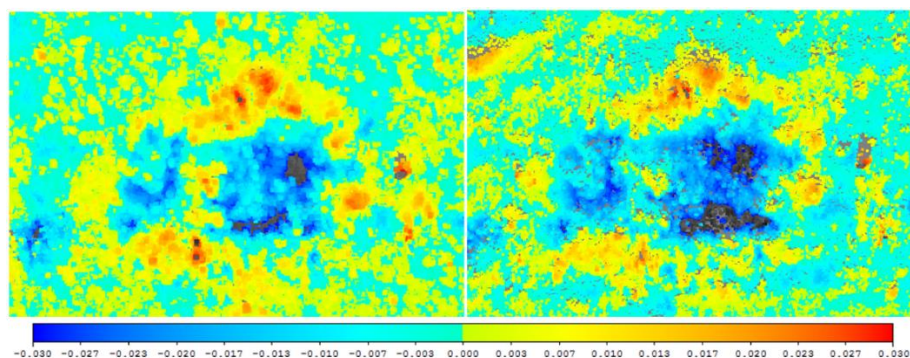


Figur 6. Resultat av förändringsanalys från statistiskt markbunden laserskanner samt dynamisk laserskanner från multirotor. Streckad ellips anger nedgrävt objekt och heldragen ellips ett antal stenar som lagts vid sidan av vägen vid nedgrävningen, mitten resultat från den markbundna statiska laserskannern och till höger resultat från den dynamiska laserskannern monterad i en multirotor på taket på en Land Rover. Färgskalan visar förändringen i höjdd -5cm till +15 cm.

En jämförelse mellan två mätningar av nedgrävt objekt med en knapp veckas mellanrum visar jämförbara resultat, se figur 7. Strukturen på marken har visuellt förändrats då det har regnat omkring 40 mm. Regnet har fallit i många mindre skurar. Den gröna färgen illustrerar områden där höjdförändringen håller sig inom ± 1 cm. Notera den ökade förtätningen av pixlar som inte är gröna, vilket indikerar en förändring över tiden. En närmare undersökning av enbart det störda området illustreras i figur 8, där färgskalan (förändring i höjdd) ligger inom ± 3 cm. Områden med blåa kulörer har ökat i den högra bilden, vilket visar att markytan har sjunkit något.



Figur 7. Det är sex dygn mellan bilderna i vänster respektive höger kolumn. Bilderna till vänster visar utseendet på det grävda hålet 2014-10-14 och bilderna till höger 2014-10-20. I båda fallen är mätningarna jämförda mot referensmätningen 2014-10-09. Notera den visuella (övre raden) förändringen av strukturen på hålet.

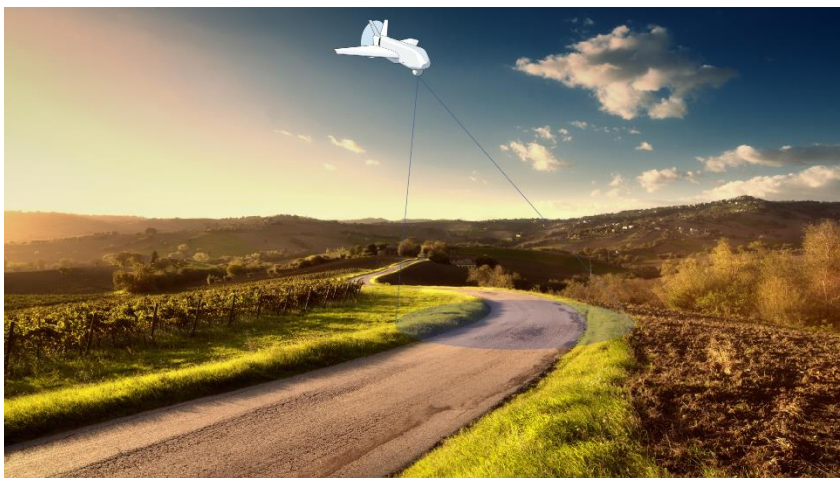


Figur 8. Bildparet visar uppförstoringar av de markerade områdena i figur 7. Till vänster är mätningen 2014-10-14 och till höger 2014-10-20. Mellan dessa datum har hålet sjunkit ihop marginellt, några mm. Notera ökning av blåa kulörer i den högra bilden som ligger på den negativa sidan avseende förändringar. Det har bland annat regnat mellan dessa mät-tillfällen.

4 Modellering av värmetransport i marken

I vissa situationer är det viktigt med förkunskap om markförhållanden, t.ex. en väg, innan man haft möjlighet att beträda marken. En typisk situation är framryckning i ett område där en konflikt pågår. I ett sådant scenario, för att försäkra sig om att det inte finns en IED nedgrävd, skulle man kunna tänka sig att modellera vägens termiska respons med avseende på hur väderhistoriken har varit i området för att skapa en "normalbild". Denna normalbild skulle kunna stödja en algoritm för förändringsdetektion med passiva termiska sensorer. Alternativt skulle vägsträckan kunna simuleras och utgöra en del av ett taktiskt stödsystem (eng. *tactical decision aid*, TDA) för att besvara frågor som "Hur stor kontrast kan förväntas?" eller "När erhålls maximal kontrast mot normal väg och om något skulle vara nergrävt?"

Det finns antal kommersiella programvaror som ger möjlighet att göra dessa scenmodelleringar, t.ex. RadThermIR™, CameoSim™ eller SE-Workbench™. Gemensamt för alla dessa är att de kräver bra materialparameterar för att kunna beräkna representativ scen. Vi presenterar här en modell för hur man med hjälp av mjukvara tillsammans med data från en IR-kamera (exempelvis på en flygande farkost, se figur 9) kan studera förändringen i omgivningen över tiden och på så sätt beräkna relevanta materialparametrar.



Figur 9. En flygburen IR-kamera skannar av vägen och samlar in data för beräkning av materialparametrar.

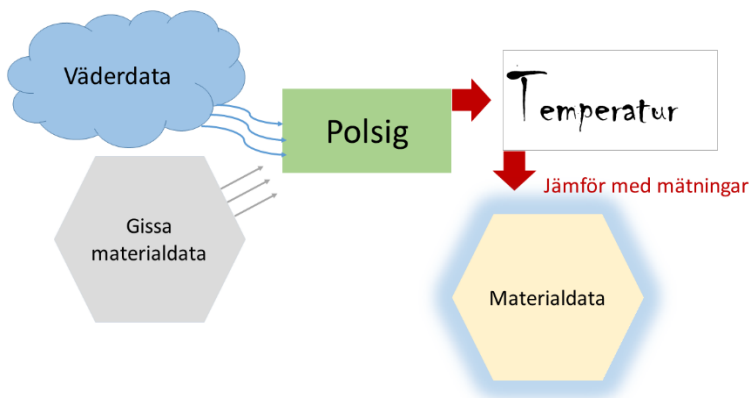
4.1 PolSig

Programvaran **Polarimetrisk Termisk Signatur**, PolSig, har utvecklats vid FOI [8] och beräknar IR-signaturer. IR-signaturer beror framför allt på objektets temperatur och för enkelhets skull kommer vi i fortsättningen diskutera temperaturer. Värmeflöden sker på tre olika sätt: värmeledning, värmestrålning och konvektion. Programmet PolSig behöver två typer av ingångsdata: materialparametrar och väderparametrar. PolSig genererar med hjälp av dessa indata en temperatur på det simulerade objektet (t.ex. en väg). Väderparametrarna som t.ex. lufttemperatur, vindhastighet och riktning, solinstrålning, himmelsinstrålning mm. kan registreras med hjälp av en väderstation. Materialparametrarna (tabell 2) är svårare eftersom man inte har tillgång till den aktuella vägen och kan mäta dessa på traditionellt sätt.

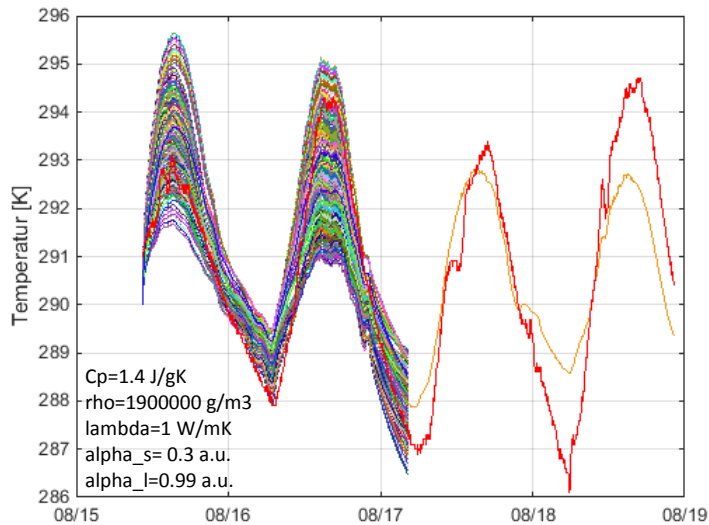
Tabell 2. Materialparametrar som ingår i modellen.

Beteckning	Benämning	Enhet	Värde
rho	densitet	kg/m ³	1600-2000 (sand)
Cp	specifik värmekapacitet	J/g·K	0,835 (sand)
lambda	värmeledningsförmåga	W/mK	0,75 (torr jord)
alpha_s	solabsorptionskoefficient	dimensionslöst	0,5
alpha_l	långvågabsorptions-koefficient	dimensionslöst	0,99

Med hjälp av en iterativ process kan man testa olika värden på respektive materialparameter, räkna ut motsvarande temperaturkurva med PolSig och på så vis hitta de värden på materialparametrarna som stämmer bäst med den uppmätta temperaturkurvan (figur 10).



Figur 10. Schematisk bild över hur man kan använda PolSig för att bestämma materialparametrarna.



Figur 11. Genererade kurvor (flerfärgade) jämförs med den uppmätta (röd). Den bruna kurvan är en prediktion där man använde de framräknade materialparametrarna.

I figur 11 visas resultatet av en sådan simulering. 343 kurvor (olikfärgade) matchas mot den uppmätta kurvan (röd). Detta ger värdena för materialparametrarna. Dessa används i sin tur för att tillsammans med rådande väderdata generera kommande scenario. Den röda kurvan är det uppmätta scenariot och den bruna är det beräknade. Överensstämmelsen är relativt god; den uppmätta kurvan har en något större amplitud än den beräknade.

Vi får en ganska god prediktion för temperaturkurvan trots att vi utelämnat viktiga parametrar, exempelvis:

- Jordens fuktighet
- Molnighet
- Nederbördspåverkan
- Vattenavdunstning från ytan

Näst på tur står att utvärdera betydelsen av dessa och inkludera de som behövs i modellen. En annan viktig fråga är hur tät sampling som behövs för att kunna ta fram representativa materialparametrar.

5 Sensorfusion

Ett fokusområde för projektet har varit att studera hur man kan utnyttja och kombinera multipla sensorer. Grundtanken har varit att utifrån mätningar och kunskap om grundläggande fenomenologi kunna utveckla metodik för att fusionera sensordata för att få en mer tillförlitlig detektion av IED:er. Relevanta deluppgifter har varit att:

- Studera vilka sensorkombinationer som är mest intressanta (kostnadseffektiva), och analysera förutsättningarna till sensorfusion på olika nivåer (rådatafusion, särdragsfusion, detektorfusion, etc.).
- Utveckla/vidareutveckla särdrag och sensormodeller som ska ligga till grund för fusion, samt validera dessa, i första hand mot befintliga mätningar.
- Föreslå automatiska fusionsmetoder som utifrån modeller och aktuell situation gör en sammanställd detektion med god tillförlitlighet.
- Utvärdera föreslagna fusionsmetoder och sensorkombinationer med både simuleringar och med mätdata mot bakgrund av systemkomplexitet (kostnad).

En målsättning med projektets arbete inom sensorfusion har varit att kunna ge förslag på lämpliga systemarkitekturer och fusionsmetoder för utnyttjande av flera sensorer.

5.1 Inledande arbete

I projektets inledning gjordes en översyn av vilka sensorer och informationskällor som har potential att bidra till detektion av nedgrävd IED. Speciellt samlades information om hur varje sensor är tänkt att tillämpas, vilken typ av data den genererar och vilka detektionsmetoder som ev. finns tillgängliga. Fokus lades på sådana sensorer som finns tillgängliga för FOI. Även den potentiella nyttan med informationskällor som exempelvis geografiska informationssystem (GIS) värderades. Arbetet gjordes för att få ett underlag för hur ett kombinerat sensorsystem kan utformas.

Detta arbete ledde till två möjliga spår för det fortsatta projektet:

- I. Utformning av generisk fusionsplattform
- II. Utformning av sensornära fusionsmetoder för att fusionera EO-data.

Inledningsvis utfördes visst arbete för att studera möjligheter med att utforma en generisk fusionsplattform, se avsnitt 5.2 nedan. Mest resurser har dock lagts på att utforma sensornära fusionsmetoder, se avsnitt 5.3.

5.2 Utformning av generisk fusionsplattform

Vid fusion kombineras data och resultatet blir ny data eller information som nu har mindre osäkerheter och/eller är mer precist än innan fusionen. Fusion kan ske på olika nivåer:

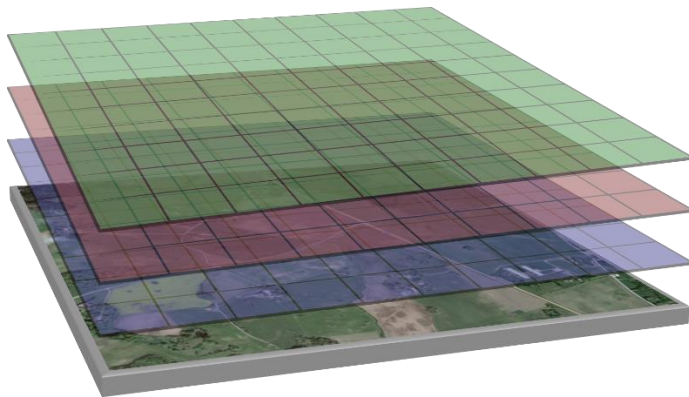
Data: Signaler direkt ifrån sensorn eller sensorsignaler som bara genomgått signalbehandling i syfte att förbättra exempelvis signal/brusnivåer.

Attribut/Särdrag: Förfinad information som erhållits genom mer avancerad signalbehandling på sensordata. Exempelvis beräknad area på ett objekt identifierad i en bild.

Beslut/Detektioner: Utsagor baserad på signalbehandling från sensordata. Exempelvis detektioner.

För det aktuella problemet är det på sikt troligen bäst att införa en flexibel systemarkitektur där information ifrån olika sensorkombinationer kan fusioneras på olika nivåer. Detta framgår exempelvis av den sammanställning som gjordes inledningsvis i projektet och som visar att aktuella sensorsystem är relativt diversifierade vad gäller utdata och tillämpning.

Ett alternativ till att utveckla fusionsalgoritmer för specifika sensorkombinationer är således att arbeta övergripande och mot en mer generell fusionsplattform. Inom projektet har en geobaserad plattform diskuterats, se figur 12. En intressant möjlighet med ett sådant mer övergripande system är att information om exempelvis vanligtvis drabbade vägsträckningar kan tas tillvara på ett naturligt sätt.



Figur 12. Geo-baserad fusionsplattform. I grunden ligger en kartmodell. Varje sensor/informationskälla bidrar med ett "lager" till denna modell. Ett lager utgörs av ett rutnät (t.ex. med storlek 1 m²) och för varje ruta skattas aktuell sensor/informationskälla sannolikheten för att IED finns utlagd. Fusion sker på beslutsnivå; för varje ruta sammanvägs beslut från mängden av enskilda sensorer och informationskällor (dvs. lager) till en gemensam värdering av risk för IED.

Tänkbart är också att man utnyttjar kunskap om geografiska risksektorer, såsom t.ex. brofästen, passager, mm. (kanaliserande terräng, check-points). Ytterligare fördelar med att arbeta på systemnivå är att man bättre kan hantera hur sensorer skall arbeta ihop med invisning, där beslut tagna från en typ av sensordata leder till att systemet begär ytterligare information från en annan sensor.

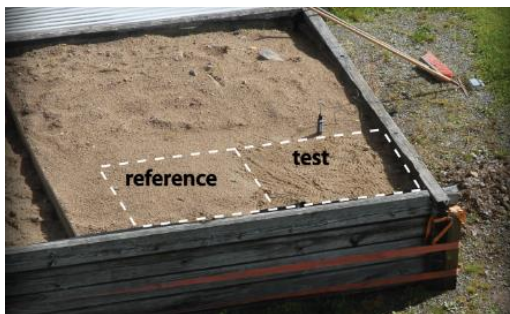
5.3 Utformning av sensornära fusionsmetoder

De sensorsystem som av praktiska skäl varit aktuella för utforskning av sensornära fusionsmetoder kan delas upp i tre kategorier; passiva elektrooptiska system, bildalstrande Ramanspektroskopi och 3D-lidar. Med passiva EO-system kan spår på ytor och störd jord observeras. Med aktiva EO-system kan man upptäcka objekt till vilka man har fri sikt samt bestämma geometrier. Ramanspektroskopin utnyttjas för sprängämnesdetektion.

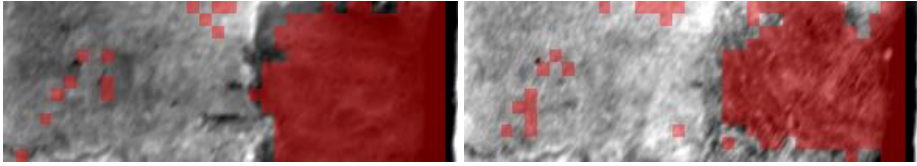
Närmast till hands för projektet låg att först utveckla metoder för fusion mellan passiva EO-sensorer, då främst mellan olika IR- och VIS-sensorer.

5.3.1 Ett första försök med fusion av sensordata

Under 2013 gjordes inledande analyser på verkliga sensordata, vilka har hämtats från det fältförsök (se t.ex. [9]) som utfördes 2011 inom projektet Sensorer för upptäckt av IED. Försöket syftade till att studera olika typer av ”störd jord” med sensortyper inom våglängdsområdet VIS-LWIR. En metod utprovades för att detektera statistiska skillnader i signalintensitet från mätningar på ett litet testområde jämfört med mätningar på ett orört referensområde, se figur 13 och figur 14. Detektorn fungerar således som en anomalidetektor och slår larm för all avvikelser från ”normalbilden” (= orörd mark).



Figur 13. Mätobjekt som ingick i det fältförsök som utfördes 2011 (se text). Visuellt bild av ett område som även avbildats med sensorer för LWIR, MWIR, SWIR och polariserad LWIR. Ytan som markerats som "reference" har under samtliga mätningar varit orörd. Den yta som markerats som "test" har i vissa mätningar varit slät, men även krattad, borstad, uppgrävd, blötlagd, samt upptrampad sand.



Figur 14. Resultat från fusion över samtliga sensorer och detektorer, överlagrat på MWIR-bild av det område som markerats i figur 13. Rödskalet indikerar anomalier jämfört med orörd mark. Bilderna t.v. och t.h. visar mätningar för trampad respektive krattad sand.

5.3.2 Utökat försök med fusion av sensordata

Det försök som redovisats ovan var lovande, men mängden och lämpligheten i mätdata var begränsad. För att komma närmare ett mer realistiskt scenario, med avseende på fusionsproblematiken, behövdes bättre anpassade mätningar. Det fältförsök som utfördes under 2014, och som här översiktligt redovisats i kapitel 3.1, har varit en förutsättning för den fusionsforskning som utförts under senare delen av detta projekt.

Målsättningen med denna forskning har varit att utveckla ett koncept där fordon förses med en uppsättning framåttittande elektro-optiska sensorer och där fusion används för att sammanföra och effektivt nyttja den komplementära information som bildalstrande sensorer med olika våglängdsband kan ge. Ett viktigt fokus har varit att speciellt arbeta med fusions- och signalbehandlingskoncept som *inte* baserar sig på förändringsdetektion mot tidigare utförda mätningar. Projektets målbild har istället varit att kunna föreslå en lösning där ett fordonsmonterat system *dynamiskt* skapar en (matematisk) beskrivning och karaktäristika av den vägsträckning som fordonet f.n. befinner sig på. Under framryckning och i takt med att nya delar av sträckningen avbildas jämförs sedan varje nytt segment mot denna beskrivning. Vägsegment som inte stämmer in mot aktuell ”normalbilsbeskrivning” markeras för en operatör som ett område med onormala egenskaper och ett potentiellt hot. I takt med att nya delar av sträckningen avbildas uppdateras kontinuerligt den matematiska normalbilsbeskrivningen.

Projektets plan för att nå fram till ovan nämnda målbild har varit att dela in utvecklingen i tre på varandra följande steg:

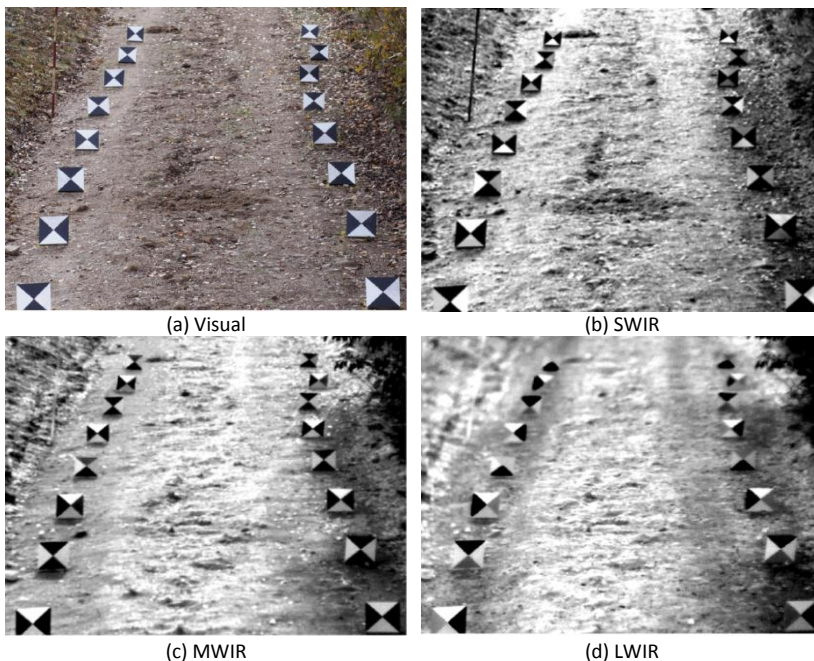
1. Etablera metoder för att matematisk och statistiskt beskriva egenskaper i sensordata som avbildar vägsegment. Verifiera att dessa statistiska beskrivningar fångar upp skillnader mellan sensordata som avbildar ”normal” väg kontra väg med störd mark.
2. Utifrån de metoder och förslag på statistiska beskrivningar som framkommit utveckla och implementera mjukvara för automatisk detektion av områden som avviker från ”normalbilden”
3. Utveckla mjukvara som dynamiskt och kontinuerligt mäter in och uppdaterar den statistiska modell som beskriver aktuell ”normalbild”.

Nedan redovisas de insatser projektet kunnat göra inom steg 1 ovan. Vissa preliminära resultat har genererats kopplade till steg 2, men dessa redovisas inte här. Det ligger i framtida forskning att ta sig an steg 3.

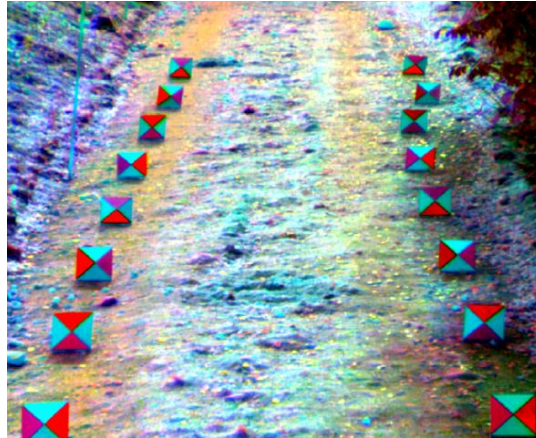
5.3.3 Statistisk beskrivning av markytans egenskaper.

I linje med vad som beskrivits ovan har analyser utförts i syfte att skapa en statistisk beskrivning av markytors egenskaper (se även [10]). Analyser har utgått ifrån data insamlade under försöken vid Lilla Gåra 2014. Exempel på bilddata som genererats vid detta försök visas i figur 15 och figur 16.

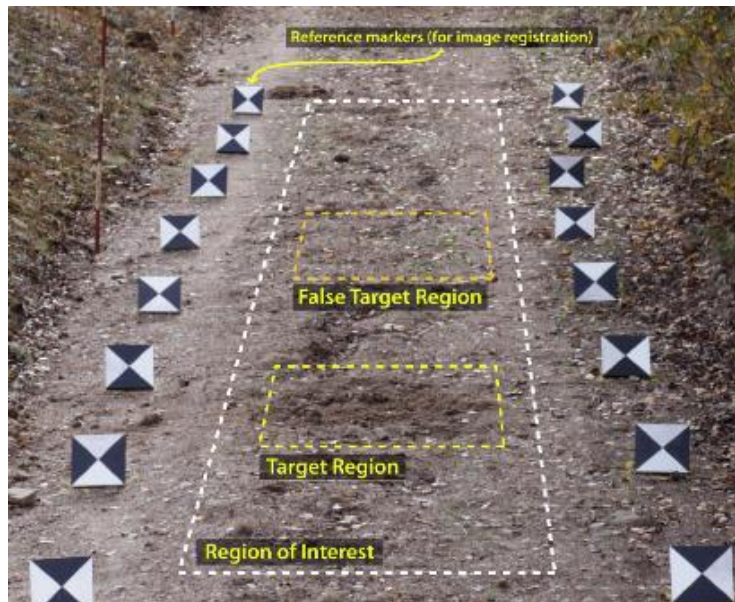
För varje mätpunkt har ett antal bildregioner definierats i enlighet med beskrivning och illustration i figur 17. Målet är att hitta en koncis statistisk beskrivning av de olika regionerna som påvisar skillnader mellan bakgrund och målregion. Ett första försök till sådan beskrivning har varit att för varje enskilt våglängdsband jämföra intensitetsvärden på pixlar hämtade ifrån de olika regionerna. I figur 18 kan man se att pixlars intensitetsvärden har en koncis statistisk fördelning (som liknar normalfördelningen). Vidare indikeras en skillnad i intensitet mellan bakgrund och sann målregion, men inte mellan bakgrund och falsk målregion. Denna skillnad gäller för alla band utom LWIR.



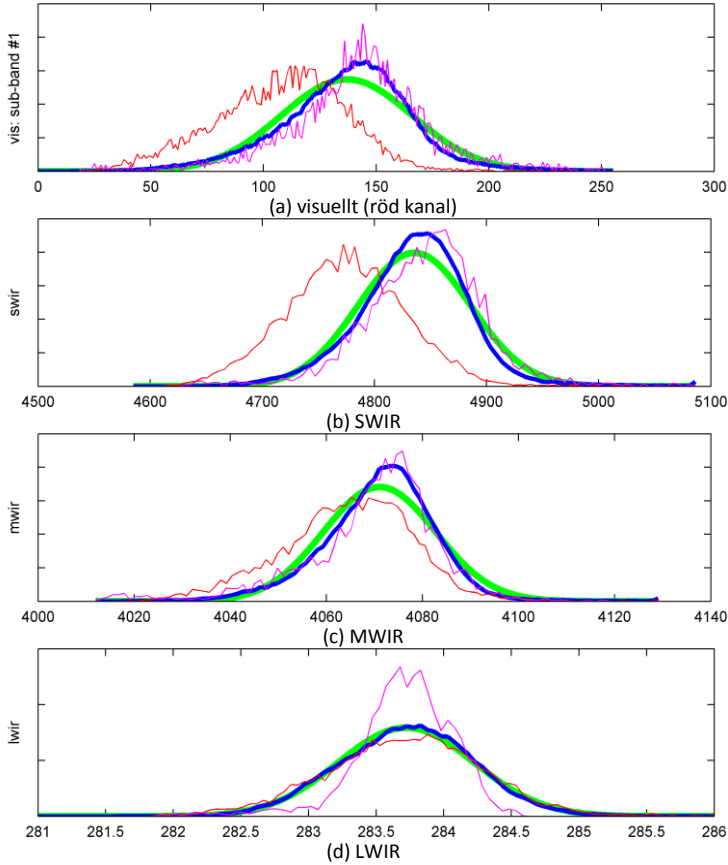
Figur 15. Exempel ifrån fältförsök vid Lilla Gåra 2014. Bilderna visar ett kortare segment av en vägsträcka. Mitt i bild syns spår efter nedgrävd dieseldunk. Längs upp till vänster i bild, bredvid den bitersta markören, syns spår efter en nedgrävt batteripacke. Bilder från de infraröda våglängdsbanden har kontrastjusterats för ökad tydlighet i tryck.



Figur 16. Falskfärgad bild som skapats genom att låta SWIR-, MWIR- och LWIR-banden utgöra bildens röda, gröna, respektive blåa kanal. Samma bilddata som i figur 15. Denna bild visar på möjligheten till passning av bilder från olika sensorsystem. Sådan bildpassning kan ses som en rudimentär typ av bildfusion.



Figur 17. Analys av bilddata. För varje mätpunkt insamlas och registreras/inpassas bilddata från samtliga sensorer (visuell, SWIR, MWIR, LWIR). En intresseregion definieras som området mellan de referensmarkörer som använts vid försöket. I de fall ett nedgrävt objekt finns inom intresseregionen markeras detta område som en målregion. Utöver detta definieras ett antal falska målregioner. Dessa har en area och placering som liknar de skarpa målregionerna. Vid analysen används begreppet bakgrund. En bakgrund utgörs av "normal" ostörd väg och definieras som det område som utgörs av aktuell intresseregion, men med områden för falska och sanna målregioner borträknade.



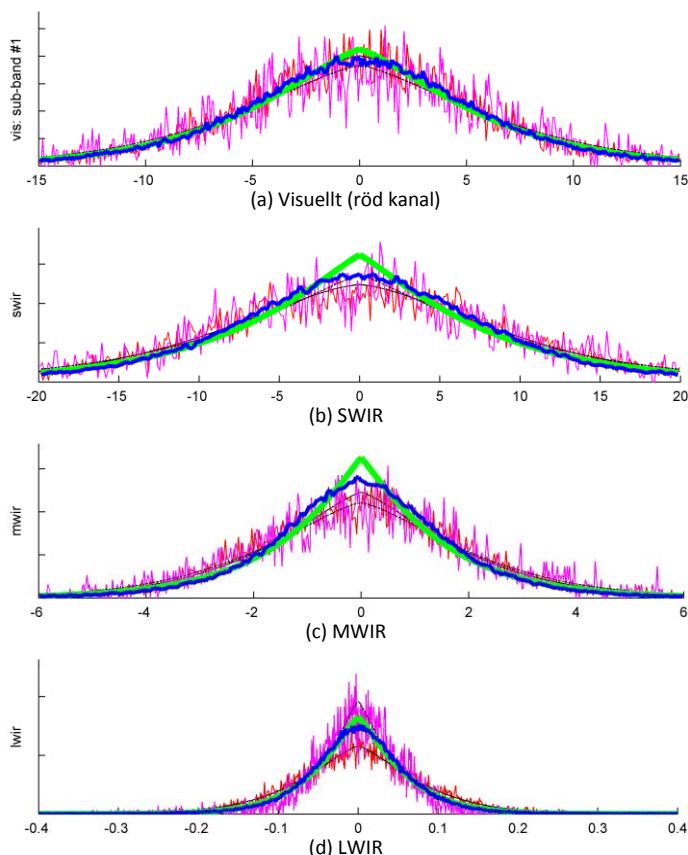
Figur 18. Histogram över pixelintensitet för olika våglängdsband och mätregioner. Blå linje representerar fördelningen av intensitetsvärden hämtade ifrån bakgrundsregionen. Röd linje representerar värden ifrån den sanna målregionen. Magenta representerar den falska målregionen. Grön linje motsvarar en normalfördelningskurva anpassad till bakgrunden.

I beskrivningen ovan analyserades varje våglängdsband för sig. Ett exempel på datafusion är att inte betrakta enskilda våglängdsband som sinsemellan oberoende, utan istället se varje ”pixel” som en multidimensionell variabel med intensitetsvärden från samtliga band.

$$\mathbf{x} = [x_R, x_G, x_B, x_{SWIR}, x_{MWIR}, x_{LWIR}]$$

Genom att analysera denna variabel som en multidimensionell statistisk storhet kan man fånga upp korrelationer mellan våglängdsband och potentiellt få en starkare diskriminering mellan bakgrund och sanna målregioner. Ett sätt att mäta skillnader mellan multidimensionella statistiska fördelningar är att använda ett mått kallat ”Kullback-Liebler-divergens”. Två multidimensionella statistiska fördelningar, p och q , har divergensen $KL(p||q) \geq 0$, med likhet endast då $p(x) =$

$q(x)$ och med ökande värden vid ökande divergens. I tabell 3 återges resultat då Kullback-Liebler-divergens använts för att beskriva skillnader mellan "bakgrund" och "sann målregion" kontra "bakgrund" och "falsk målregion". Resultaten indikerar att det går att konstruera fusionerade och koncisa statistiska beskrivningar som fångar upp skillnader mellan bakgrund och regioner med störd markyta.



Figur 19. Histogram över förekomsten av kanter i det analyserade bildmaterialet. Grafernas x-axlar motsvarar kanternas "skarphet", där $x=0$ betyder avsaknaden av kant (slät yta) och allt mer positiva/negativa x -värden motsvarar allt skarpare kanter. Släta ytor ($x=0$) är mest frekvent förekommande. De olika diagrammen motsvarar de olika våglängdsbanden (VIS, SWIR, MWIR och LWIR). Blå kurvor motsvarar fördelningen av kanter, specifikt inom de regioner som innehåller bakgrund. De röda kurvorna motsvarar fördelningen av kanter inom de bildregioner som motsvarar målområden (=störd jord). De magentafärgade kurvorna motsvarar kantfördelning inom de regioner som markerats som falska målområden. Gröna, hel-svarta och streckade svarta kurvor är parametriserade Weibull-fördelningar anpassade mot empiriska data (dvs. passade mot blå, röd respektive magenta). Ju större skillnad i förskjutning eller form mellan kurva för sann målregion (röd) och bakgrund (blå), desto större möjlighet att skilja dessa områden utifrån en automatiserad statistisk analys.

Tabell 3. Kullback-Liebler-divergens mellan den multidimensionella statistiska fördelningen av intensitetsvärden för bakgrunden kontra olika sanna målregioner (TRx) och falska målregioner (FTRx). 'Antal' anger i hur många mätpunkter/bilder som aktuell region varit synlig och ingått i analysen.

	TR1	TR2	TR3	TR4	FTR1	FTR2	FTR3	FTR4
Antal	15	21	22	21	6	19	22	21
KL	1.23	2.09	1.98	1.68	0.56	0.36	0.37	0.34

Utöver att endast använda intensitetsvärden, dvs. pixlars färg/ton, kan även annan bildinformation extraheras. Markytans textur kan ha stor betydelse för att särskilja olika markområden. Det finns ett stort antal matematiska operationer att tillgå för att extrahera texturinformation. Hittills har i detta projekt textur analyserats utifrån ett texturmått som baserar sig på hur skarpa kanter det finns i bildytan (*Gaussian Scale Space Derivative*). I figur 19 återges histogram över kantfördelningar för olika våglängdsband och regioner. Djupare analys av dessa fördelningar återges i ett tidigare presenterat konferensbidrag [10].

5.3.4 Kommentar

Det fältförsök som genomförts, tillsammans med de analyser och resultat som sammanfattats ovan, indikerar att en automatisk detektion av markytor som avviker i förhållande till ”normalbilden” för aktuell väg är möjlig. Denna detektion är inte baserad på skillnadsmätningar jämfört med tidigare mätningar, utan istället på skillnader jämfört med en dynamisk statistisk modell som byggs upp kontinuerligt och under framryckning. Det är fortsatt intressant att utveckla detta koncept i enlighet med de tre steg som beskrivits ovan.

5.4 Slutsatser och förslag på fortsatt arbete

Arbetet inom projektets arbetspaket för fusion har resulterat i intressanta resultat; främst avseende fusion av data mellan passiva elektrooptiska system. Projektet har inte kunnat leverera några färdiga lösningar, men det finns en tydlig linje och plan framtagen för hur ett fortsatt arbete bör inriktas. Intressanta uppslag finns även beskrivna för hur man kan fusionera passiva EO-data med 3D-lidar.

För att kunna hantera en större uppsättning sensorer bör projektet på sikt ge utrymme för arbete kring en flexibel systemarkitektur, där information ifrån olika sensorkombinationer (och även andra informationskällor) kan fusioneras på olika nivå. Ett sådant arbete kommer att resultera i en mer konceptuell systembeskrivning och i demonstrationer genom simuleringar. En genomtänkt och övergripande systemlösning är dock viktig för att slutligen kunna driftsätta en multisensorlösning för detektion av IED:er.

6 Radarsensorer för upptäckt av IED

Med lågfrekventa radarsensorer ges möjligheten att detektera IED:er som är placerade under markytan alternativt dolda av vegetation. Upplösningen blir relativt grov på grund av den långa våglängden som krävs för nedträngning i marken, vilket medför att klassificering av mål som kan utgöra hot också blir relativt grov. För att erhålla detektion krävs att föremålet styrka och karaktär skiljer sig tillräckligt från omgivningen, som då antingen måste vara mer homogen i sin textur eller bestå av svagare reflekterande strukturer. Därför innebär tekniker för förändringsdetektion ett mer robust tillvägagångssätt för att detektera IED-hot för lågfrekventa system. Väder och vind ger sällan större utslag eftersom sensorn endast är känslig för större fysiska förändringar. Vanligt är dock enkelpass system då bakgrundsdata inte alltid är tillgängligt eller tillräckligt temporalt stabilt över längre tidsperioder.

Utveckling sker för markbundna GPR system, där ett engelskt system baserat på Exponent [11] och 3d Radar [12] komponenter är ett exempel, med en ökad dynamik, och förbättrade detektionsalgoritmer jämfört med föregående versioner. Detektionsprestandan kan sannolikt ytterligare utvecklas och förväntas öka i framtiden. Se vidare kommentarer till fältprov med GPR i [13].

Flygande GPR-system, med utnyttjande av snett infall vilket medger större mätavstånd vid inmätning, är under utveckling vid t.ex. SAAB (C3)[14] och RDECOM CERDEC NVESD (Mirage Eagle) [15], där positiva resultat har redovisats för IED-detektion. Ny information om Mirage Eagle systemet har inte setts och C3 systemet har ännu inte utfört fortsatta mätningar och har en bit kvar för att redovisa operativa prestanda.

Övervakande radarsystem för att upptäcka aktiviteter som kan röra IED verksamhet är t.ex. Vader från Northrop Grumman Corp [16]. Vader är designat för att detektion och följning av fordon och människor och har stor täckningskapacitet monterat på UAV eller bemannat flygplan för att ge realtidsinformation till marktrupper.

Forskningen har följts inom projektet vilka berör till större delen förbättrade detekteringsalgoritmer genom mer avancerade modeller för mål- och markegenskaper.

7 Ramanspektroskopi för detektion av explosivämnesspår

Detektion av explosivämnesspår är en betydelsefull indikator om ett IED-hot. Spåren påvisar att hantering av explosivämnen förekommit i nära anslutning till objektet där de observerats, och därmed kan finnas närvarande, exempelvis i form av en VBIED (*vehicle borne – bilburen – IED*).

I [17] presenterades HLIN2¹-systemets prestanda i form av vilka hotämnen som kan detekteras, hur systemet presterar mot olika bakgrunder samt en grov uppskattning av vilka mängder av ämnena som krävs för detektion på de olika bakgrunderna. Mätningarna visar på flera begränsningar. Arbete som har utförts inom *Sensorer för upptäckt av IED* har syftat till att hitta sätt att komma runt dessa begränsningar och nå bättre prestanda med avseende på känslighet, mättid och mätavstånd.

En begränsning för känsligheten hos HLIN2-systemet ligger i prestandan hos det Fabry-Perot-filter som används för att välja vilken våglängd mätningen görs vid. Detta filter² uppskattades i förstudien få en transmission på närmare 30 % [18, 19], men den visade sig bli endast ca 3 %. Förutom låg transmission försämrar filtret även den rumsliga upplösningen hos systemet samt introducerar ströljus. Detta bidrar till att höja detektionsgränsen (detekterbar spårsmängd) samt att öka inverkan av fluorescens från bakgrunden.



Figur 20. HLIN2-systemet för Ramanspektroskopi.

¹ HLIN2 är en ögonsäker version av systemet för avståndsdetektion av explosivämnesspår, HLIN, och är en vidareutveckling som utförts inom ett projekt för FMV.

² Filtret är utvecklat av finska VTT på uppdrag av FOI.

En större begränsning är den filterbaserade metoden i sig. Endast en våglängd i taget används, vilket medför att en stor del av det användbara ljuset går till spillo. För genomsökning av ett 10-tal hotämnen kan förlusten vara så stor som 98 %. För att reducera förlusterna har en ny typ av teknik testats, vilken utnyttjar en spektrometer istället för filter men bibehåller den spatiala informationen, vilket gör att avbildande mätningar kan genomföras. De första resultaten med en kodad apertur (*compressive sensing*) presenteras i 7.2.

Fluorescens utgör för vissa ämnen och bakgrunder ett hinder för användning av Raman-spektroskopi. Den döljer eller maskerar Raman-signalen, vilket försvårar detektion. Det visade sig att den valda våglängden 355 nm, som visserligen avsevärt reducerar mängden fluorescens i mätområdet och gör det lätt att hålla systemet ögonsäkert, också gör att systemet blir blint för vissa hotsubstanser. För att minska inverkan från fluorescens, utan begränsning till specifika våglängder, har en metod baserad på den optiska *Kerreffekten* testats, s.k. Kerr-grindning (eng. *Kerr gating*). Metoden har visat sig förbättra detektionsförmågan, både för explosivämnen och olika bakgrundsmaterial. Den har nu testats framgångsrikt för avståndsdetektion och beskrivs i 7.1.

7.1 Optisk Kerr-grindning

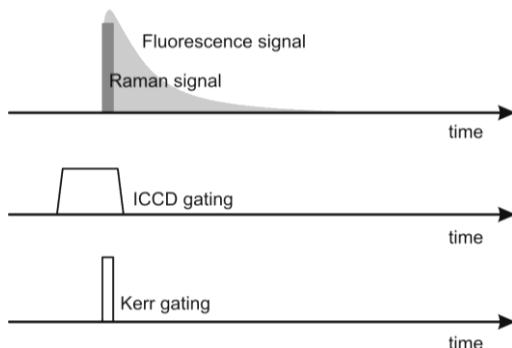
Som framgår av mätningar på explosivämnen på olika bakgrundsmaterial, redovisade i [17], försämrar många av materialen detektionsgränsen för HLIN2-systemet. Fluorescens från bakgrundsmaterialen utgör den främsta orsaken. På samma sätt kan ett explosivämne självt, eller orenheter och komponenter som blandats med ämnet, fluorescera och därmed försvåra detektion.

Metoden med optisk Kerr-grindning utnyttjar det faktum att fluorescens och Raman-signal har olika tidsförlopp. Medan Raman-spridning är en omedelbar process är fluorescens mer utdragen i tiden. Den snabba Kerr-cellen släpper igenom Ramansignalen men stängs snabbt för att blockera den långsammare fluorescensen. Därigenom kan signal-till-brus-förhållandet (SNR) förbättras. Detta har testats i en laboratorieuppställning separat från HLIN, med en laser med kortare laserpulser; 30 ps.

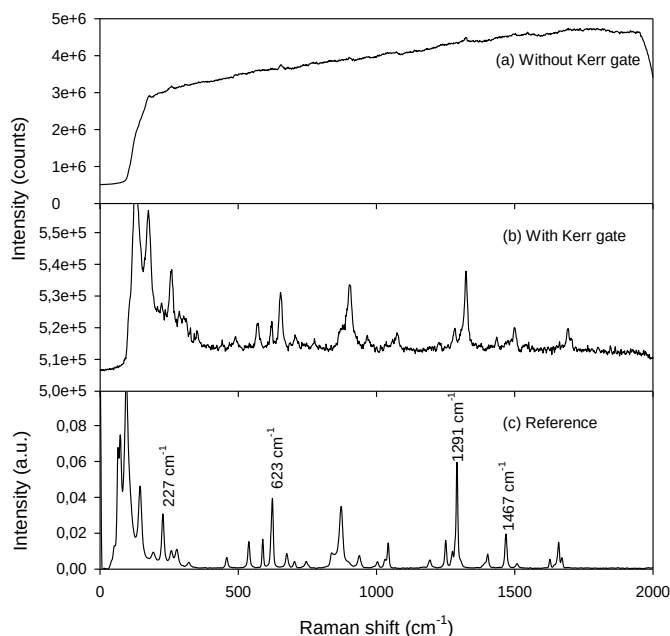
Metoden har visat sig fungera mycket effektivt för att reducera fluorescens från plastiska explosivämnen. Pentylsprängdeg, som fluorescerar mycket kraftigt, kunde inte detekteras utan Kerr-cell, då Ramansignalen helt doldes av fluorescens. Fluorescensnivån sänktes här med minst en faktor 1000 (99,9%) när Kerr-grindning tillämpades, se figur 22.

Metoden har även visat sig användbar vid fluorescerande bakgrundsmaterial. Tabell 4 visar olika bakgrundsmaterial, rangordnade efter stigande grad av fluorescens. Tabellen visar approximativt minsta-värde för förbättring i SNR och minskning av fluorescens med Kerr-cell. Den procentuella SNR-förändringen är

störst för de kraftigare fluorescerande bakgrundsmaterialen (tyg, trä, kartong). Även förbättringarna vid låga fluorescensnivåer är av värde, då HLIN-systemet jobbar med relativt låga SNR.



Figur 21. Schematisk illustration av förloppet för ICCD- respektive Kerr-grindning. En laser-puls belyser ett mål, varvid Ramanspridningen sker i stort sett momentant, medan fluorescensen är mycket mer långdragen. "Slutartiden" för ICCD-kameror är för långsam för att stänga ute huvuddelen av fluorescensen. En Kerr-cell kan däremot ge ett exakt överlapp med Raman-signalen.



Figur 22. Raman-spektra från pentylsprängdeg mätta (a) utan Kerr-cell och (b) med Kerr-cell. Mättiden var 20 s, dvs. 1000 laserpulser. Minskningen i signal under 170 cm^{-1} och över 1930 cm^{-1} beror på en begränsning i förstärkaren hos ICCD-kameran och visar grundnivån för signalen. (c) Referensspektrum mätt vid 1064 nm med en FTIR/Raman-spektrometer.

Tabell 4. Förbättring av SNR och reduktion av fluorescens vid användning av Kerr-cell. Laservåglängd 532 nm.

Bakgrund	Förbättring av SNR	Reduktion av fluorescens
Aluminiumplåt	-	- (ingen fluorescens)
Plastlock	15%	50%
Bildörr, blå metallic	20%	100%
Jord	100%	80%
Kartong	200%	70%
Träbit, ändträ	2000%	96%
Rött bomullstyg	200%	70%

Kerr-cellen har även använts för avbildande mätningar. Vid dessa passerar hela bilden det 1 mm stora området i Kerr-cellen, där grindeffekten uppstår. Här är begränsande faktorer strålprofilen för laserstrålen som genererar Kerreffekten, samt kvalitén på optiken som leder ljuset genom Kerr-cellen (enkla sfäriska linser). Försöken visar att avbildning genom Kerr-cellen är möjlig, men att bildkvalitén behöver förbättras. Detta kan göras antingen genom förbättrad strålprofil och förbättrad optik, eller genom att bildinformationen tas tillvara i ett tidigare skede i strålgången, vilket kan göras med en kodad apertur, se avsnitt 7.2.

Flera tekniska utmaningar återstår för att avgöra om Kerr-grinden går att implementera i framtida system:

- Metoder för att lösa synkroniseringen mellan grindningspulsens och Ramansignalen, då avståndet till målet varierar. Separata lasrar för detektion och grindning innebär en viss variation i tidssynkroniseringen dem emellan. F.n. används olika frekvenser från samma laser för perfekt synkronisering, att variera fördröjningen av grindningspulsens är dock en teknisk utmaning.
- Undersökning av vilka faktorer som påverkar fluorescensnivåer och Kerr-grindens effekt.
- Pikosekundlasrar är idag stora och otympliga och lämpar sig inte för fältbruk. Utveckling av denna typ av lasrar måste ske innan optisk Kerr-grindning kan ses som en praktiskt användbar teknik.

7.2 Kodad apertur

Arbete pågår³ med en hyperspektral implementation av en singel-pixel kamera baserad på en kodad apertur, eller *compressive sensing* (CS), för avbildande Ramanspektroskopi, se figur 20. Metoden kan förbättra tillvaratagandet av ljus

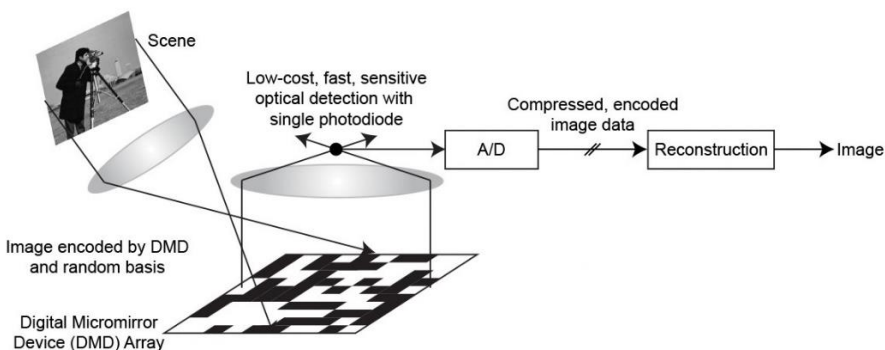
³ Större delen av utvecklingen sker inom ett projekt finansierat av MSB inom ramen för ett informationsutbytesavtal med USA (DHS), men delar av arbetet har utförts inom detta projekt.

avsevärt och därmed förbättra förmågan till detektion av spårämnen av explosivämnen.

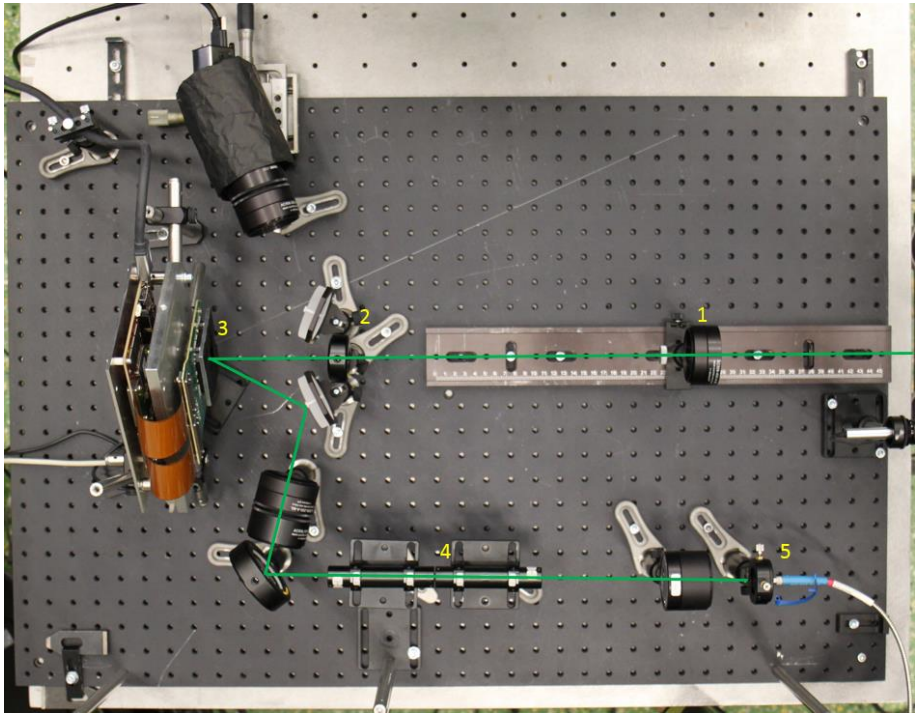
En singel-pixel kamera fungerar genom att en bild av målet projiceras på en digital mikrospegel-matris (*digital micromirror device*, DMD); en komponent bestående av stort antal mikrospeglar, vilken används bland annat i vanliga videoprojektorer. På DMD:n läggs ett antal slumpmässiga mönster (masker). Genom att mäta den totala intensiteten av det ljus som reflekteras från DMD:n för varje känd mask, är tillräckligt med information insamlad för att återskapa den ursprungliga bilden med relativt små avvikelser. Viktigt för återskapandet av bilden är att det finns en viss grad av kontinuitet i scenerna som ska avbildas, vilket gör dem glesa i någon bas för representationen (ett annat sätt att säga det är att de är komprimerbara). Detta resulterar i att antalet mätningar som behövs för att återskapa en bild kan vara icke-intuitivt litet, vilket gör det möjligt att minska antalet mätningar med flera storleksordningar jämfört med upplösningen på det objekt som skall avbildas.

Genom att detektera signalen med en kamera via en spektrometer istället för med en singel-pixel-detektor kan istället en hyperspektral bild rekonstrueras med hjälp av CS-algoritmer. Detta ger spektral information om ämnena i bilden, vilka då kan identifieras.

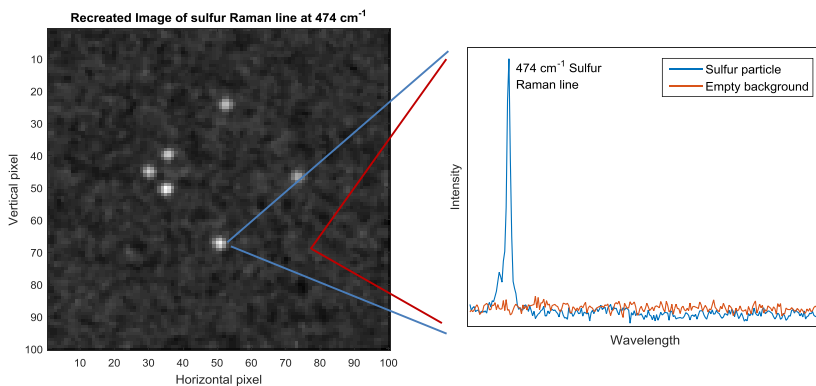
En första version av ett sådant system har testats för att upptäcka spårämnen av sprängämnen vid en laservåglängd av 532 nm och de första resultaten ses i figur 25. Bildinformationen återskapas för var och en av de 256 våglängder som sensorn registrerar, vilket gör att Ramanspektrum kan extraheras från bilderna för varje enskild pixel. Metoden ser mycket lovande ut för snabb och effektiv upptäckt och identifiering av spårämnen för avståndsdetektion på grund av de låga ljusförlusterna, men har i den form den testats vissa begränsningar. De viktigaste är 1) svårigheten att mäta på rörliga mål, och 2) fluorescens.



Figur 23: Schematisk bild över den enklaste formen av en singel-pixel kamera för bildåterskapning som utnyttjar s.k. *compressive sensing* (Rice University [20]).



Figur 24: Experimentuppställning för 1D compressive sensing avbildande Raman. 1) in-samlingslins, 2) laserfilter, 3) DMD, 4) glasstavar för ljusmixning, 5) fiber till spektrometer.



Figur 25: Det första resultatet av en mätning med kodad apertur på svavelpartiklar (1 mg) på en ca $4 \times 4\text{ cm}$ stor aluminiumyta, på ett avstånd av 3 m. 2000 olika maskor (100×100 element) användes för mätningen. T.v. den återskapade bilden med sex svavelpartiklar vid ett ramanskift på 474 cm^{-1} ; t.h. spektra för en bildpunkt innehållande svavel (blått) respektive en bildpunkt på aluminiumytan (rött).

Tabell 5. Nyckelparametrar för avbildande mättekniker.

Teknik	Avstånd			Minsta möjliga mättid ^a	Teoretisk relativ ljusinsamling	Detektor-typ
	<1m	1-10 m	>20m			
Filter			Luftturbulens	2s	0.005 ^b	2D
Linjeskannande		Laserfokus	Luftturbulens Laserfokus	15s	1	2D
Pixel-skannande		Laserfokus	Luftturbulens Laserfokus	1s	1	1D
CS 1D			Luftturbulens	<1s	0.5	1D
CS 2D			Multi-shot: Luftturbulens	1-10s	0.5	2D
			Enkelskott	Enkelskott		

^a Uppskattning grundad i utläsningshastighet för existerande detektorer, 10 hotämnen, och ett krav på 300 × 300 pixlars upplösning på målet.

^b För ett avstämbart filter med 15 % transmission.

I tabell 5 jämförs några av de viktigaste parametrarna för olika Ramanspektroskopi-tekniker. Utgångspunkten för jämförelsen är det avbildande Raman-systemet HLIN1 [21] (filterteknik). Mörkgrön färg innebär goda prestanda relativt de andra alternativa teknikerna i tabellen, ljusgrönt är OK, gult är problematiskt och rött är bristfälligt.

De resultat för detektion och identifiering som har åstadkommit med filtertekniken i bland annat HLIN1 och HLIN2 är, vid internationell jämförelse, de bästa resultat som åstadkommit för avståndsdetektion av explosivämnespartiklar. Det finns dock, som tidigare nämnts, inneboende begränsningar med tekniken. I tabell 5 framgår också att det finns tekniker med potential att klara dessa problem, och då framförallt genom en högre ljuseffektivitet. De resultat som presenterats här är gjorda med tekniken som benämns "CS 1D" i tabell 5. För att avgöra vilka prestanda som är möjliga att uppnå återstår ytterligare studier; jämfört med filterlösningar ser den, utifrån de resultat som erhållits fram tills nu, mycket lovande ut.

7.3 Möjlig utveckling

I nära framtid är planen att försöka lösa problemet med störande fluorescens och att optimera processen för återskapandet av bilder utifrån antalet masker. Fluorescensen förväntas minska avsevärt genom val av annan våglängd och en testupställning baserad på en laser vid 1064 nm (ett våglängdsområde där fluorescensen för de flesta ämnen och bakgrunder är mycket begränsad) kommer att byggas. Även förbättringar av CS- och klassificeringsalgoritmer kommer att studeras för att ytterligare reducera den effektiva mättiden och detektionsgränserna.

Ett effektivare system kan skapas genom att utnyttja en kombination av kodad mask och 2D-detektor, ”CS 2D”, där den spatiala informationen bibehålls genom att detektion sker på en 2D-detektor (kamera). Detta innebär ökad ljusinsamling och att en större del av den spatiala informationen bibehålls, vilket möjliggör en betydande minskning av antalet masker. På bekostnad av en något försämrad spatial upplösning finns det med ett sådant system potential att nå enkelskottsmätningar (mätningar med en enda laserpuls) [22]. Detta skulle möjliggöra mätningar på rörliga mål eller från en mobil plattform. Förutom kraftigt reducerade mättider medför enkelskottsmätningar även möjlighet att undvika distorsioner i avbildningen på grund av luftturbulens, vilket också har potential att möjliggöra avbildande mätningar på längre avstånd.

För mätningar från mindre plattformar (UAV, UGV) krävs utveckling på komponentsidan. DMD och lasrar finns redan att tillgå i tillräckligt litet format och vikt, men detektorerna är fortfarande stora, främst på grund av den kylning som krävs för att erhålla tillräckligt hög känslighet.

8 Internationell samverkan

En viktig del i detta projekt har varit internationella kontakter och internationellt utbyte. Huvudsakligen har detta skett genom deltagande ett antal arbetsgrupper i NATO:s forskningsorganisation STO, samt inom EDA och EU. Arbetet i dessa grupper har givit kunskap om teknikutveckling och intressanta forskningsspår. Nätverk och kontakter har i flera fall lett vidare till bilaterala kunskapsutbyten.

8.1 NATO

8.1.1 SET-161 Leading Body for the C-IED LTCR (2010-2013)

Gruppens arbete genomfördes 2010-2013. Syftet var att etablera ett kunskapsforum inom bekämpning av IED samt att skapa en dialog mellan experter på området. Arbetet bestod huvudsakligen i att omsätta militära operativa behov till en teknisk kravbild. [23]

8.1.2 SET-208 Signal processing for implementation in handheld multi sensor ground penetrating system (2014-2016)

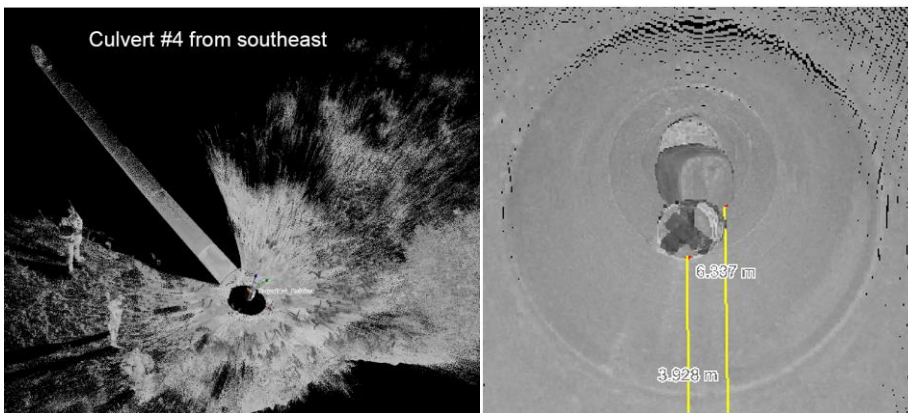
Syftet med gruppens arbete är att studera avancerad signalbehandling för markpenetrerande radar och att analysera tillämpningsmöjligheter för nya algoritmer för signal- och databehandling i multisensorsystem. Sverige har fått en speciell förfrågan från ordföranden att delta i gruppen. Genom deltagande får Sverige ta del av kunskapsutvecklingen på området, samt möjlighet att bygga ett nätverk med några ledande nationer och deltagare. Medverkan sker med finansiering från FMV.

8.1.3 SET-238 Side-Attack Threat Detection Strategies, Technologies and Techniques (2016-2018)

Området är intressant för svenskt vidkommande, bl.a. genom att det omfattar sidverkande IED:er. Gruppens leds av USA, och Sverige har fått en inbjudan att medverka. Deltagande i gruppen kommer att ske från FOI och SWEDEC. Målen för gruppen är att identifiera aktuella kapacitetsbrister i detektionstekniker och identifiera lovande ny teknik. Gemensamt definierade hotobjekt kommer att användas i gemensamma och nationella mätkampanjer.

8.1.4 SCI-256 Route threat detection and clearance technologies (2012-2015)

Gruppen har studerat olika metoder för att detektera hot och röja väg. Under 2012 genomfördes ett försök med förändringsdetektion med elektrooptiska sensorer. FOI medverkade där med skannande 3D-lidar [5]. Vid ett fältprov i Tjeckien 2014 deltog FOI med en försöksutrustning för detektion av radioelektronik som bygger på provocerade emissioner⁴. Resultaten från försöket gör det troligt att tekniken kan användas för att realisera ett varnings- och lokaliseringsystem [24]. Efter ett beslut i SCI-panelen förlängdes gruppens arbete med ett år och ett försök inriktat mot upptäckt av IED:er i kulvertar genomfördes vid SWEDEC i oktober 2015.



Figur 26. Punktmoln utanför och inuti en kulvert (vägtrumma) uppmätt med en 3D-lidar från FOI. T.v. visas punktmolnet som samlats in med lidarn placerad strax utanför kulvertöppningen. Kulverten (insidan) med 50 cm diameter syns som ett rör snett uppåt mot vänster. T.h. visas punktmolnet inifrån kulverten, där två IED:er är placerade; en granat (3,9 m från änden) samt en 25 l plastdunk med HME (6,3 m från änden).

8.1.5 SCI-286 Technology roadmaps towards stand-off detection in future route clearance (2015-2018)

Efter tre inledande beredningsmöten under 2014 och 2015 kommer gruppen att arbeta under 2016-2018. Man kommer att studera system för avståndsdetektion av olika mognadsgrad, vilka lämpar sig för relevanta miljöer och nya hot. Teknikområden som studeras är t.ex. sensorteknik, databehandling och -fusion för att öka detektionssannolikheten och minska antalet falsklarm, multisensorintegration och sensorer på (obemannade) plattformar. Potentiella operativa fördelar (t.ex.

⁴ Medverkan i försöket skedde huvudsakligen med personal och utrustning ur projektet *Telekrig mot IED*, samt medfinansierades av FMV.

ökning av framryckningshastighet, minskning av förarens arbetsbelastning) undersöks.

8.2 EDA

Inom EDA har en s.k. *ad hoc working group* (AHWG) med myndighetsrepresentanter arbetat fram ett förslag till program inom C-IED-området: *IED Detection Programme* (IEDDET). Programmet är tänkt att löpa på 2-3 år och har som mål att utveckla FoU-demonstratorer på TRL 5-7. Ursprungligen skisserades fem delprojekt (demonstratorer), men antalet har reducerats till tre. Sverige deltog i beredningen av programmet och formuleringen av två av förslagen. Finansieringen av svensk medverkan har inte kunnat lösas, varför Sverige tills vidare ej deltar i programmet.

8.3 EU EDD WG

EU kommissionens enhet för ”Counter Terrorism” gällande informationsutbyte och utveckling av förmågan explosivämnessökande hundar, EU EDD WG⁵, har fortsatt under året. De 28 medlemsländerna är representerade, inklusive observatörer från USA och Kanada. Det finns även ett utbyte avseende Explosive Detection Dogs (EDD) mellan EU och USA. Det är DG HOME som är värd för mötena och deras fokusområde är: gränskontroll, organiserad brottslighet, kris och terrorism samt polissamarbete.

Arbetet i EU EDD WG är indelat i fyra grupper; forskning, träning och urval, metodik och SOP⁶ samt certifiering och kvalitetskontroll. Under 2015 har det genomförts fyra möten, varav FOI har deltagit vid tre av dem. Det sker även arbete i grupperna mellan mötena.

8.3.1 Leveranser och pågående arbete

Forskningsgruppen har färdigställt följande dokument:

- Guide för utvärdering av similiämnen⁷, som används för träning av EDD.
- En enkät, i syfte att sammanställa om, och i så fall vilka similiämnen och kommersiella produkter som använts vid hundträning och med vilket resultat.

⁵ EU Explosive Detection Dog Work Group (EU EDD WG)

⁶ Standard Operating Procedure

⁷ Med similiämne menas här material som endast innehåller spårmängder av explosivämne; ämnen som ingår i explosivämnens doftbild, men som i sig inte är explosiva; icke explosiva ingredienser i HME och slutligen ämnen som inte har någon koppling till explosivämnen, men som påstås lukta som sådana.

- En guide med råd för hur problem med kontaminering kan undvikas.
- En enkät om användandet av förpackningsmaterial (av explosivämnen) vid hundträning.
- Identifiering av forskningsbehov avseende EDD, som ett underlag till nya EU utlysningar.

Arbete som ännu pågår är en guide med generella råd angående val av produkter för träning, certifiering och kvalitetskontroll. Det skrivs även på ett protokoll för planering, genomförande och resultatbearbetning i samband med EU gemensamma praktiska övningar och tester av explosivämnessökande hundar. Nästa år planeras det för en praktisk test av olika nationers hundar, med sök på HME, (Home Made Explosives) i Portugal.

När ovanstående dokument har accepterats av alla medlemmar i EU EDD WG, kommer de att publiceras. De är utvecklade för att stödja medlemsstaternas myndigheter och industri, för att optimera förmågan att detektera explosivämnen med hjälp av sökhundar.

Kunskapsutbytet och de presentationer av verksamhet och forskningsprogram som hålls vid mötena är också viktigt. I år har intresset för personsök varit stort, där hunden ska kunna hitta explosivämnen eller bengaliska eldar eller pyroteknik som bärs av en person, i en väska eller på kroppen. Syftet är att snabbt kunna upptäcka gömda explosivämnen i större folksamlingar (t-bana, tåg, arenor) och för screening innan säkerhetskontrollen på flygplatser. Det är utmanande scenarier för upptäckt av explosivämnen. Tyskland och BKA (Bundeskriminalamt) har i sin studie om bengaliska eldar uppvisat 72 % träffsäkerhet i hundarnas detektförmåga vid test, vilket får anses som ett bra resultat.

Presentationer och dokument kommer att lämnas till Försvarsmaktens Hundtjänstenhet, FHTE.

9 Diskussion

Sensorfusion är en nyckelkomponent i ett sensorsystem för detektion av IED. Som ett första steg i arbetet med sensorfusion har vi i detta projekt arbetat med bildalstrande passiva elektrooptiska (EO) sensorer för fusionsprocessen. Fortsatt arbete kommer att inkludera även andra sensorer, med målet att nå en generell fusionsplattform med fusion på beslutsnivå.

Vidare är adaptivitet en viktig förmåga i ett sensorkoncept, där exempelvis anpassning av detektionströskel (känslighet) till aktuella förhållanden kan ske och ge en förmåga att detektera avvikelser från en normalbild.

Internationellt fortsätter satsningar på EO-sensorer; både bredbandiga sensorer och hyperspektrala sensorer. Såväl LWIR som längre våglängdsband bedöms som intressanta för detektion av explosivämnen, framförallt med hyperspektrala sensorer. Sidtittande radar provas för detektion av sidverkande IED:er.

Trots kända begränsningar för markpenetrerande radar (GPR) sker en utveckling mot framåttittande system på markfordon. Flygburna radarsystem med markpenetrerande förmåga utvecklas liksom även SAR-system baserade på förändringsdetektion.

Sensorsystem för vibrometri (t.ex. laservibrometri) och akustisk detektion studeras också, och kan komma att utgöra ett betydelsefullt komplement till andra sensorer.

10 Publikationslista

Under projektperioden 2013-2015 har nedanstående rapporter och konferensbidrag publicerats.

1. Dietmar Letalick, Ida Johansson och Rose-Marie Karlsson, ”Sensorer för upptäckt av IED. Beskrivning av hotbild och scenarier”, FOI-RH--1365--SE (2013).
2. Mona Brantlind och Malin Kölhed, FOI-RH--1371-- SE (2013).
3. Thomas Svensson, “An evaluation of image quality metrics aiming to validate long term stability and the performance of NUC methods”, FOI-S--4459--SE, Linköping (2013). Publicerad i SPIE DSS, *Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling and Testing XXIV*, Baltimore, USA, 2013-04-29–2013-05-03.
4. Håkan Larsson och Dietmar Letalick, “Military forensic use of handheld 3D camera”, FOI-S--4445--SE, Linköping (2013). Publicerad i SPIE DSS, *Laser Radar Technology and Applications XVIII*, Baltimore, USA, 2013-04-29–2013-05-03.
5. Julia Hedborg och Johan Eriksson, ”Mätning av reststrålebandet för kvarts i störd jord”, FOI-D--0583--SE, Linköping (2014).
6. Ida Johansson, Bernhard Zachhuber, Markus Nordberg och Henric Östmark, “Rejection of fluorescence from Raman spectra of explosives by picosecond optical Kerr gating”, FOI-S--4457--SE, Stockholm (2013). Publicerad i SPIE DSS, *Chemical, Biological, Radiological, Nuclear, and Explosives (CBRNE) Sensing XIV*, Baltimore, USA, 2013-04-29–2013-05-03.
7. Stefan Björkert, Dietmar Letalick, Johan Eriksson, Per-Olov Frörlind, Louise Funke, Ida Johansson, Julia Hedborg, Rose-Marie Karlsson, Henrik Petersson och Ingmar Renhorn, ”Sensorer för upptäckt av IED. Årsrapport 2013”, FOI-R--3777--SE, Linköping (2013).
8. Philip Engström, Håkan Larsson och Dietmar Letalick, “Ladar-based IED detection”, FOI-S--4857--SE, Linköping (2014). Publicerad i SPIE DSS, *Detection and Sensing of Mines, Explosive Objects, and Obscured Targets XIX*, Baltimore, MD, USA, 2014-05-06–2014-05-08.
9. Dietmar Letalick, ”Redovisning av milstolpe kv 2 2014 för projekt Sensorer för upptäckt av IED”, FOI MEMO 4992, Linköping (2014).
10. Dietmar Letalick, Staffan Abrahamson, Carl Brännlund, Bengt Ericson, Martin Glimtoft, Ida Johansson, Rose-Marie Karlsson, Håkan Larsson och Ingmar Renhorn, ”Sensorer för upptäckt av IED. Årsrapport 2014”, FOI-R--4023--SE, Linköping (2015).

11. Henrik Petersson och David Gustafsson, "Lägesrapport: Pågående verksamhet för sensorfusion inom området sensorer för upptäckt av IED", FOI MEMO 5299, Linköping (2015).
12. Mattias Svanqvist, Markus Nordberg och Henric Östmark, "Single-shot stand-off detection of explosives precursors using UV coded aperture Raman spectroscopy", FOI-S--5087--SE, Stockholm (2015). Publicerad i SPIE DSS, *Chemical, Biological, Radiological, Nuclear and Explosives (CBRNE) Sensing XVI*, Baltimore, USA, 2015-04-20–2015-04-24.
13. Julia Hedborg "Spektrala mätningar av reststrålebandet hos kvartssand", FOI-D--0675--SE, Linköping (2015).
14. Henrik Petersson, David Gustafsson, Julia Hedborg och Dietmar Letalick, "Field trials for development of multiband signal processing solutions to detect disturbed soil", FOI-S--5267--SE, Linköping (2015). Publicerad i SPIE Security + Defence, *Electro-Optical Remote Sensing, Photonic Technologies, and Applications IX*, Toulouse, 2015-09-21 - 2015-09-25.
15. Lars Pettersson och Magnus Gustafsson, "Modellering av radarmålära för sidverkande IED", FOI Memo H1591 (2015).
16. Staffan Abrahamsson och Per-Olov Fröling, "Kommentarer till utvärdering av GPR", FOI Memo H1599 (under utgivning).
17. Julia Hedborg, Henrik Petersson, Håkan Larsson, David Gustafsson, Dietmar Letalick, Roland Lindell, Michael Tulldahl och Stefan Björkert, "Detektion av störd jord. Dokumentation av försök utförda på Lilla Gåra 2014", FOI-D--0705--SE (2015).

11 Referenser

- 1 D. Letalick, I. Johansson, R.-M. Karlsson, "Sensorer för upptäckt av IED. Beskrivning av hotbild och scenarier", FOI-RH--1365--SE (2013).
- 2 H. Larsson, T. Svensson, D. Letalick, "Mätningar med EO-sensorer mot nedgrävda IED:er", FOI-D--0489--SE (2012).
- 3 J. Hedborg, "Spektrala mätningar av reststrålebandet hos kvartssand", FOI-D--0675--SE, Linköping (2015).
- 4 J. Hedborg m.fl., "Detektion av störd jord. Dokumentation av försök utförda på Lilla Gåra 2014", FOI-D--0705--SE (2015).
- 5 P. Engström, H. Larsson, and D. Letalick, "Ladar-based IED detection", Proc. SPIE 9072, *Detection and Sensing of Mines, Explosive Objects, and Obscured Targets XIX*, 907216. (2014) doi: 10.1117/12.2049524.
- 6 STO-TR-SCI-256-Part-I Ground Vehicle Based Change Detection, NATO STO, STO-TR-SCI-256-Part-I AC/323(SCI-256)TP/558, September 2014.
- 7 H. M. Tulldahl, F. Bissmarck, H. Larsson; C. Grönwall, and G. Tolt, "Accuracy evaluation of 3D lidar data from small UAV", Proc. SPIE 9649, *Electro-Optical Remote Sensing, Photonic Technologies, and Applications IX*, 964903. (2015) doi: 10.1117/12.2194508
- 8 J. Fagerström m.fl., "Plattformssignaturer. Slutrapport 2013. Linköping, FOI-R--3766--SE, Linköping (2013).
- 9 H. Larsson, T. Svensson och D. Letalick, "Mätningar med EO-sensorer mot nedgrävda IED:er", FOI-D--0489--SE, Linköping (2012).
- 10 H. Petersson, D. Gustafsson, J. Hedborg, and D. Letalick, "Field trials for development of multiband signal processing solutions to detect disturbed soil", Proc. SPIE. 9649, *Electro-Optical Remote Sensing, Photonic Technologies, and Applications IX*, 964909. (2015) doi: 10.1117/12.2194887
- 11 Exponent, Inc. Hämtad 18 december 2015 från: <http://www.exponent.com/Detection-of-Buried-Explosive-Hazards/>
- 12 3d-Radar AS. Hämtad 18 december 2015 från: <http://www.3d-radar.com/>
- 13 S. Abrahamsson och P.-O. Frörlind, "Kommentarer till utvärdering av GPR", FOI Memo H1599, Linköping (under utgivning).
- 14 H. Hellsten, S. Sahlin, and P. Dammert, "Polarimetric Subsurface SAR imaging", Proc. Int. RADAR Conf. 2014, Lille, France.

- 15 W.W. Clark et al., "Wideband Radar for Airborne Minefield Detection", Proc. SPIE. 6217, *Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets XI*, 621721. (2006) doi: 10.1117/12.673479.
- 16 J. Keller, "Army extends support for UAV man-hunting radar from Northrop Grumman through 2013", *Military & Aerospace Electronics*, Feb 7, 2013. Hämtad 18 december 2015 från:
<http://www.militaryaerospace.com/articles/2013/02/Northrop-VADER-radar.html>
- 17 D. Letalick m.fl., "Sensorer för upptäckt av IED. Årsrapport 2014", FOI-R--4023--SE, Linköping (2015).
- 18 FOI-RH--1317--SE
- 19 FOI-RH--1355--SE
- 20 R. G. Baraniuk, "Compressive sensing", *Sig. Proc. Mag.*, 24.4 (2007).
- 21 E. Ceko et al., "CEREX Final Report – Detection of Explosives Particles by Imaging Raman Spectroscopy". FOI-R--3461--SE, Stockholm (2012).
- 22 G.R. Arce, D.J. Brady, L. Carin, H. Arguello, and D.S. Kittle, "Compressive Coded Aperture Spectral Imaging: An Introduction", *IEEE Sig. Proc. Mag.*, pp. 105–115, DOI: 10.1109/MSP.2013.2278763 (2014).
- 23 STO-TR-SET-161 Leading Body for the C-IED LTCR, NATO STO, STO-TR-SET-161 AC/323(SET-161)TP/534, July 2014.
- 24 T. Hult m.fl., "Fältförsök i Bechyne. NATO/STO SCI-256 test, 12-16 maj 2014", FOI-RH--1497--SE, Linköping (2014).

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



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
164 90 Stockholm

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

www.foi.se