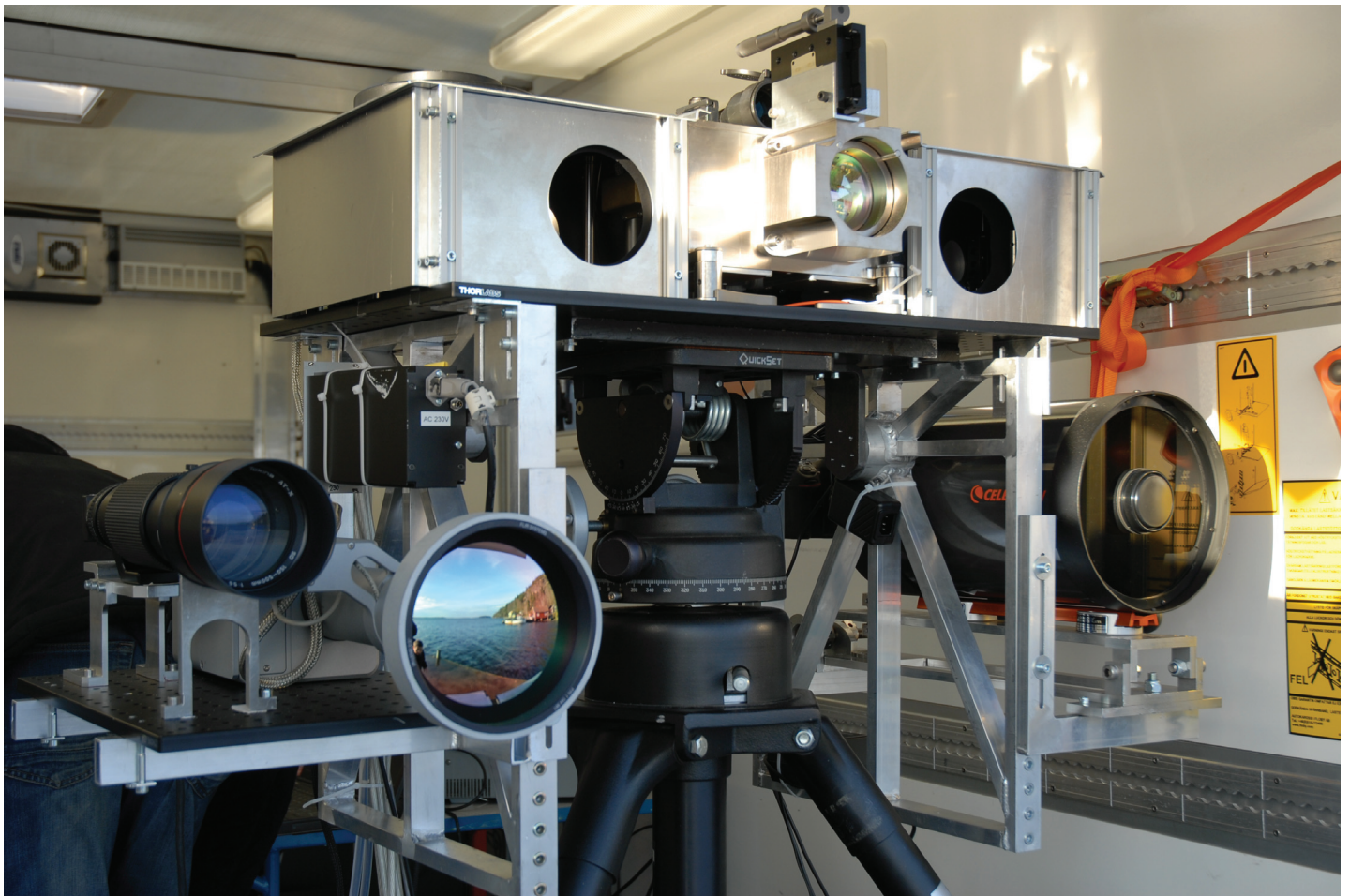


Aktiva elektro-optiska lasertekniker för sjö- och luftmål

Sammanfattning och utblick

ROLF RAGNARSSON OCH OVE STEINVALL



Rolf Ragnarsson och Ove Steinvall

Aktiva elektro-optiska lasertekniker för sjö- och luftmål

Sammanfattning och utblick

Bild/Cover: Folke Berglund, FOI

Titel	Aktiva elektro-optiska lasertekniker för sjö- och luftmål
Title	Active electro-optical laser technology for surface and air targets
Rapportnr/Report no	FOI-R--4184--SE
Månad/Month	December
Utgivningsår/Year	2015
Antal sidor/Pages	29 p
ISSN	1650-1942
Kund/Customer	Försvarsmakten
Forskningsområde	7. Sensorer och signaturanpassning
FoT-område	Sensorer och signaturanpassning
Projektnr/Project no	E54570
Godkänd av/Approved by	Martin Rantzer
Ansvarig avdelning	Sensor- och TK-system

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

Rapporten sammanfattar resultat och diskuterar slutsatser från prov med aktiva laserbaserade elektro-optiska system mot små mål på havsytan respektive mot luftmål på låg höjd. Inom ramen för internationella samarbeten har även jämförelser gjorts mellan det aktiva lidarsystemet och andra elektro-optiska tekniker. Syftet med rapporten är att skapa förståelse för systemens förmåga och begränsningar, liksom för den troliga framtida tekniska utvecklingen inom området. Därigenom lämnas ett bidrag till diskussionen om hur denna typ av system kan nyttiggöras inom framtida försvarsmaktssystem.

Slutsatserna för ytmål är i hög grad baserade på bearbetning av data som erhöles vid fältprov mot små sjömål under november 2014. Vid detta prov medverkade även våra systerorganisationer Dstl (tillsammans med Selex i Storbritannien) respektive Fraunhofer IOSB i Tyskland. För att komplettera provresultaten har även system-simuleringar genomförts och verifierats mot provdata.

Tyngdpunkten i framställningen ligger på ytmål, men luftmål på låg höjd är i många avseenden snarlika vad gäller tekniker för detektion och klassificering, vilket motiverar att dessa måltypen studeras tillsammans. Vi rapporterar därför resultat från prov med olika laserbaserade metoder mot en kryssningsmissil-atrapp på 1.3 km avstånd.

Proven visar att laserprofilering är en teknik som möjliggör klassificering mindre ytmål (under 10 meters längd) efter måltyp på avstånd upp till 7 km. Beräkningar visar dock på en potentiell räckvidd bortom detta avstånd, speciellt om fotonräknande detektorer utnyttjas istället för den nuvarande detektorn.

Aktiva lasersystem är mångsidiga sensorsystem som kan användas för en mängd sidouppgifter förutom att erhålla en målprofil eller en avbildning av målet. I rapporten diskuteras även den alternativa användningen av systemet för atmosfäriska lidarmätningar. Vi anser att denna mångsidighet är central för att i framtiden realisera högpresterande optiska system till rimlig kostnad.

Nyckelord:

Ladar, lidar, laser radar, avståndsprofilering, sjömål, luftmål, atmosfärlidar

Summary

This report summarizes and discusses results from tests with active laser-based electro-optical systems aimed at small surface targets at sea level and at air targets at low altitude, respectively. As part of an international collaboration, comparisons have also been performed between the active lidar systems and other types of electro-optical sensor technologies. The purpose of the report is to create an understanding about system capabilities and limitations, as well as the probable future development of technology in this area. Thus, a contribution is made to the discussion about how systems of this type can be utilized within the framework of future military sensor assets.

The conclusions for surface targets are largely based on exploitation of data collected during tests conducted in November 2014. The FOI tests were performed in collaboration with the research organizations Dstl (GB) and Fraunhofer IOSB (DE). Simulations have also been performed and verified in order to complement the experimental test results.

The main focus of the report is on surface targets, but low-altitude airborne targets are also discussed, because the latter are similar to the former with respect to detection and classification techniques. These similarities justify a parallel analysis of these two types of targets. Therefore, we also report on results from tests with different laser-based methods against a mockup of a cruise missile at a distance of 1.3 km.

The trials show that laser profiling techniques can be used to classify small surface targets (length below 10 meters) according to type up to a target distance of 7 km. Calculations, however, indicate a potential range well beyond this distance, especially if the current detectors are replaced by photon counting hardware.

Active laser are versatile sensor systems with a multitude of different uses besides obtaining a target profile or imaging the target. Hence, the report also discusses the alternative use of the system for atmospheric lidar measurements. We consider this versatility central to future cost-effective realization of high performance optical systems.

Keywords:

Ladar, lidar, laser radar, range profiling, sea targets, air targets, atmospheric lidar

Innehållsförteckning

1	Inledning	7
1.1	Motivering.....	7
1.2	Avgränsningar	7
1.3	Läsanvisning	7
2	Ytmål	8
2.1	Försök och sensorer	8
2.1.1	Kort beskrivning av utförda prov	8
2.1.2	FOI:s profilometersystem	9
2.2	Resultat	10
2.2.1	Exempel på bilder och data	10
2.2.2	1D-profilering: simulering och klassificering	12
2.2.3	Metoder för passiva sensorer: Optiskt flöde och ATR	14
2.2.4	Målidentifiering via bilder från GV-avbildning	16
2.3	Diskussion och jämförelse	17
2.3.1	Räckvidd för 1D-profilering	17
2.3.2	Jämförelse mellan elektrooptiska sensorsystem	18
3	Luftmål	21
3.1	Mål använt vid proven	21
3.2	Resultat från 1D-profilering	21
3.3	Diskussion.....	24
4	Laser för atmosfärssondering	25
4.1	Diskussion.....	25
5	Sammanfattande diskussion och slutsatser	26
5.1	Nuläge och utblick.....	26
5.2	Framtida arbete.....	26
6	Tack till	28
7	Referenser	29

1 Inledning

1.1 Motivering

System och metoder för fjärrspaning mot små och svårupptäckta yt- och luftmål är betydelse för att uppnå en bättre lägesbild och tillräcklig förvarning vid aggressioner och attacker mot Sverige och mot svenska förband vid internationella insatser. Systemen bör så långt möjligt vara mobila, kunna spana över stora ytor och bidra till klassificering av detekterade hotobjekt under varierande miljöförhållanden.

Aktiva system baserade på radar och elektrooptik bör vara väl lämpade för denna uppgift, men har traditionellt ofta utformats primärt för andra måltyper. Inom FoT-projektet ”Sensorer för fjärrspaning mot sjö- och luftmål” undersöks därför utformning och prestanda för potentiella framtida aktiva system för fjärrdetektion och för klassificering med inriktning främst mot ”små mål” på havsytan eller på låg höjd. ”Små mål” innefattar både bemannade och obemannade system, vilka kan vara av liten fysisk storlek, vara smygutformade, befinna sig på långt avstånd eller uppvisa en låg målsignatur. EO-systemen kompletterar radarsystemen, då de senare tillåter upptäckt och invisning på långt håll, medan EO-systemen ger förmåga till kvalificerad klassificering, identifiering samt följning då målet kommer närmare.

Resultaten från projektet syftar till att skapa en kunskapsbas för framtida tillämpningsprojekt inom området aktiva lasersystem för upptäckt och klassificering. Föreliggande rapport vänder sig till personal inom FM, FMV och stödmyndigheter som söker mer information om hur aktiva lasersensorer kan användas för spaning mot sjö- och luftmål.

1.2 Avgränsningar

Inom projektet behandlas ej kommunikationsproblem eller andra datadistributionsaspekter, ej heller datafusionsaspekter på ledningssystemnivå. Aktiva system prioriteras framför passiva, främst av räckviddsskäl, men även av budgetskäl. Dock har passiva EO-system ingått i provverksamheten mot såväl sjö- som luftmål. Dessa avgränsningar har väglett arbetet som ligger till grund för denna rapport.

1.3 Läsanvisning

De försök och den databearbetning som ligger till grund för denna rapport har utförligare beskrivits i ett antal interna FOI-rapporter och bidrag vid internationella vetenskapliga konferenser (se främst [1] och referenser däri). Innehållet skall därför ses främst som en sammanfattning av utfört arbete.

Ytmål respektive luftmål behandlas var för sig i två separata kapitel (kapitel 2 respektive kapitel 3). Vart och ett av de båda kapitlen presenterar provens förutsättningar och resultat, samt diskuterar även de slutsatser som kan dras från respektive prov.

Kapitel 4 innehåller en kort presentation av användning av FOI:s laserprofileringssystem för atmosfärsmätningar och tjänar som ett exempel på mångsidigheten hos aktiva lasersystem genom att ge exempel på en sidouppgift som kan lösas med denna typ av system.

I kapitel 5 ges slutligen en sammanfattande diskussion och slutsatser kring materialet i rapporten. Denna kan med fördel läsas separat av dem som endast har begränsad tid tillgänglig.

2 Ytmål

Nedan följer exempel på resultat samt de viktigaste slutsatserna från prov mot små båtar. Syftet var att testa och värdera aktiva och passiva elektrooptiska sensorer (10 olika typer) för upptäckt, följning och identifiering av små mål på havsytan. Ur FOI:s synvinkel var en viktig komponent jämförelse mellan det egna laserprofilerings-systemet och alternativa passiva och aktiva system [2]. International publicering har skett vid SPIE-konferensen i Toulouse under september 2015 [4][5].

2.1 Försök och sensorer

2.1.1 Kort beskrivning av utförda prov

Prov genomfördes vid Bråviken under november 2014 och finns närmare beskrivna i ref. [2] och [6]. Dessutom hänvisas till en FOI-rapport främst avsedd för FMV, se referens [3]. Personal från IOSB Fraunhofer i Tyskland och från Selex/Dstl i Storbritannien deltog i testerna, tillsammans med FOI som arrangerade försöken.

De passiva sensorerna täckte det visuella, SWIR-, MWIR- och LWIR- området. Aktiva sensorer som arbetade vid 1,5 µm våglängd och samlade in 1D-, 2D- eller 3D-data. Stödsensorer inkluderade en väderstation, en scintillometer, samt sensorer för positionering och attityd-bestämning av båtarna. Tabell 1 visar de olika sensorerna. För fler detaljer hänvisas till referenserna ovan.

Tre båtar i klassen 4-9 meter användes som mål. Figur 1 visar de använda målbåtarna. Efter registrering av båtarna på nära håll skickades de ut till ett avstånd på 5-7 km från mätplatsen. Målfarkosterna styrdes sedan så att de på olika avstånd och med varierande bakgrund uppvisade olika aspektvinklar (färdriktningar) i förhållande till observationsriktningen).

Tabell 1. Sammanställning av använda EO-sensorer på försöksplatsen i Kvarsebo. Sensorerna i de skuggade fälten ingår i den försöksuppställning som är framtagna inom projektet "Upptäckt av små sjömål".

Sensor	Organisation	Kommentar
Selex 3DLI Rig, 1.5 µm	FOI/Dstl	På lån från Selex/Dstl.
ASC aktiv 3D-sensor	IOSB	
Gated Viewing (Intevac), 1.5 µm	IOSB	Liknar GV-systemet som integrerats i FOI:s testrigg.
AIM MWIR-kamera	IOSB	
Horizon HD IR-kamera (3–5 µm)	Selex/Dstl	
Videokamera Thorlabs	FOI	Modell DCC1545M-GL
QWIP kamera, 8–11 µm	FOI	FLIR SC3000
Laserprofilometer, 1.5µm	FOI	Beskriven i avsnitt 2.1.2
SWIR-sensor	FOI	
Div. kameror i synliga området	IOSB, FOI	



Figur 1. Målbat. De övre båtarnas signatur modifierades genom att placera ett kaminrör och en låda på respektive båt. Båt A (övre): längd 4.73 m, bredd 1.92 m. Båt B (mitten): längd 6.18 m, bredd 2,15 m (total längd inkl. bakre platta = 6.57 m). Båt C (undre): längd 8.64 m, bredd 3.15 m (total längd inklusive bakre platta = 9.55 m).

2.1.2 FOI:s profilometersystem

En laserprofilometer kan sägas vara en laseravståndsmätare med bättre avståndsupplösning och med viss kapacitet att detektera, följa, samt att klassificera/identifiera målet.

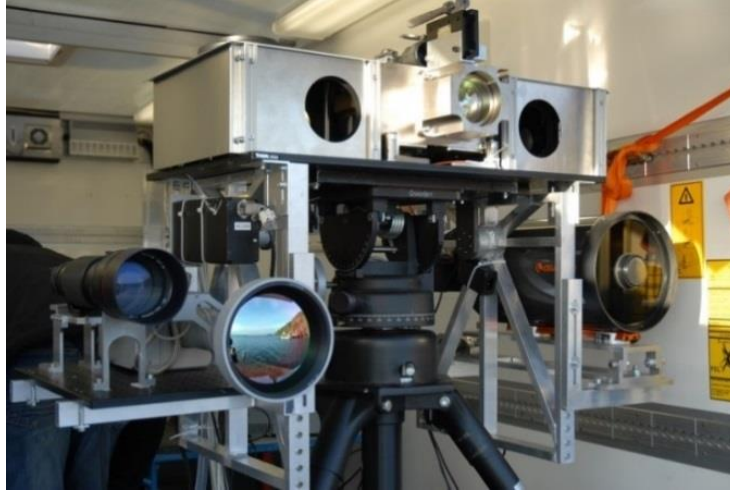
Principen är densamma som för laseravståndsmätaren, d.v.s. en kort laserpuls sänds ut och pulsekot (reflexer) från målets olika delar registreras (digitaliseras) för att erhålla både ett sammanvägt målavstånd, men även en avståndsupplöst profil av detsamma. Systemet kan, om det har en rimligt hög pulsrepetitionsfrekvens (ca 30 Hz eller mer) och monteras på ett vridbord, även ha en sök- och följefunktion så att det kan detektera mål inom en given sektor efter invisning från exempelvis en radar.

Notera att avståndsupplösningen inte primärt är avståndsoberoende (baserad på tidmätning). Däremot avtar signabrus-förhållandet med avståndet, som för alla aktiva system, vilket begränsar räckvidden. Räckvidden är dock längre än för ett aktivt avbildande system som använder samma laser eftersom all reflekterad strålning detekteras i ett enda detektorelement i motsats till en avbildande mottagare som för ett vinkelupplöst mål använder flera detektorelement (pixlar). Laservåglängden 1.55 μm gör att systemet i praktiken kan anses ögonsäkert.

Klassificeringsförmågan blir bättre vid högre avståndsupplösning. Dagens avståndsmätarlikande sändare har dock en pulsbreddsbegränsning kring 3-6 ns, vilket innebär en avståndsupplösning i klassen 0.4-0.9 m. Eftersom detta är i minsta laget för små mål som en liten UAV har vi börjat studera fotonräknande system där en avståndsupplösning under 1 cm kan uppnås.

Det sensorpaket som utvecklats av FOI inom FoT-projektet och använts vid de nedan beskrivna proven visas i Figur 2. Systemet innehåller två detektorer (mottagare), en snabbare (Voxel modell RDC1-NJAC) och en långsammare (Licel InGaAs). Den snabbare är avsedd för generering av en avståndprofil för måligenkänning och den långsammare för måldetektion och målföljning. Genom att sänka kravet på avståndsupplösning hos den senare reduceras bandbredden och en bättre räckvidd kan uppnås i

jämförelse med den snabbare mottagaren. Sensorpaketet innehåller även högupplöst optik för aktiv avbildning (användes dock inte vid Bråvikenproven eftersom IOSB/Tyskland hade en liknade utrustning) samt TV och IR kameror.



Figur 2. Sensorpaket för småmålsdetektion. Den övre delen innehåller en 1550 nm laser (från JP Innovation Lasers) och två mottagare, en snabbare för profilering och en långsammare för sökning och målföljning. Under dessa optik för TV och QWIP kamera (8-11 μm) samt det större Celestron-teleskopet avsett för grindad avbildning vid 1550 nm med Intevac-sensor. I bilden saknas systemets vridbord.

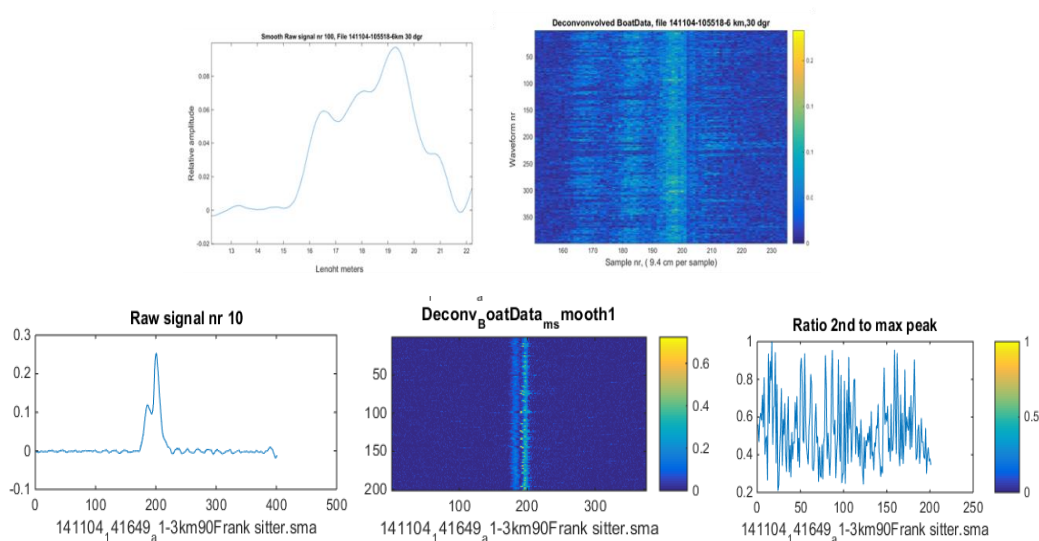
2.2 Resultat

2.2.1 Exempel på bilder och data

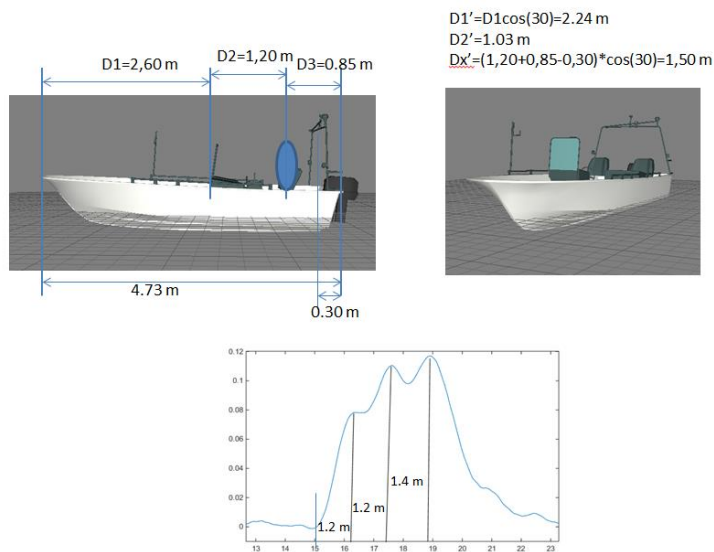
Nedan presenteras illustrativa exempel på data och bilder från de olika sensorerna. Figur 3 visar ett exempel för den lilla båten (Båt A i Figur 1) vid 6 km avstånd observerad med den passiva SWIR-kameran och en MWIR-kamera (Selex Horizon). Vinkelupplösningen är inte tillräcklig för att möjliggöra igenkänning. Figur 4 visar profileringsdata från den båt A vid 30° aspekt och 6 km målavstånd. Profilerna indikerar vilken typ av båt som är under observation, speciellt om 3D-formen är tillgänglig för att generera en modell av avståndsprofilen för jämförelse. Figur 5 visar en delmängd av informationen som kan extraheras ur avståndsprofilen för vidare analys såsom de högsta amplituderna och deras förhållande samt avstånden mellan topparna.



Figur 3. Bilder av båt A vid 6 km avstånd sedd mot landbakgrund. T.v. en passiv SWIR bild (Raptor) och t.h. en bild från Horizon kameran (MWIR).



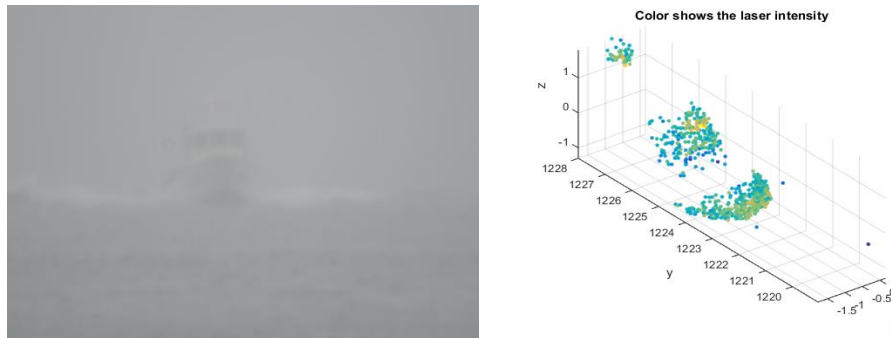
Figur 4. Överst t.v. ett pulseko (avståndprofil) från den båt A vid 30° aspekt och 6 km avstånd Överst t.h. en intensitetsbild av 400 pulsekon (y-axeln) motsvarande 10 sekunders insamlingstid avsatt mot sampel-nummer i tid (x-axeln). Under ett annat exempel från 90° infall mot båt A. Den första toppen motsvarar båtskrovet och den andra föraren och dess vindskydd på 1.2 meters avstånd. Bilden under längst t.h. visar kvoten mellan den första och andra toppen som även kan inkluderas i klassificeringen vid sidan av inbördes avstånd mellan topparna.



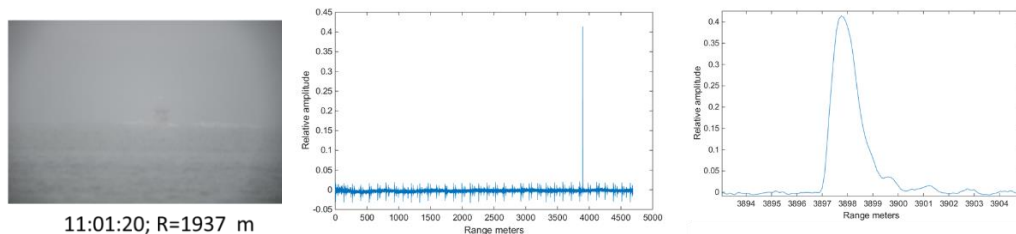
Figur 5. Överst: Dimensioner och struktur hos den lilla målbåten (Båt A). 3D-modellen erhöles från lasermätning med en Riegl-skanner. Från pulsekot i figuren kan vi uppskatta $(1.2 + 1.2) \text{ m} = 2.4 \text{ m}$ som representant för $D1'$ (nominellt 2.24 m) sedd vid 30° azimuthvinkel. Den topp-separation $(1.2 + 1.4) \text{ m} = 2.6 \text{ m}$ som också observeras kan vara representativ för pulsform från kölen vid 30° och föraren. Toppseparationen 1.2 m skulle kunna motsvara toppen från vindskyddet framför föraren och föraren själv.

Vid sämre väder (siktvärden i intervallet 2-3 km) visade sig aktiv avbildning samt laserprofilering effektivt ge information som möjliggjorde till målklassificering och/eller igenkänning. Kontrasten för de passiva sensorerna försvann i stort sett på ett avstånd motsvarande siktavståndet (i detta fall mellan 2-4 km), se Figur 6. Den längsta räckvidden erhöles med det profilerande systemet. Genom att svepa med systemet i riktning mot målet kunde vi erhålla ett måleko trots att det befann sig utom synhåll för de passiva och aktivt

avbildande sensorerna. Figur 7 visar ett exempel på en signal som inte syntes i de avbildande sensorerna.



Figur 6. Båt C närmar sig på ett avstånd av 2,2 km som framgår av den visuella bilden (Nikon-kamera med Celestron F=1 m optik) och till höger från ASC sensorn visas fören, kabinen och radarantennen som ett 3D-punktmoln.



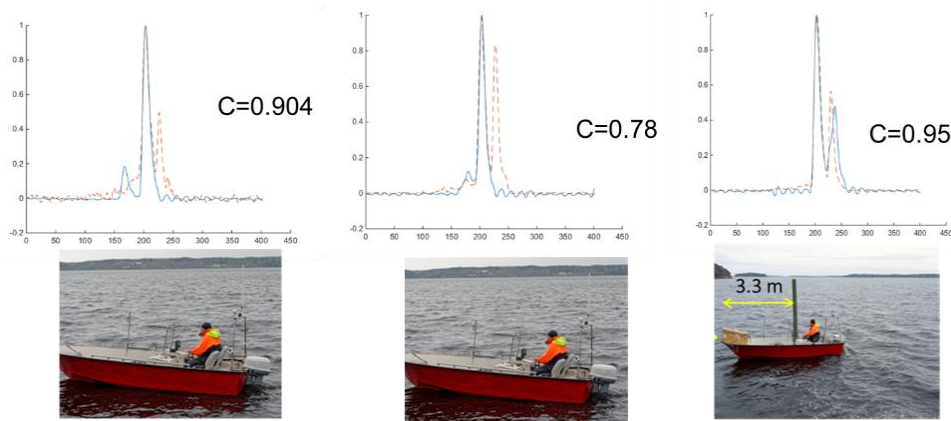
Figur 7. T.v. foto av båt vid ca 2 km avstånd vid 3 km sikt. T.h. exempel på pulsekon från ca 4 km avstånd. Båten kunde följas med profileringsystem ut till max avstånd, ca 6 km med bra signal-brusförhållande.

2.2.2 1D-profilering: simulering och klassificering

Profileringsensorn innehöll som ovan behandlats en 6 ns, 40-60 Hz PRF, 1,5 μm laser med en långsam och en med en snabb mottagare för detektering, följning och igenkänning av mål på långa avstånd då den transversella upplösningen hos bildsensorer gav begränsad information [7]. Avståndsupplösningen var ca 0.7 meter.

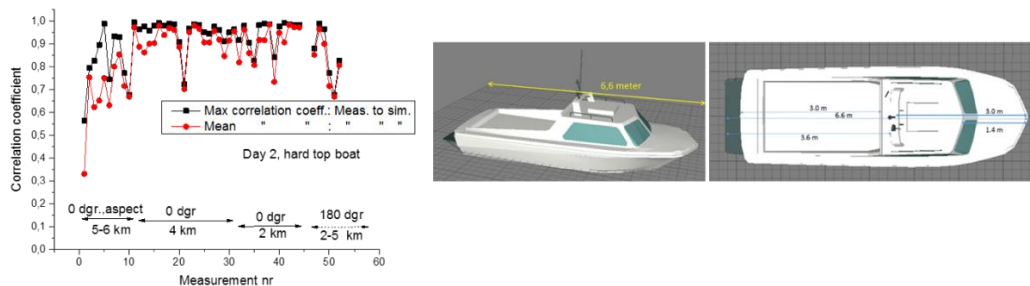
För att de uppmätta pulsekona skall möjliggöra måligenkänning måste det finnas förkunskaper om potentiella pulsekon från olika farkoster, erhållna vid tidigare tillfällen eller härledda från CAD-modeller eller foton. Simulering av de förväntade pulsekona beskrivs i en av våra senaste publikationer [7]. I Bråvikenproven laserskannades målen och vi använde i klassificeringen CAD-modeller av målbåtar som erhållits från laserscanningen.

Ett enkelt sätt att jämföra den uppmätta med det simulerade pulsekot är genom kors-korrelation. När huvudtopparna matchas kan vi uppnå korrelationskoefficienter som exemplifieras i Figur 8.



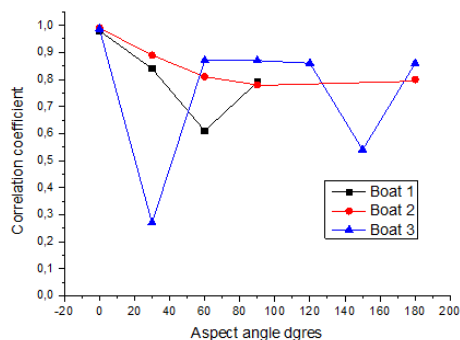
Figur 8, Exempel på uppmätta (heldragen linje) och simulerade (prickad) pulsekon (avståndsp profiler) tillsammans med korrelationskoefficienterna som erhållits efter att matcha den största toppen. Man kan observera hur avståndspprofilerna matchar olika väl, förmodligen på grund av olika lägen av strålen relativt båten samt turbulensfluktuationer. Osäkerheter i båtriktning kan vara en annan felkälla.

Observera att korrelationsvärdet kan vara ganska högt även om de andra topparna inte matchar helt. I Figur 9 exemplifierar vi korrelationskoefficienten för mätningar mot båt B för 0° aspekt (närmaste kurs) och för aspekt 180° . De flesta korrelationsresultaten för 0° visar höga värden, över 0.9 (maximaltvärden och för medelvärden). Lägre värden kan sannolikt förklaras av dålig pekning och strålens jitter. Simuleringens riktighet kan också ifrågasättas åtminstone av det skälet att vi förenklat modellerna genom antagande samma diffusa reflektivitet (10 %) för hela farkosten. Vi vet till exempel att vissa delar är glänsande och ger spegelliknande reflektion och att fönstren är både glansiga och transparenta vid $1.5 \mu\text{m}$ laservåglängd. Vi kunde av praktiska skäl inte synkronisera båtrörelserna för den uppmätta sekvensen visavi den simulerade sekvensen. De uppmätta och simulerade värdena för avstånden motsvarar varandra med viss förskjutning mellan dem.



Figur 9. T.v. visar korrelationen mellan uppmätta och simulerade pulsekon (avståndsp profiler) för 0° och 180° aspekter av båten till höger. De låga värdena beror sannolikt på en kombination av dålig laserpekning, stråljitter och båtrörelse. Simuleringar och mätning kunde inte synkroniseras visavi båtrörelser.

Figur 10 visar korrelationskoefficienten för pulsekona för olika aspektvinklar liksom den genomsnittliga korrelationskoefficienten för pulsekon från olika båtar vid 0° aspekt och alla registreringar (typiskt 10-20 per båt och 0° aspekt). Tröskeln för korrelationsvärdet bör överstiga 0.9 för att möjliggöra en robust diskriminering.



	Boat 1	Boat2	Boat3
Boat 1	1	0.79	0.89
Boat2	0.79	1	0.81
Boat3	0.89	0.81	1

Figur 10. T.v. medelkorrelationskoefficienten mellan pulsekona (avståndprofilerna) från de omodifierade båtarna för olika aspektvinklar. T.h. korrelationskoefficienten för pulsekon av olika båtar vid 0° aspekt för ca 20 olika dataregistreringar per båt.

Sammanfattning 1D-profilering

Sammanfattningsvis gav analysen av 1D-profileringsdata med hjälp av korrelation och toppdetektering lovande resultat. Vi har även noterat viss robusthet mot båtrörelser, strålpekning och variation med antal strukturer på målet. Det är viktigt att en analysmetod har denna robusthet, eftersom datakvaliteten kan variera för dessa långa målavstånd och till följd av den manuella målföljning som vi tvingades använda. Den information som erhålls i denna analys från uppmätta avstånd och kvoter mellan de olika topparna, bör vägas in i den slutliga beslutsprocessen genom multivariat analys eller någon annan statistisk metod för att göra igenkänningen än mer robust.

2.2.3 Metoder för passiva sensorer: Optiskt flöde och ATR

Detta är ett sammandrag av konferensbidraget [4] av C. Grönwall, D. Gustafsson, G. Tolt och O. Steinvall.

När målet är totalt okänt och inte finns i målbiblioteket är matchande metoder inte tillämpliga. Vidare är segmenteringsbaserade detektionsmetoder svåra att tillämpa på grund av bakgrundsklotter. Metoder för bakgrundsmodellering, som gaussiska blandningsmodeller, GMM, eller sub-space projektionsmetoder, antar att kameran är stilla, vilket inte är nödvändigtvis är fallet i det aktuella fallet med ytmålsdetektion.

Det optiska flödet definieras som den skenbara rörelsen mellan två bilder i en bildsekvens. Måldetektion som använder optiska flöden baseras på antagandet att det optiska flödet av målet kan separeras från det optiska flödet som genereras av bakgrunden.

Exempel på upptäcktsprecision visas i Figur 11. Detektion och noggrann uppskattning av målens utsträckning ("bounding box") är mer utmanande om målet är litet (få antal pixlar), rör sig längs den optiska axeln eller om målet genererar större vågor. Dessa vågor kommer ofta att ingå i markeringsramen om de är nära det detekterade målet.

En total utvärdering av optiskt flödesbaserade detektionsmetoder tillämpat på ett större antal sekvenser av olika förhållanden, varierande måltyp, målavstånd och bakgrund har gett lovande resultat. Även om markeringsramen ibland inte anger rätt måldimensioner vid aktuell betraktningvinkel så invisar ramen ändå mål så bra att den kan stödja mätningar med profilerande eller avbildande lasersystem.



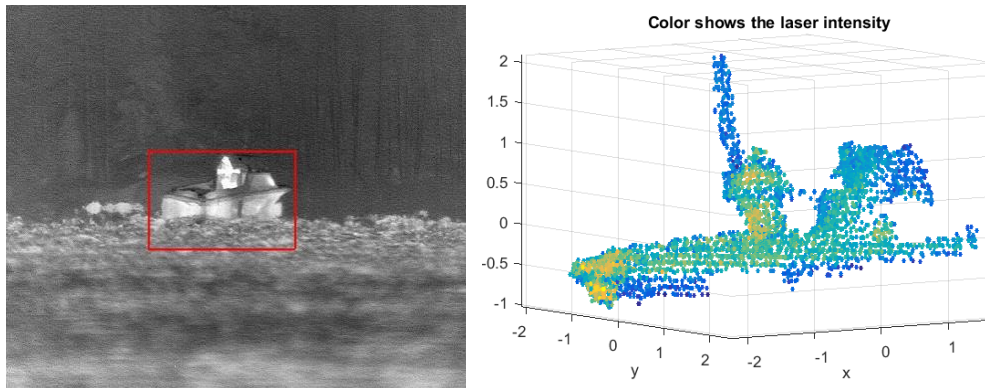
Figur 11. Markeringsramar för detektion i sekvenser av olika modalitet med mindre goda resultat avseende uppskattning av måldimensioner. I vissa fall innefattar det optiska flödet bogsvall, vågor eller hägringar inom markeringsramen. Även om markeringsramen inte ger rätt måldimension vid rådande betraktningssvinkel så kan den väl tjäna som invisning t.ex. för ett lasersystem.

När man jämför aktiv avbildning med högupplösande passiva kameror för ATR ("Automated Target Recognition") är det värt att hålla några allmänna iakttagelser i åtanke. Den första är den allmänt höga kontrast mellan mål och bakgrund som ofta erhålls med aktiv SWIR. Vatten absorberar vid $1.5 \mu\text{m}$ och visas därmed svart i intensitetsbilden. Samma sak gäller för snö och is [8]. Den andra förmågan som gynnar aktiv avbildning är tidsgrindningen som möjliggör att terräng-bakgrunden elimineras i motsats till fallet vid passiv avbildning. I aktiv avbildning fås avståndet automatiskt vilket är viktigt för att identifiera de geometriska strukturerna hos målet liksom att bestämma deras dimensioner.

Aktiva sensorer är i allmänhet begränsade i synfältet (FOV) på grund av kravet på hög lasereffekt för att täcka stora vinkelområden. Detta begränsar ofta deras användning till små FOVs och därmed måligenkänning och följning. Aktiva bildsystem bör därför arbeta tillsammans med typiska söksensorer som radar ellerIRST. Om man kombinerar passiva sensorer med aktiva kan man erhålla ett sensorpaket med stor potential att detektera och känna igen mål över långa avstånd (5-20 km). Igenkänningen blir mer robust ju närmare målet kommer eftersom att då kan avståndsprofilen kombineras med bildinformation.

Vi testade att kombinera passiva MWIR-data med data från aktiv 3D-SWIR och antog att de två sensorerna var inriktade och att utifrån MWIR så har ett mål upptäckts (Figur 12). Målsegmenteringen kan då utföras i den aktiva 3D-bilden eftersom reflektionen från vattnet är så låg. När målet är segmenterat, kan dess inriktning och mått beräknas från 3D-uppgifter. Orienteringen uppskattas och används för att rotera matchad CAD-modell i samma orientering.

Efter detta matchas en 2D-projektion av CAD-modellen till MWIR-bilden. Uttryckt i detalj så utnyttjas målkonturen från IR-bilden (beräknad med hjälp av Sobeloperatorn) till att matchas mot polygonen av den projicerade CAD-modellen.



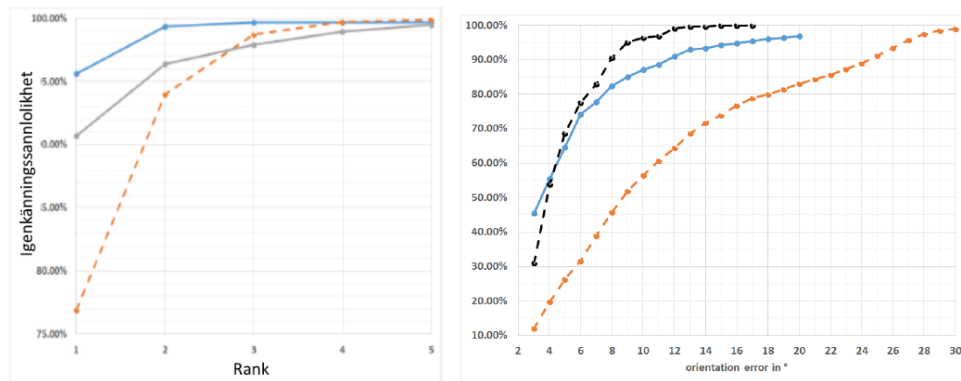
Figur 12. T.v. En MWIR bild med detekterat mål utnyttjande optisk flöde (rektangel). T.h. 3D aktiv avbildning baserad på 10 bildramar ("frames") av samma mål. Endast det övre däck är synligt, från vänster till höger: mast, person och kabin. Fönstren i kabinen reflekterar inte laserljuset tillbaka mot sensorn. Axlar i meter, färg visar laserintensitet.

2.2.4 Målidentifiering via bilder från GV-avbildning

Detta är ett sammandrag av en konferensartikel "Maritime target identification in gated imagery", av M. Hammer, M. Hebel samt M. Arens IOSB, Tyskland [9]. Data kommer från mätningarna i Bråviken.

För närvarande är tillgången på analoga högupplösta detektormatriser för aktiv avbildning något begränsad m.a.p. räckvidd och avståndsupplösning. Detta var till exempel fallet för ASC-sensorn som hade 100 μm pixlar, vilket begränsade sidoupplösningen på längre avstånd. Våra tyska samarbetspartners IOSB har därför undersökt ett aktivt system baserat på en grindad avbildande detektor för måligenkänning och orienteringsbestämning, vilket liknar FOI:s system för grindad avbildning. Systemet baseras på en detektor från Intevac och en pulsad 1.5 μm laser. Eftersom systemen från FOI och IOSB är nära identiska så utförde FOI inga GV-mätningar under Bråvikenproven.

Konferensbidraget presenterar ny teknik för segmentering, pose-estimering och modellbaserad identifiering av fartyg i grindade bilder och jämfört med de resultat som erhöles med ASC-sensorn. Den presenterade algoritmen ser ut att bli ett användbart verktyg för objektigenkänning och pose-estimering i GV-bilder. Dock bör ytterligare undersökningar göras med en större mängd fartygstyper, i olika väderförhållanden samt för större avstånd. För exakt utvärdering av orienteringsbestämningen är det nödvändigt under proven att för jämförelse exakt mäta upp även på fartyget. Metoden kan med fördel kombineras med profilering eller passiva EO-bilder. Figur 13 visar resultat när våra mätningar i Bråviken matchades mot ett bibliotek av 45 modeller av fritidsbåtar av samma storlekstyp.



Figur 13. T.v. Igenkännings sannolikhet mot accepterad rang (rang 1 innebär att båten är rätt via ett förstahandsval, rang två att den rätta båten finns med bland utvald typ, o.s.v.), grå alla båtar typ C 3, blå båt C 3 utan person, streckad båt B. T.h. Pose-estimeringsresultat. Andel av korrekt uppskattade poser över accepterad felorientering i grader. Blå linje båt C, streckad orange båt B, streckad svart (ingen drift) båt B.

2.3 Diskussion och jämförelse

2.3.1 Räckvidd för 1D-profilering

Vid mätningarna i Bråviken kunde vi belysa målen ut till maximalt 6-7 km. Det kan vara av intresse att se vilka räckvidder som är möjliga att uppnå med denna typ av system.

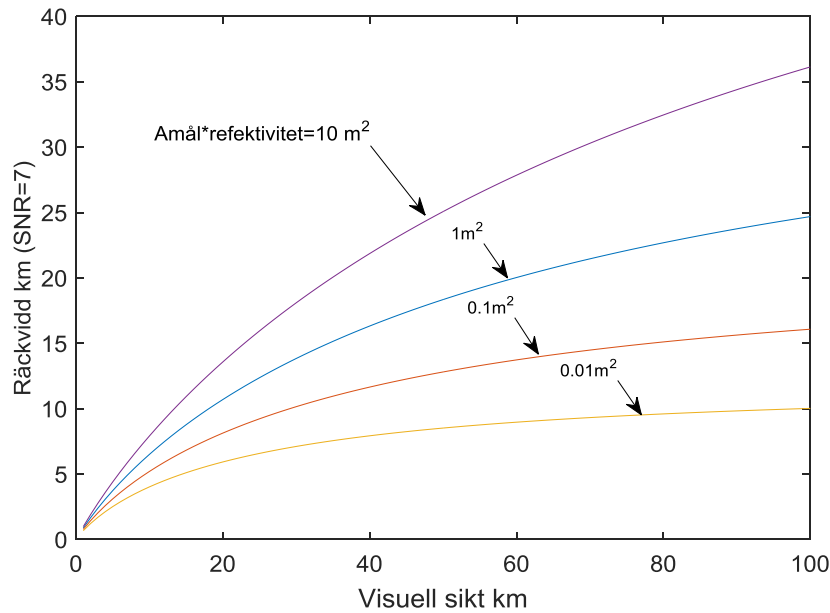
Laserkällan (JPI DP 7350 från JP Innovations) har en utgångsenergi på ca 15 mJ och en repetitionsfrekvens 40-60 Hz. Mestadels använde vi en PRF av 40 Hz under försöken. Bredvid lasern är två mottagare placerade. De två kanalerna har olika bandbredder, en långsam kanal med $B = 10$ MHz och en snabb kanal med $B = 300$ MHz. Tanken bakom detta var att använda signalerna från den långsamma kanalen för att detektera mål inom en viss vinkelsektor som ges av t.ex. från radar.

Efter detektering ska skanningen successivt vara smal runt riktningen för signaldetektion och därmed möjliggöra för den snabba kanalen för att samla avståndsprofiler av målet. Tyvärr var vridbordet på reparation under proven i Bråviken så vi var tvungna att göra detta manuellt, vilket blev svårt och osäkert när målet var svårt att observera.

Båda mottagarna har paraboliska spegelteleskop med 100 mm i diameter. Den snabba kanaldetektorn (Voxel modell RDC1-NJAC) har en 200 μm diameter och mottagaren en effektiv brännvidd på 327 mm. Detta resulterar i en $\text{FOV} = 0.6$ mrad. För den långsamma kanalen har detektorn (Licel InGaAs) diametern 0.5 mm, som tillsammans med den effektiva brännvidden 152 mm ger ett $\text{FOV} = 3.2$ mrad. Tanken med olika anpassade stråldivergenser till dessa FOV:s var att optimera sök- och profileringsprestanda. Optiska filter minimerar bakgrundsljuset.

Utifrån systemparametrar ovan uppskattas systemprestanda genom en uppskattning av bakgrundens effekt, användning av ladarekvationen för detekterad lasereffekt och Lambertfunktionen för räckviddsuppskattning. Detaljerna i denna beräkning återfinns i referens [1].

Figur 14 visar den maximala räckvidden för den snabba mottagaren mot visuell sikt för olika kombinationer av målstyrka ($A_{\text{target}} \times \rho_{\text{target}}$) m^2 (målarea \times målreflektans). Modellerat och uppmätt signalbrusförhållande stämmer väl, vilket styrker att modellen ger en relevant bild av möjliga räckvidder för långa målavstånd.



Figur 14. Beräknad räckvidd för den snabba kanalen i profilometern kontra visuell sikt för olika kombinationer av målstyrka ($A_{\text{target}} \times \rho_{\text{target}}$).

Slutsatser laserprofilering på långa avstånd

En profilometer av det slag som studeras har potential att ha en räckvidd på 10-tals km. Detta stämmer med en väl etablerad kunskap om laseravståndsmätare där man brukar säga att man kan mäta ut till nära halva siktavståndet mot någorlunda stora mål, t.ex. båtar eller UAV/flygplan. Det finns inget fysikaliskt fenomen som förhindrar att man kan behålla samma avståndsupplösning trots det långa avståndet. Turbulens kan bryta sönder strålen över långa avstånd men i ett sådant fall kan medelvärdesbildning över några pulser reducera eller eliminera denna inverkan på avståndsprofilen.

2.3.2 Jämförelse mellan elektrooptiska sensorsystem

Data från Bråviken-mätningarna innehåller en hel del intressanta samtidiga registreringar från upp till 10 olika sensorer och kan användas för fortsatt analys. FOI:s vridbord för profileringssystemet saknades tyvärr vid mätillfället varför manuell inriktning och följning fick tillgripas. Detta gav vissa begränsningar i att hålla en bra följepunkt och att få ett bra optimalt svep över målet.

Slutsatser från registrerade data:

- Bilder från visuella kameror, högupplösande MWIR och aktiva 2D-kameror gav bra igenkänningsförmåga i detalj för måttliga avstånd (ca 3 km eller kortare).
- Passiva SWIR-sensorer är också av intresse, men kan inte konkurrera fullt ut med de ovan nämnda under våra prov.
- 2D 1.5 μm GV-bilder gav bra mål-bakgrundskontrast särskilt i det svåra fallet när båten var nära land. Tidsgrindning kan till stora delar eliminera bakgrunden.
- 3D-data är mycket intressanta att analysera eftersom de är överlägsna när det gäller förmåga till matchning mot ett målbibliotek och lämpar sig mycket väl för automatisk måligenkänning (ATR).
- Data från avståndssensorn ASC var av bättre kvalitet än de från Selex 3DLI Rig system.

- Laserprofileringssystemet gav goda signaler ut till maximala avstånd för båtar (6-7 km). Extrapolering med hjälp av SNR vid dessa avstånd indikerar räckvidder på 10 km eller mer.
- Jämförelse mellan simulering av pulsekon (avståndsprofiler) med hjälp av 3D-CAD modeller visar god överensstämmelse med mätningar.
- Olika upplösning för många sensorer försvårar att en ömsesidig jämförelse.

Några slutsatser från den databearbetning som utförts vid FOI:

- Analys av 1D-profileringsdata med hjälp av korrelation och toppdetektering gav lovande resultat vad gäller jämförelse mot simulerade pulsekon från ett målbibliotek baserad på CAD-modeller av båtarna.
- Vi har också noterat en viss robusthet mot båtrörelser, strålpekning och variation på antal strukturer på målet.
- Den information som erhålls i denna analys, d.v.s. uppmätta avstånd och amplitudkvoten mellan topparna, bör vägas in i den slutliga processen för måligenkänning.
- Förutom målklassificering, visade 1D-profileringen på goda möjligheter till måldetektering på långa avstånd och separation mellan mål- och terrängsignaler.
- Målupptäckt med hjälp av den optiska flödesmetoden upptäckt tillämpades med gott resultat på sekvenser av olika mål, på olika avstånd och under olika väderförhållanden.
- Mål som rör sig tvärs bilden upptäcks vanligen och en ganska snäv markeringsram runt målet kan uppskattas. Upptäckt och noggrann uppskattning av målets utsträckning ("bounding box") är något mer utmanande om målet är litet (i antal pixlar) och rör sig längs den optiska axeln eller om målet genererar vågor.
- Vi noterade att det optiska flödet gav robusthet mot turbulens och hägring så länge som dessas rörelse skilde sig från målets hastighet.
- En metod för registrering av brusiga 3D-data prövades. Resultaten tyder på att metoden var robust m.a.p mindre rörelser i målet på grund av turbulens och/eller hägringseffekter.
- Under dåliga väderförhållanden eller vid långa avstånd, där sidouplösningen är ett problem för 3D-bildsensorer, kommer en kombination av hög upplösande passiv avbildning och 1D-avståndsdata att förbättra möjligheterna till måligenkänning.
- Det är möjligt att utföra målupptäckt och följning över stora avstånd på grundval av passiva sensordata och/eller 1D-laserdata.

Några slutsatser från behandling av måligenkänning baserad på GV-bilder (IOSB):

- Den föreslagna metoden för måligenkänning och verifierades med goda resultat baserat på data från båtarna från Bråviken och vid jämförelse mot ett modellbibliotek med knappt 50 olika båttyper.
- Generellt gav även pose-estimering genom silhuett-matchning goda resultat.
- För fartygstyper med komplex struktur och utan förändringar i formen (inga personer på däck eller andra formändringar), är klassificeringen jämförbar med de resultat som erhålls i ett LIDAR-punktmoln. Klassificeringsprestanda skulle kunna förbättras för små båtar samt genom att lägga till tipp- och rollvinkel för målet under gång i högre sjö.

- Algoritmen ser ut att bli ett användbart verktyg för objektigenkänning i GV-bilder, dock bör ytterligare undersökningar göras på en större mängd fartygstyper i olika väderförhållanden och på längre avstånd.

3 Luftmål

Verksamhet har under 2015 påbörjats i syfte att utvärdera förmågan hos aktiva lasersystem att upptäcka och klassificera lågflygande luftmål. I detta kapitel sammanfattas de inledande mätningar som under året skett mot en missil-attrapp. Flera olika system har använts för att avbilda attrappen genom profilmätningar i djupled på samma sätt som tidigare utförts mot ytmål.

3.1 Mål använt vid proven

En attrapp för ett missillikande objekt framställdes i FOI verkstad av sandblästrad aluminiumplåt, se Figur 15. Attrappen har även modellerats i CAD för simuleringar av målets avståndsprofil.



Figur 15. Missilattrapp. Längd 3450 mm, diameter 300 mm vingspann 3000 mm. Avstånd från nos till främre vingar 1300 mm.

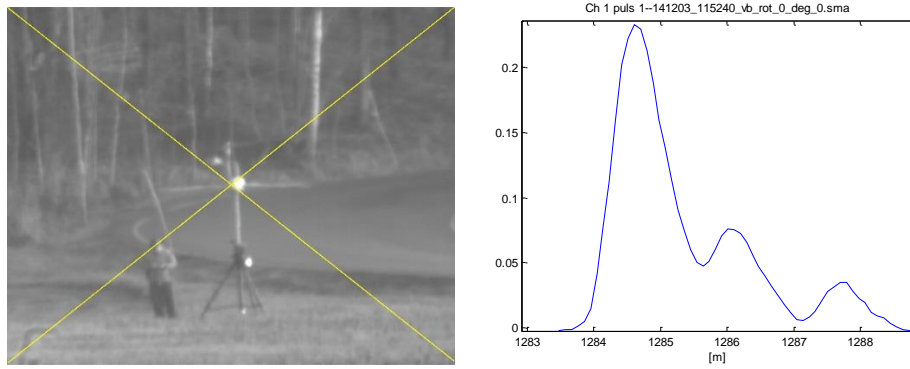
3.2 Resultat från 1D-profilering

Det profileringsystem som tidigare använts för prov mot ytmål har använts för att registrera målattrappens profil på samma sätt som i ytmålsfallet. Figur 16 visar ett exempel på erhållit avståndsprofil (pulseko) sett rakt framifrån längs missilattrappens längdaxel.

Avståndet mellan de två första topparna uppskattas från profilen till 1.35 m vilket stämmer väl med det uppmätta avståndet på 1.30 meter mellan fronten och vingarnas främre kanter. Avståndet mellan första och sista topp uppskattas på samma sätt till 3.20 m vilket stämmer väl med uppmätt avstånd mellan front- och stjärtfena som var 3.10 meter.

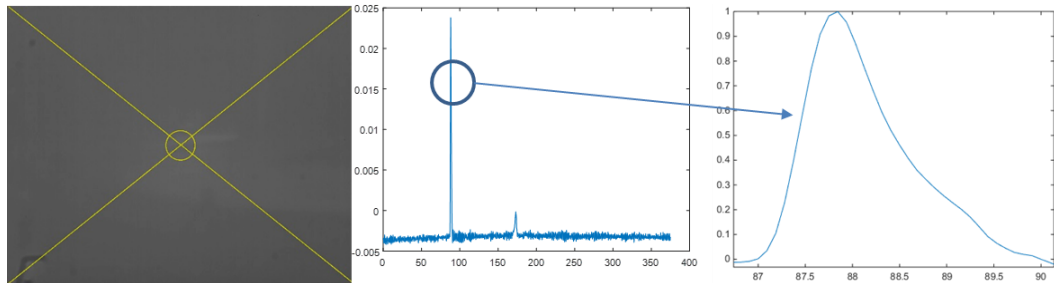
Vid tillfället dämpades mottagaren för att inte bli överstyrd. Om attrappen betraktas rakt framifrån kan den geometriska tvärsnittsarean uppskattas till 0.1 m². Med en ansatt reflektivitet mellan 0.1-0.5 så erhålls då en räckvidd mellan 5-10 km för en enkelpuls med SNR=7. Med en integrationstid på 2 sekunder (motsvarande 100 pulser) så bör räckvidden öka till 10-15 km under klart väder.

Mätningar genomfördes även i dimma. Dessa resulterade i tydliga målprofiler, trots att målet knappt var synligt med blotta ögat (Figur 17). Notera dock den långa integrations-tiden vid dessa mätningar som kan vara begränsande för snabba mål.

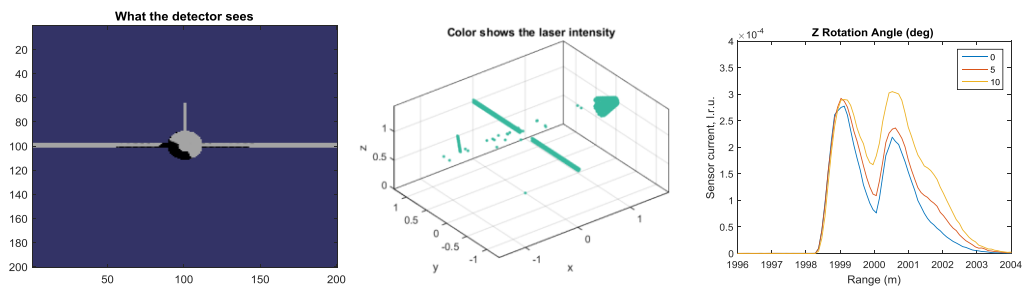


Figur 16. Foto och motsvarande pulseko från 1300 meters målavstånd för 0° infall (az/el). Avstånden mellan topparna stämmer väl (inom 5-10 cm) med uppmätta avstånd mellan front och vingar samt mellan front- och stjärtfena.

För att bedöma möjligheten till målklassificering baserad på 1D-, 2D- eller 3D-data vidareutvecklades den simuleringsmodell för laserradar som tidigare använts för att simulera pulsekon från båtarna i Bråviken-provet [7] till att även innefatta luftmål. Ekon från missil-atrappen simulerades med samma systemparametrar som tidigare använts för systemet och jämfördes med resultat från mätningar. Överensstämmelsen mellan simulering och mätningar är så här långt god och simuleringarna visar att det är huvudstrukturen hos atrappen som svarar bygger upp laserekot (Figur 18). Vidare analys kommer att innehålla korrelation mellan uppmätta och simulerade pulser för olika kombinationer av azimuth- och elevationsvinklar för att värdera möjligheten till automatisk måligenkänning.



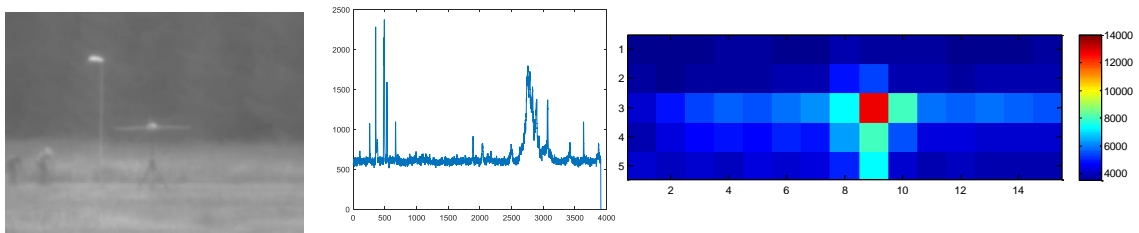
Figur 17. T.v. Missilatrapp på 1.3 km avstånd under dimma. T.h. Pulseko från missilatrappen medelvärdesbildad under ca 4 sekunder (200 pulser).



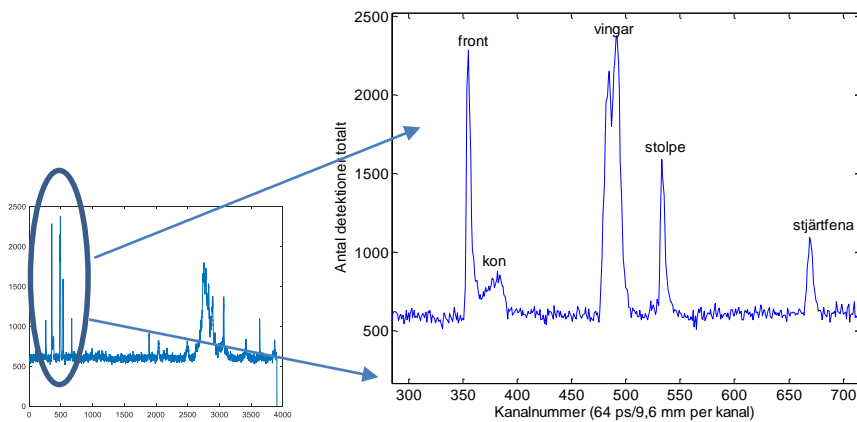
Figur 18. T.v. vad detektorn ser, mitten reflekterad laserintensitet, vi ser att de karakteristiska strukturerna dominerar svaret. T.h. Pulsekon (avståndsprofiler) för azimuthvinklarna 0,5 och 10°. Elevation=0°.

Lasern i profileringsystemet har en pulslängd på 6 ns (FWHM). Denna pulslängd kan översättas till en avståndsupplösning på 70-80 cm, vilket bekräftas av mätningarna. Detta är dock inte tillräckligt för att på ett robust sätt klassificera små mål som mindre UAV:er, kryssningsmissiler, o.s.v. Vi har därför utvecklat avståndsprofilering med fotonräkning, vilken har potential att uppnå avståndsupplösning och noggrannhet på mindre än en centimeter. Impulsresponsen för vårt fotonräkningssystem har uppmätts till ca 53 ps vilket motsvarar en avståndsupplösning på ca 7.5 mm [10].

Figur 19 visar resultat från det fotonräkande systemet mot attrappen på 1.3 km avstånd och skannermönstret färgkodat i reflekterad laserintensitet. Storleken på pixlarna var ca 15 cm i kvadrat. Eftersom vi hade en svag laser (20 mW) så integreras svaren under 5 sekunder/pixel. Laserns PRF var 4 MHz och pulslängd 25 ± 5 ps.



Figur 19. Mätning med fotonräkande system mot missilattrappen på 1.3 km avstånd. I mitten pulsekon (avståndsprofil) från mål och bakomliggande terräng (x-axel avståndsbinnar). T.h. erhållen intensitet för varje pixel (ca 15 cm i kvadrat) när det fotonräkande systemet skannades över målet.



Figur 20. T.v. summerat avståndseko från alla 3×15 pixlar över målet (missilattrappen). Pulserna längst bort från sensorn kommer från bakomliggande terräng medan de främre förstoras upp och visar avståndsstrukturen på målet med mycket hög precision. Vingarna ger två närliggande ekon eftersom målet inte var exakt vinkelrätt mot strålen.

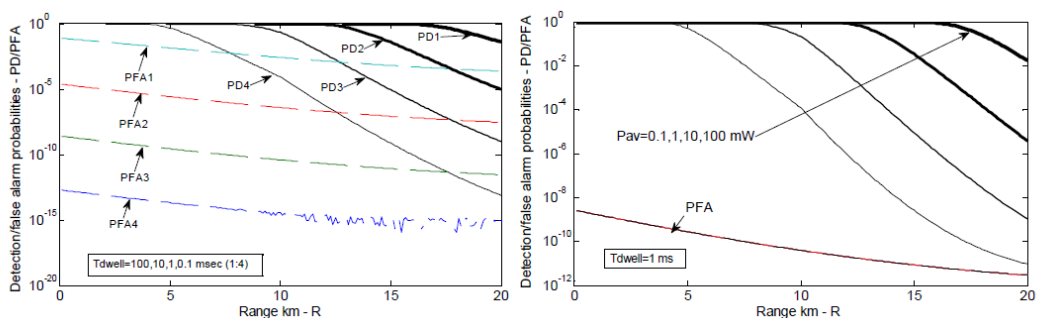
Figur 20 visar summerat pulssvar över hela skannerområdet (motsvarar en fiktiv stråldivergens på ca 1.7 mrad). Vi ser tydligt ekon från de olika strukturerna inklusive från den från konliknande fronten (ger en linjär amplitudförändring med tiden). Avstånden som kan härledas ur pulssvaret stämmer överens med de faktiska avstånden inom en differens på en centimeter.

3.3 Diskussion

Tekniken kring fotonräkning erbjuder flera viktiga fördelar jämfört med konventionell linjär (analog) detektion. "Shot noise"-begränsad detektion av enstaka fotonhändelser innebär detektion i genomsnitt av mindre än en foton per utsänd laserpuls. Denna höga känslighet kommer, för en given lasereffekt, ge ökade prestanda och maximal räckvidd för tillämpningsområden som avbildning, kartering, profilering m.m. Den höga känsligheten tillåter också lasersändare med lägre lasereffekt och hög pulsrepetitionsfrekvens vilket kan ge kompakta system och smygförmåga i förhållande till många "state-of-the-art" laser-vernare. Ny lasrar ger ultrakorta laserpulser, exempelvis fiberlaser baserade på "supercontinuum"-lasrar som möjliggör aktiv spektral avståndsmätning med mycket hög precision [11]. En annan tilltalande egenskap är att ett digitalt räknande system inte är dynamikbegränsat.

En avståndsupplösning i sub-cm klass ger delvis nya möjligheter till identifiering av olika objekt på avstånd. Till exempel kan även formen härledas t.ex. hos en robotdom, antenner eller en flygplansfront. Detta diskuteras t.ex. i ref. [12][13].

En fråga som inställer sig vid fotonräkning är minsta möjliga insamlingstid för att få god räckvidd. I ref. [13] har vi analyserat detta. I systemet som användes för mätningarna mot missilattrappen ovan var insamlingstiden lång (5 sekunder per pixel) för att uppnå ett gott signal till brusförhållande (pulsenergin endast var 5 nJ/puls). Om vi tillåter oss 0.5 μ J per puls och en lägre PRF (200 kHz) kan vi uppnå 10 km räckvidd mot ett 1 m² stort mål under en insamlingstid ("dwell time") på endast 1 ms. Figur 21 indikerar t.ex. att 15 km räckvidd är möjlig i klart väder (10 km sikt).



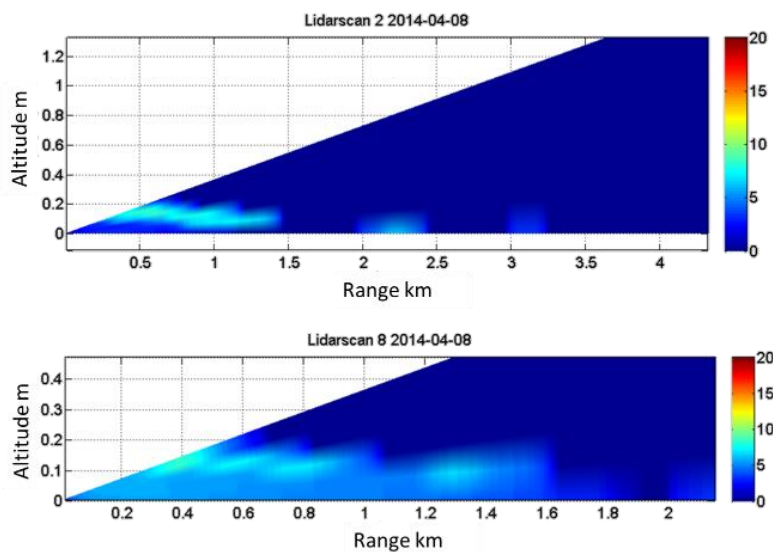
Figur 21. T.v. detektions- och falsklarmssannolikhet (P_D/P_{FA}) för ett lasersystem med 6 ps pulsbredd baserat på tidskorrelerad fotonräkning (TCSPC). Olika integrationstider ("dwell time") för detektion av ett 1 m² stort mål med reflektivitet 10 % indikeras. T.h. P_D/P_{FA} för 1 ms integrationsid. För 100 mW uteffekt hos lasern kan 15 km räckvidd uppnås under 10 km sikt.

Ett potentiellt problem med långa integrationstider (av storleksordningen millisekund eller mer) är icke-stationära mål under insamlingsintervallet kommer att röra sig mer än avståndet givet av upplösningen. Nyligen har vi utvecklat en metod [13] som kan korrigera för detta. Metoden baseras på autokorrelation av pulsekon så att man i efterhand kan rekonstruera den avståndsprofil som skulle motsvara ett stationärt mål. Ett antagande är att målet går någorlunda rätlinjigt under integrationstiden så att det momentana pulsekot behåller sitt utseende.

4 Laser för atmosfärssondering

Samma lasersystem som används för profilering och avbildning kan även utnyttjas för atmosfärssondering. FOI har på uppdrag av FMV studerat hur profilometern i lidarmod kan användas för att utvärdera atmosfärstransmission i sneda banor samt knyta denna information till prestanda för olika EO-system [14]. I detta kapitel sammanfattas kort resultat från denna verksamhet för att illustrera hur det aktiva lasersystemet kan användas för flera olika uppgifter.

Genom att studera bakåtspridningssignalen från aerosoler och dess avtagande med avstånd kan atmosfärsdämpning längs banan utvärderas (Figur 22).



Figur 22. Överst bakåtspridningsintensitet från ett lidarskan vid klart väder längs en horisontell bana med moln på ca 100 m höjd. Undre bild visar situationen då ett dissikt (horisontell sikt på 3.6 km) har utbildats under molnen.

4.1 Diskussion

Lasern i ett avbildande eller profilerande system kan även användas för transmissionsmätning av atmosfären och därigenom koppla denna till prestanda för optiska sensorsystem, både momentant och som sannolikhet över en viss tidsperiod. Mätningarna har relevans både för utvärdering av egna respektive för motståndarens sensorsystem. Exempel på en tillämpning är i bekämpningsfasen av luftmål som involverar optiskt riktade eller styrda vapen. Här ingår både detektion, måligenkänning samt slutfasstyrning hos ett vapen där information från lidar kan vara ett stöd före insats.

God kännedom om momentan transmission längs sneda banor, inklusive kännedom om täthet hos moln och olika molnskikt, har stor taktisk betydelse inte bara för egen insats utan även för att utröna möjligheterna för flygburen spaning, exempelvis från UAV, att se och bekämpa oss. Man brukar i sammanhanget tala om CFLOS ("Cloud-Free Line-of-Sight"). I ett pågående FMV-stött projekt används profilometern som lidar och kompletteras med information från en färgkamera, en SWIR-kamera (QWIP-IR på natten), med relativt smalt synfält som centrerats med lasern samt en omvärldskamera som tar bilder av hela himmelsfären. Sammantaget ger det kombinerade sensorerna möjlighet att skatta CFLOS.

5 Sammanfattande diskussion och slutsatser

5.1 Nuläge och utblick

Vid proven i Bråviken kunde laserprofilering ske ut till det maximalt tillgängliga avståndet, ca 6 km, med gott signalbrusförhållande. Vid en extrapolation kan dessa resultat förväntas gälla till 10-15 km under klart väder för enkelpulser. Vid pulsintegration och korrigering för båtrörelser under insamlingstiden (säg 10 sekunder 500 pulser) kan räckvidden i klart väder ökas ytterligare till 15-20 km. Synligheten över horisonten för små mål på havet är dock begränsat av geometri (via jordens krökning) till $R_{hor} = (2 \cdot R_{jord} \times H)^{1/2}$, vilket motsvarar 10 km för en sensorhöjd $H=11$ m. Sensorplattformen måste därför monteras på tillräcklig höjd över vattenytan för att utnyttja full potentiell räckvidd. Vid nedsatt sikt begränsas räckvidden till ett avstånd på ca $1.5 \times$ siktavståndet.

Erhållna resultat för klassificering med profileringsystemet är lovande, ett relevant modellbibliotek som genererat avståndsprofiler för jämförelse är dock en nödvändighet för framgångsrikt utnyttjande. Det skall dock sägas att den främsta fördelen med ett laserprofileringssystem är att kunna få förhandsinformation om målet när det inte är vinkelupplöst av en bildsensor. Då kan direkt man snäva ner sökrummet för möjliga mål. När sedan målet kommit närmare (< 3-5 km) kan bildinformationen från en passiv EO-sensor och profilerings-resultatet kombineras för att erhålla en robust automatisk igenkänning.

Den bästa klassificeringen kan förmodligen uppnås med en högupplöst laserbaserad 3D-sensor som ger full 3D-information om målet. Notera att målet fortfarande inte är vinkelupplöst över avstånd längre än 6-7 km för rimlig optisk storlek på teleskopet (1-2 meters fokallängd), så profilering fyller fortfarande en funktion.

Vårt analoga profileringsystem är i princip en vässad och kompletterad avståndsmätare som bygger på mogen teknik och industrialisering bör inte vara förenad med större överraskningar. Framtida profileringsystem med sub-cm upplösning kan baseras på fotonräkning. Denna teknik är nu i en demonstrations- och utvecklingsfas och har en TRL-nivå på 4-5. Det utvecklas även 3D-matrisdetektorer för fotonräkning och vissa av dessa har redan operativ användning i USA, främst för högupplöst landkartering. Man kan förutse att denna typ av detektorer även kommer att användas för att generera högupplösta 3D-bilder av olika mål.

En tillikauppgift för ett profilerande system är atmosfärssondering. God kännedom om momentan transmission längs sneda banor inklusive kännedom om täthet hos moln och olika molnskikt har stor taktisk betydelse för både egen spaning och insats liksom för att utröna hoträckvidder.

Profilering och aktiv avbildning av luftmål har stor relevans, dock kan målstorlekar och målavstånd här spänna över mycket större intervall. Våra resultat mot en missilattrapp är lovande, speciellt för ett fotonräknande system där högre upplösning ger goda möjligheter att klassificera/identifiera praktiskt taget alla typer av luftmål inklusive robotar och raketer.

5.2 Framtida arbete

I en nära framtid planeras fler prov mot ytmål med det kombinerade systemet (aktivt avbildande och profilerande), inkluderande ett vridbord som medger automatisk följning med hög noggrannhet. Härigenom kan bild- och avståndsinformation integreras över längre tider vilket förbättrar prestanda. Fler simultana registreringar och behandling av

data från flera sensorer (radar, IR, TV, laser) bör genomföras för jämföra prestanda och värdera datafusionsmöjligheterna.

Prov bör även ske mot luftmål, både statiska och rörliga. Detta innefattar såväl det analoga som det fotonräknande systemet. Vidare är inköp av en fotonräknande detektormatris med åtföljande provverksamhet önskvärd. Detta diskuteras även med FMV och i samverkan med Dstl i Storbritannien.

6 Tack till

Många personer har medverkat till att ta fram underlag för denna rapport. Ett speciellt tack till Per Jonsson för hjälp med fotonräknande mätningar, samt till Ove Gustafsson för stöd med lidar-data. Personal från FOI Sensorinformatik samt från Fraunhofer IOSB i Tyskland har medverkat med signalbehandling av data från Bråvikenmätningarna.

Arbetet har huvudfinansierats av Försvarsmakten inom FoT-projekten "Sensorer för fjärrspaning mot sjö- och luftmål" och "Avbildande lasersystem". Även stöd från FMV (via Åke Arbrink och Sten Edström FMV AL Led Sensor) har bidragit till delar av arbetet genom delfinansiering av mätningarna vid Bråviken (internationell medverkan) samt lidarmätningar.

7 Referenser

- [1] O. Steinvall, F. Berglund, L. Allard, M. Tulldahl, F. Gustafsson, "Försök med EO sensorer mot små sjö och luftmål under 2015", FOI-rapport under utgivning, dec. 2015.
- [2] R. Ragnarsson, O. Steinvall, F. Berglund, L. Allard, B. Larsson, A. Haglund, "Upptäckt av små sjösmål på ytan - slutrapport", FOI-R--4022--SE (2014).
- [3] O. Steinvall, F. Berglund, L. Allard, J. Öhgren, H. Larsson, E. Amselem, F. Gustafsson, "Marine tests at Bråviken 2014 - Passive and Active EO Sensing of Small Surface Vessels", FOI Rapport under utgivning, dec. 2015.
- [4] O. Steinvall, F. Berglund, L. Allard, J. Öhgren, H. Larsson, F. Gustafsson, E. Repasi, P. Lutzmann, B. Gohler, M. Hammer, K. McEwen, K.J. McEwan, "Passive and active EO Sensing of Small Surface Vessels", *Proc. of SPIE*, Vol. 9649, 96490I (2015).
- [5] C. Grönwall, D. K. J. Gustafsson, G. Tolt, O. Steinvall, "Experiences from long-range passive and active imaging", *Proc. of SPIE*, Vol. 9649, 96490J (2015).
- [6] O. Steinvall, E. Amselem, C. Grönwall, H. Larsson, G. Tolt, "Test plan for Selex 3DLI Rig", FOI-D-0636—SE (2014).
- [7] O. Steinvall, T. Chevalier, C. Grönwall, "Simulation and modeling of laser range profiling and imaging of small surface vessels", *Opt. Eng.*, Vol. 53(1), 013109 (2014).
- [8] H. Larsson, O. Steinvall, T. Chevalier, F. Gustafsson, "Characterizing Laser Radar Snow Reflection for the Wavelengths 0.9 and 1.5 μm ", *Opt. Eng.*, Vol. 45(11), 116201 (2006).
- [9] M. Hammer, M. Hebel, M. Arens, "Maritime Target Identification in Gated Viewing Imagery", *Proc. of SPIE*, Vol. 9649, 96490K (2015).
- [10] O. Steinvall, L. J. Sjöqvist, M. Henriksson, "Photon Counting Ladar Work at FOI, Sweden", *Proc. of SPIE*, Vol. 8375, 83750C (2012).
- [11] R.A. Lamb, "A Review of Ultra-Short Pulse Lasers for Military Remote Sensing and Range Finding", *Proc. of SPIE*, Vol. 7483, 748308-1-15 (2009).
- [12] O. Steinvall, "Effects of Target Shape and Reflection on Laser Radar Cross Sections", *Appl. Opt.*, Vol. 39 (24), 4381-4391 (2000).
- [13] O. Steinvall, L. Sjöqvist, M. Henriksson, P. Jonsson, "High Resolution Ladar Using Time-correlated Single-photon Counting", *Proc. of SPIE*, Vol. 6950, 695002 (2008).
- [14] O. Steinvall, R. Persson, F. Berglund, O. Gustafsson, J. Öhgren, F. Gustafsson, "Using an Eye-safe Laser Rangefinder to Assist Active and Passive Electro-optical Sensor Performance Prediction in Low Visibility Conditions", *Opt. Eng.*, Vol. 54(7), 074103 (2015).

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