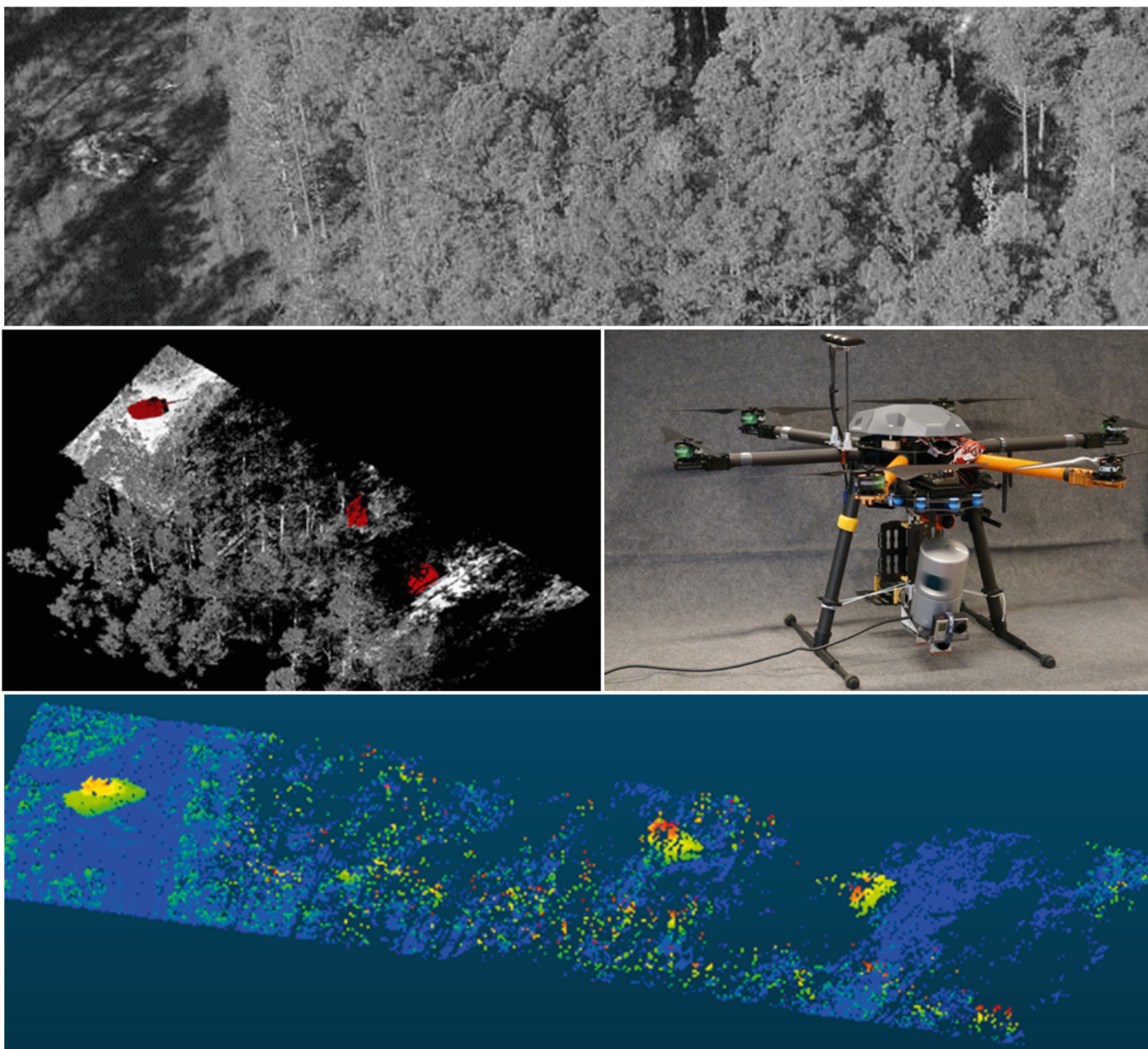


MARKUS HENRIKSSON, ELIAS AMSELEM, HÅKAN LARSSON



Markus Henriksson, Elias Amselem, Håkan
Larsson

Lasersensorkoncept för UAV

En marknadsgenomgång av befintliga och framtida koncept

Titel	Lasersensorkoncept för UAV
Title	Laser based sensor concepts for UAV
Rapportnr/Report no	FOI-R--3904--SE
Månad/Month	juni
Utgivningsår/Year	2014
Antal sidor/Pages	36 p
ISSN	1650-1942
Kund/Customer	FM
Forskningsområde	7. Sensorer och signaturanpassning
FoT-område	Sensorer och signaturanpassning
Projektnr/Project no	E54533
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

Två teknikområden som utvecklats kraftigt under senare år är obemannade luftfarkoster (UAV, "Unmanned Aerial Vehicle") och lasersensorer för 3D-avbildning (ladar, "Laser detection and ranging"). Det faller sig ganska naturligt att kombinera dem med en UAV som sensorplattform för en ladar. Den här rapporten innehåller en genomgång av olika ladarprinciper som skulle kunna användas för luft-till-marktillämpningar.

Två lovande koncept har identifierats. En UAV av samma storleksklass som Örnen skulle kunna utrustas med en ladar för storskalig spaning, underrättelseinhämtning och kartering. Här finns två möjliga sensortyper, antingen en nerskalning av de skannande ladarsystem som idag används för kartering från bemannade plattformar, eller ett system som bygger på fotonräknande matrisdetektorer, en teknik som idag används av USA för till exempel kartering av Afghanistan från större plattformar. Det andra lovande konceptet är att på en multirotor-UAV montera en roterande laserskanner med flera laserlinjer. Dessa sensorer har räckvidder på 20-100 m och kan ge en snabb lägesbild eller dokumentera en situation.

För avbildning begränsas upplösningen i sidled av att fokallängden på optiken är begränsad på en UAV, samtidigt som matrisdetektorer för 3D har stora pixlar. I några fall kan det därför för hotidentifiering vara mer intressant med aktiv laserbelyst avbildning i 2D, där pixlarna kan göras mindre och igenkänning därför kan vara lättare.

Nyckelord: 3D, Ladar, Lasersensorer, UAV

Summary

Two areas of technology that have seen rapid developments during the last years are unmanned aerial vehicles (UAV) and laser sensors for 3D imaging or ladar (laser detection and ranging). It is natural to combine these technologies by using an UAV as a sensor platform for a ladar. This report contains an overview of different ladar technologies that could be used in air-to-ground applications.

Two promising concepts have been identified. An UAV of size similar to AAI Shadow 200, designated "Örnen" in Sweden, could be equipped with a ladar system for large scale reconnaissance, information gathering and mapping. Two possible sensor types are a downscaled version of the scanning ladar systems used for mapping from manned platforms today, or the use of systems based on photon counting array detectors, a technology already in use by the US military e.g. for mapping of Afghanistan from larger platforms. The second promising concept is to mount a rotating multiline scanning ladar on a multi-rotor UAV. These sensors have ranges of 20-100 m and could provide a rapid situational awareness or record an incident.

For imaging the lateral resolution is limited by the limited focal length of collection optics that is possible on an UAV and the large pixels on 3D sensor arrays. In some cases threat identification may thus be better served by 2D laser illuminated active imaging, where sensor pixels can be smaller and identification thus easier.

Keywords: 3D imaging, Ladar, Laser sensors, UAV

Innehållsförteckning

1	Inledning	7
2	Viktiga funktionsparametrar	8
2.1	Upplösningsmått	8
2.2	Datakvalitetsmått.....	8
2.3	Mättningsmått.....	9
2.4	Formfaktorer.....	9
2.5	Krav på kringutrustning	9
3	Ladarprinciper och systemexempel	10
3.1	Skannade ladar	10
3.1.1	Laserskanning från bemannade flygplan och helikoptrar	11
3.1.2	Laserskanning från obemannade farkoster	13
3.2	Indirekt ToF-kamera.....	14
3.2.1	Amplitudmodulation	14
3.2.2	Fotonräknande indirekt ToF.....	15
3.2.3	Pulsad indirekt ToF.....	16
3.3	Direkt ToF-kamera	19
3.3.1	Samplande linjär ToF	19
3.3.2	Fotonräknande direkt ToF.....	20
4	UAV-plattformar	23
5	Prestandavärdering för tillämpningar	26
5.1	Önskvärd sensorprestanda i olika tillämpningar	26
5.1.1	Spaning	27
5.1.2	Skydd av konvoj	27
5.1.3	Upptäckt av IED	27
5.1.4	Spaning på gruppnivå	28
5.1.5	Dokumentation av incidenter	28
5.2	Jämförelse av ladarprinciper	29
6	Slutsatser och rekommendationer	32
7	Referenser	34

1 Inledning

Vid militära operationer är det viktigt att ha kontroll på omgivningen för att kunna bestämma framryckningsvägar och upptäcka hot. Informationsinhämtning i okända miljöer är ett av de farligaste momenten för marktrupper. Utvecklingen inom UAV:er ger nya möjligheter till att sända fram sensorer för spaning före och i samband med insats. En kamera med bild som länkas till operatör kan ge viss information, men i en tvådimensionell bild kan det vara svårt att uppfatta hot som är dolda i vegetation eller placerade i djup skugga, att särskilja objekt från en bakgrund med liknande färg eller att avgöra hur svårpasserbart ett hinder är. Tredimensionell data mätt med ett ladarsystem ("Laser Detection and Ranging") ger avsevärt större möjligheter till detta eftersom laserstrålen penetrerar även små hål i vegetation och separerar ytor på olika avstånd.

UAV:er finns i olika storlekar för olika tillämpningar, från små system som kan bäras i en ryggsäck och som flyger upp till några hundra meter före en framryckande grupp till stora farkoster som flyger på hög höjd under lång tid. Vi kommer framförallt studera system lämpliga för små och medelstora UAV:er, med begränsning av vikt för fullständiga ladarsystem på i storleksordningen 50 kg. Exempel ges även på tyngre system om vi tror att tekniken kan krympas.

Rapporten behandlar främst aktiva ladarsystem, men plattformarna kan givetvis samtidigt även ha passiva optiska sensorer och kanske till exempel akustiska sensorer för skottlokalisering eller antenner för radiopejlsystem om lastkapaciteten räcker till. För spaning efter eller identifiering av omedelbara hot med en liten UAV för användning på gruppnivå eller en något större UAV för spaning runt en konvoj förutsätts att datalänkar överför mätdata till operatör i realtid. Detta kan vara till exempel en optisk länk eller en kortsträckt radiolänk. Dessutom förutsätts att plattformen har navigationsutrustning i form av GPS och IMU ("Inertial Measurement Unit"). Eventuellt kan positioneringen stödjas av data från ladarsystemet eller andra optiska sensorer genom ett SLAM-system ("Simultaneous Localisation and Mapping") och då sänka kravet på IMU:n som annars driver vikt och kostnad. Inga detaljer om dessa system diskuteras men kvalitativa prestandakrav ges, särskilt i den mån kraven skiljer sig mellan olika möjliga sensorkoncept.

I rapporten diskuteras olika möjliga sensorkoncept baserat på känd prestanda för kommersiella ladarsystem och förväntad prestanda efter produktifiering av system publicerade i vetenskapliga artiklar. Förutom ren sensorprestanda beaktas SWaP ("Size, Weight and Power"), då detta är en mycket viktig parameter för mindre flygande plattformar. Detaljerade resonemang och beräkningar som använts för att dra slutsatser har till stor del utelämnats för att hålla rapporten kompakt. Rapporten behandlar inte den signalbehandling som krävs för att gå från sensordata till en 3D-modell som kan användas i den operativa miljön utan bara frågor som rör sensorhårdvaran. Signalbehandlingsfrågor kommer att studeras i en senare fas av projektet. Frågan om hur data ska presenteras för en operatör har inte heller behandlats. I många fall ska antagligen 3D-data aldrig visas, utan avståndsinformationen används för att segmentera fram ett objekt som sedan visas i form av en 2D-bild. Arbetet med denna rapport är utfört i projektet Avbildande lasersensorer inom FoT Sensorer och Signaturanpassning.

2 Viktiga funktionsparametrar

Alla laserradarsystem ger inte samma kvalitet på data. För att jämföra olika system måste prestandamått definieras. I det här avsnittet definieras termer som används vid jämförelsen av prestanda för olika system. Värden kommer inte anges på alla mått, utan en del är medtagna i det här avsnittet mer för att ge en fullständig beskrivning. Olika upplösningmått, ibland med motstridiga definitioner, är vanliga i datablad och vetenskaplig litteratur och vi har därför bedömt det som viktigt att definiera flera begrepp som ligger ganska nära varandra.

2.1 Upplösningmått

Det finns många olika värden som kan anges för upplösning i avstånd och sida, ofta används begreppen på olika sätt i olika texter och ibland är de motstridiga. Vi har valt att använda följande begrepp i denna rapport.

- **Avståndsprecision.** Den kvantisering som används vid utskrivning av avståndsvärden, alltså stegen för klockan som används för att mäta tid.
- **Avståndsnoggrannhet.** Standardavvikelse för mätfel vid många mätningar mot samma yta. Innehåller endast fel från ladarsensorn och mäts för stillastående sensor mot statisk scen.
- **Avståndsupplösning.** Det minsta avstånd mellan två ytor inom synfältet för samma mätning som krävs för att ytorna ska kunna skiljas åt. För en matrisdetektor innebär detta olika ytor inom synfältet för en pixel.
- **Punktseparation.** Avståndet i sidled mellan uppmätta punkter. Kan anges som vinkel eller som avstånd mellan två punkter på ett definierat avstånd. Anges ofta istället som antal punkter per kvadratmeter på en definierad flyghöjd när punkterna inte är fördelade enligt ett rutnönster.
- **Lateral upplösning.** Den minsta utbredning på ett objekt som kan mätas utifrån data, det vill säga hur stort ett punktformat objekt ser ut att vara.
- **Positionsnoggrannhet.** Standardavvikelse för positionsfel när datapunkter har georefererats. Detta ger ett mått på felet mellan två mätningar mot samma punkt från olika sensorpositioner.
- **Dynamik.** Hur stor skillnad i styrka det är mellan minsta mätbara signal och den signal som mättar detektorn.

Avståndsnoggrannheten kan ofta vara en faktor tio eller mer bättre än avståndsupplösningen. I sidled behöver det inte vara alls lika stor skillnad, utan den laterala upplösningen kan vara väldigt nära punktseparationen. För skannande system och matrisdetektorer med överlappande mätningar kan upplösningen vara mycket grövre än punktseparationen. I princip kan upplösningen framförallt för skannande system även vara finare än punktseparationen och då kan objekt helt missas.

2.2 Datakvalitetsmått

Under den här rubriken samlar vi några mått som är svårare att definiera matematiskt.

- **Multiplvarsförmåga.** Hur ett system hanterar reflexer från ytor på multipla avstånd inom detektorsynfältet. Vanliga svar är att hantera alla reflexer med en definierad upplösning, att ta första ytan eller att ge ett medelvärde av avstånden.
- **Bildalstringsförmåga.** Hur väl ett system kan styras till att mäta mot ett mindre rektangulärt område och ge videosekvenser över den scenen.

2.3 Mätningssmåt

- **Räckvidd.** På hur långt avstånd kan systemet användas.
- **Mätningar per sekund.** Antal pixlar i sensorn multiplicerat med pulsrepetitionsfrekvensen.
- **Punkter per sekund.** Antalet punkter som mäts per sekund. Här menas punkter i planet, men med multipelsvarsförmåga kan flera objekt på olika höjder mätas i samma punkt.
- **Yttäckning.** Beräknas som antalet mätta punkter per sekund dividerat med antalet punkter per kvadratmeter.

Antalet punkter är samma som antalet mätningar för en linjär detektor med multipelsvarsförmåga, men mindre än antalet mätningar för ett fotonräknande system där flera mätningar mot samma punkt måste läggas samman för att särskilja riktiga ytor från brus.

2.4 Formfaktorer

- **Volym.** Systemets volym, för större system uppdelat på optikdel och stödfunktioner som kan placeras separat.
- **Vikt.** Systemets vikt, för större system uppdelat på optikdel och stödfunktioner som kan placeras separat.
- **Effektförbrukning.** Systemets effektförbrukning.

På engelska dras dessa faktorer ofta samman till akronymen SWaP ("Size, Weight and Power"). För många system kan laser och detektor utgöra en ganska liten del av systemet, även om insamlingsoptiken räknas med. Skanner eller annan inriktningsenhet ger betydande krav, liksom positioneringsutrustning och datalagring.

2.5 Krav på kringutrustning

- **Rå datamängd.** Antalet databitar per sekund som systemet genererar. Här inkluderas endast data från lasersensorn.
- **Slutlig datamängd.** Den datamängd som ska sparas eller länkas ner till operatör. Här inkluderas både bearbetad laserdata och nödvändig data från positioneringssystem.
- **Beräkningskrav.** Uppskattning av kraven på beräkningskapacitet för att gå från sensordata till 3D-modell.
- **Positioneringskrav.** Uppskattning av kraven på positionering av plattformen i sex dimensioner.

Generellt är positionerings- och beräkningskraven större ju fler laserpulser som används för att generera 3D-scenen. Matrisdetektorer ställer därmed lägre krav än skannande system, och system som mäter hela scenen med en laserpuls ställer lägre krav än system som använder många pulser. Den slutliga datamängden påverkas av hur kraftfullt systemet är, där ett system med bättre upplösning genererar mer data. En annan viktig faktor för datamängden är hur mycket bearbetning som sker i direkt anslutning till sensorn och hur mycket som görs efter att data länkats till en markstation eller off-line.

3 Ladarprinciper och systemexempel

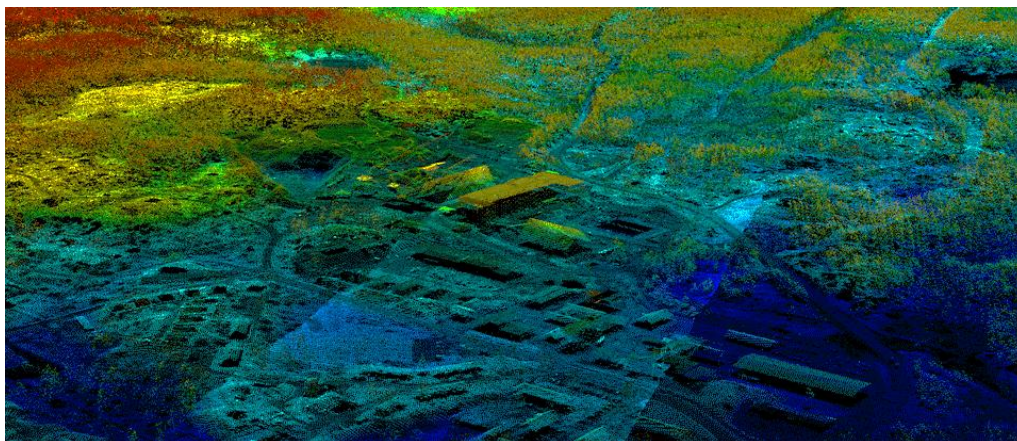
Det finns i grunden två principer för optisk avståndsmätning, triangulering och mätning av tiden det tar för optisk strålning att gå fram och tillbaka mellan sensor och mål, på engelska kallat "Time-of-Flight" (ToF). System baserade på triangulering med aktiv belysning är inte lämpade för större avstånd eftersom avståndet mellan laser och sensor då måste bli mycket stort och behandlas därför inte här. En beskrivning av trianguleringsbaserade system finns i [1]. Stereokameror som traditionellt använts inom kartering [2] och strukturerat ljus som är en populär teknik i industriella tillämpningar [3] är specialfall av triangulering. Pulsade ToF system är bättre lämpade på längre avstånd och är därför fokus för den här rapporten. Eftersom ljushastigheten är konstant kan avståndet beräknas enligt $R = cT/2$, där c är ljushastigheten, T är tiden från att laserstrålen skickas iväg tills den kommer tillbaka och tvåan orsakas av att ljuset går sträckan fram och tillbaka. Även denna enkla princip går att utföra på flera sätt och några av de mest intressanta presenteras kort nedan. Mer uttömmande genomgångar finns i till exempel [4–6]. Vi utesluter koherenta tekniker och system baserade på syntetisk apertur-teknik [7], då dessa även om de kan ha mycket hög prestanda inte bedöms vara kompatibla med de plattformsstorlekar vi diskuterar. Vi utesluter även direktdetekterande frekvensmodulerade system för ToF-avståndsmätning då de ställer högre krav på elektroniken, även om det har funnits exempel på bildalstrande system även med den tekniken [8].

Vi diskuterar inte system för stora plattformar på hög höjd för kontinuerlig övervakning av ett område och system för storskalig kartering av en region eftersom dessa typer av insatser i nuläget inte verkar realistiska för Försvarsmakten. För storskalig kartering finns kommersiella system av den typ som lantmäteriet använder för att ta fram en ny nationell höjdmodell, men även amerikanska militära system. Vi behandlar inte heller system för placering i en spaningskapsel på Gripen eftersom detta är en tillämpning med till stor del andra systemkrav.

En konkurrerande teknik som traditionellt använts mycket inom kartering är stereokamerafotografering. Då detta är en teknik som inte använder aktiv belysning med laser så ligger den utanför rapportens fokus. Generellt kan sägas att stereokamerateknik har svårt att upptäcka objekt dolda under trädkronor och andra skylande föremål, och därför är dåliga i tillämpningen att upptäcka hot. Dessutom fungerar stereoskopisk avbildning inte mot alla ytor, till exempel snö, samt är känsligare för dimma än ett ladarsystem är.

3.1 Skannade ladar

Ett skannande 3D-ladarsystem är i princip en avståndsmätare med mycket smalt synfält som riktas i olika riktningar med speglar eller prismor för att generera en 3D-bild. Det absolut vanligaste är att avståndsmätningen görs med en pulsad laser och en fotodiodbaserad mottagare. Tidiga system kunde, som de flesta avståndsmätare, bara mäta avståndet till den första ytan laserpulsen träffade, medan moderna system mäter hela pulsformen på det reflekterade ljuset och kan därmed mäta avstånden till flera ytor inom laserloben. Skannande laserradar är kommersiellt tillgänglig och används i en lång rad tillämpningar, mest notabelt för kartering. Till exempel har Lantmäteriet ett projekt där hela Sverige mäts med flygande skannande laserradar för att ta fram en ny nationell höjdmodell [2].



Figur 1. Från den nationella höjdmodellen (Bild Lantmäteriet).

3.1.1 Laserskanning från bemannade flygplan och helikoptrar

Moderna kommersiella laserskannersystem för kartering kan mäta flera hundratusen punkter per sekund med utläsning av full vågform i varje puls. Med anpassad flyghöjd och skanningstäthet kan den transversella upplösningen väljas ganska fritt. I allmänhet är tätheten tiotalet punkter per kvadratmeter på några hundra meters flyghöjd och förtäts naturligt med lägre flyghöjd. Tabell 1 visar hur punkttätheten ökar och punktstorlek minskar med minskad flyghöjd. Upplösningen i avstånd sätts av laserpulsens längd och är generellt i storleksordningen 0.5-1 m (ca 2-3 ns), men noggrannheten kan vara på centimeternivå. En nackdel med skannande laserradarsystem är att kraven på bestämning av position, rörelse och pekriktning är mycket höga. Felen i bestämning av position, rörelse och riktning påverkar ofta kvaliteten på den slutliga 3D-modellen mer än prestanda för själva lasersensorn [2]. Position, rörelse och riktning mäts med GPS och tröghetsnavigering av mycket hög kvalitet. Räckvidden för ett skannande ladar-system sätts till största delen av pulsenergin på lasern och eftersom lasrar ofta är begränsade av medeleffekt så finns en viss koppling mellan räckvidd och antalet pulser per sekund. En översikt över kommersiella system för skannande flygburen ladar finns i [9].

Tabell 1. Fotavtryck och punkttäthet för några olika flyghöjder (exempel från AHAB DragonEye 400). Fotavtrycket är diametern på den yta som bidrar till en mätning och därmed ett ungefärligt mått på den laterala upplösningen. DragonEye 400 undersamlar alltså markytan eftersom storleken på ytorna som bidrar till varje mätning är mindre än avståndet mellan dem. Punkttätheten är baserad på en marschfart av ca 140 km/h.

Flyghöjd [m]	Fotavtryck [m]	Punkttäthet [Pkt/m ²]
100	0.05	92
200	0.10	46
300	0.15	30
400	0.20	23
700	0.35	13

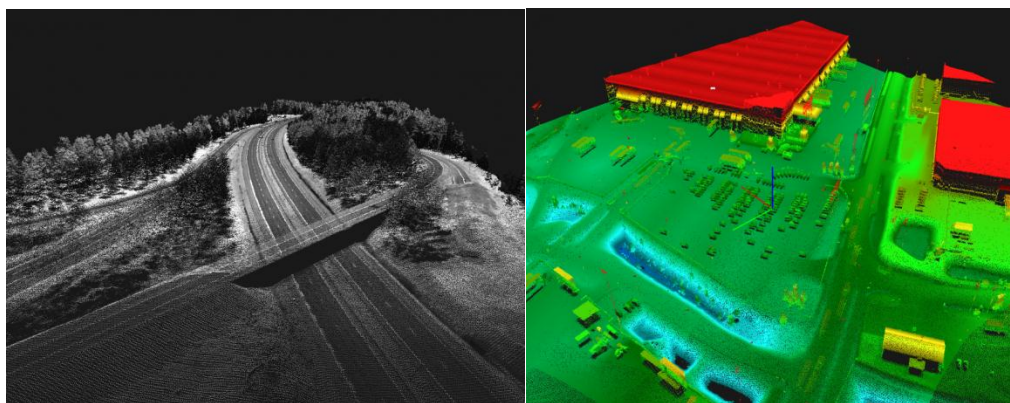
Idag finns det flera flygande skannande lasersensorsystem för bemannade flygfarkoster tillgängliga på den kommersiella marknaden. De största tillverkarna globalt av bemannad

flygburen laserskanning är kanadensiska Optech¹ och österrikiska Riegl². Andra aktörer är svenska Airborne Hydrography AB³ (AHAB), nederländska Fugro⁴ och tyska Leica⁵. Dessa företag erbjuder en rad olika skannande lasersensorsystem för olika tillämpningar såsom avbildning från hög höjd, urbana scenarier, kustlinjer, snö och is, vegetation, undervattensavbildning etc. Olika tillämpningar har olika krav på sensorsystemet avseende laservåglängd, avståndsnoggrannhet och -precision, lateral upplösning, m.m. I allmänhet är systemen för bemannad flygburen laserskanning stora och tunga och kräver en operatör för att samla in data. Systemen för bemannad laserskanning har på senare år krympt kraftigt i volym och minskat i vikt och några få är så pass små att de skulle kunna integreras i större obemannade farkoster. I underliggande kapitel sammanfattas AHAB:s och Optechs för närvarande bäst lämpade modeller för laserskanning över mark, med baktanke att de skulle kunna integreras i obemannade farkoster baserat på vikt och volym.

DragonEye 400⁶ är ett skannande lasersensorsystem som tillverkas av AHAB. Sensorsystemet använder sig av en roterande insamlingsmetod, se Figur 2, vilket gör att samma område mäts flera gånger från olika riktningar. Avståndsnoggrannheten är 2 cm medan positionsnoggrannheten är 20 cm vid 400 m flyghöjd. Vikten är ca 25 kg.



Figur 2. DragonEye 400 är ett litet och kompakt skannande lasersensorsystem som använder sig av en roterande insamlingsmetod.



Figur 3. AHAB DragonEye 400, punktmoln från motorväg och scen från stadsmiljö (Bilder AHAB)

¹ <http://www.optech.com/index.php/products/airborne-survey/>

² <http://www.riegl.com/nc/products/airborne-scanning/>

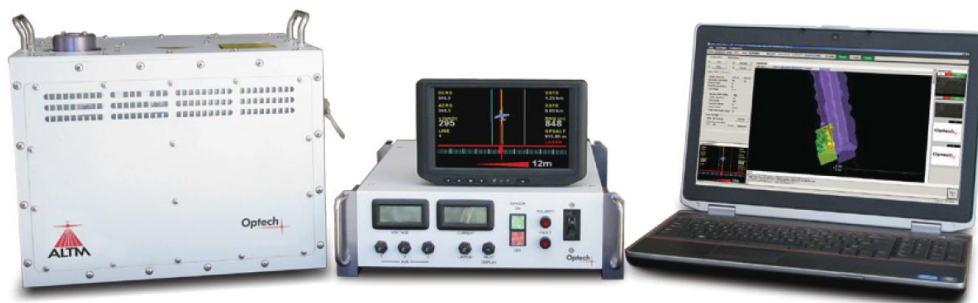
³ <http://www.airbornehydro.com/>

⁴ <http://www.fli-map.nl/>

⁵ http://www.leica-geosystems.com/en/Airborne-LIDAR_86814.htm

⁶ <http://www.airbornehydro.com/dragoneye>

Det skannade lasersensorsystemet Optech Orion C300⁷ mäter avstånd med en noggrannhet bättre än 5 mm, medan positionsnoggrannheten är drygt 13 cm på 400 m flyghöjd. Vikten är totalt ca 35 kg. Volymen är $3.4 \times 3.4 \times 2.5 \text{ dm}^3$.



Figur 4. Optech Orion är förhållandevis litet och kompakt jämfört med många andra laserskannersystem för kartering.

3.1.2 Laserskanning från obemannade farkoster

På små UAV-plattformar, så kallade mini-UAV av typ multirotor, är formfaktorerna vikt och volym på sensorn starkt begränsande. Vidare reducerar ett stort effektuttag från sensorn flygtiden, eftersom multirotorer oftast drivs elektriskt. Civil flygning med obemannade luftfarkoster är i Sverige klassindelad i olika kategorier efter vikt och motoreffekt (mer om detta i kapitel 4). På små plattformar är lasereffekten, och därmed räckvidden begränsad. Dessutom är möjligheten att använda ett navigeringssystem med hög kvalitet begränsade. Därför minskar möjligheterna att skapa modeller över stora ytor, även om kvaliteten på 3D-vyn från den momentana positionen kan vara bra.

Velodyne HDL-32E⁸ (Figur 5) är den första skannande lasersensorn som ligger inom rimliga formfaktorer för att kunna integreras i en luftfarkost i kategori 1B (totalvikt 7 kg). Velodyne väger endast 1.3 kg och är ca 1.5 dm^3 . Sensorn består av 32 parallella lasrar förskjutna ca 1.33° vertikalt så att de täcker in ett vertikalt synfält på drygt 40° ($+10$ till -30). Varje laser jobbar i par med en detektor, alltså består sensorn av 32 singeldetektorer. Sensorhuvudet roterar flera hundra varv per minut och lasern avlossas flera hundra tusen gånger per sekund. Den horisontella laterala upplösningen är i bästa fall 0.08° (1.4 mrad) vilket motsvarar 14 cm punktseparation på 100 m avstånd (per laser). Eftersom skannern roterar samtidigt som den rör sig i en flygande plattform kommer punkttätheten vertikalt bero på flygfarkostens hastighet framåt, ju långsammare fart desto tätare kommer punktmolnet att upplevas. Avståndsnoggrannheten är enligt specifikationen bättre än 2 cm på 25 meters mätavstånd. Sensorn klarar inte av att registrera multipla ekon, dvs flera ekon inom samma laserlob, men registrerar det starkaste ekot. Sannolikheten att penetrera vegetation ökar med denna metod.

FMV finansierar ett FOI-projekt under 2014 där Velodyne HDL-32E integreras i en multirotor. I skrivande stund (maj 2014) har vi inte verifierat Velodyne-sensors prestanda. Mätavståndet är enligt manualen 70 m, men detta kräver hög reflektans på de ytor laserstrålen träffar. Sensorn tillas för att erhålla en större marktäckning. Vi räknar med att kunna hålla en flyghöjd upp till knappt 30 m för att erhålla svar från samtliga lasrar. Skannerdata länkas till marken och kommer att presenteras rotation för rotation.

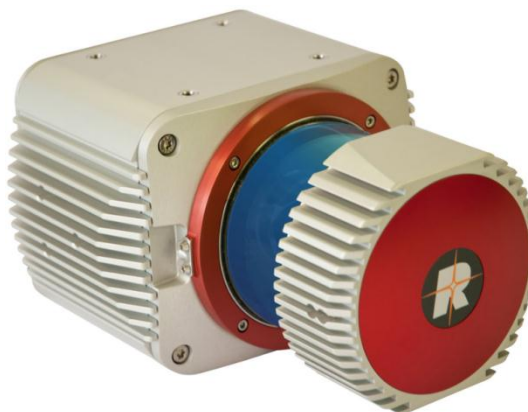
⁷ <http://www.optech.com/wp-content/uploads/ORION-C-Specsheet-140318-WEB.pdf>

⁸ <http://velodynelidar.com/lidar/hdlproducts/hdl32e.aspx>



Figur 5. Laserskannern Velodyne HDL-32E väger endast 1.3 kg, är ca 1.5 dm³ stor och skjuter 700.000 laserskott per sekund. Vänster bild visar skannern monterad i en hexakopter. Skannern roterar horisontellt runt sin egen axel (höger bild, blå pil) med mellan 300 och 1200 varv per minut. Synfältet är drygt 40° (+10 till -30). (Vänster bild FOI, höger bild Velodyne)

Under hösten 2014 kommer Riegl att starta försäljning av laserskannern Riegl VUX-1. Preliminärt datablad finns på internet⁹. VUX-1 kommer att väga ca 3.6 kg och kommer att kunna bäras av flygfarkoster i kategori 2, nyttolast 5 kg. Storleken är ca 2×2×1 dm³. VUX-1 samlar in multipla ekan, vilket är en optimal metod för att penetrera vegetation ner till marknivå. Sensorn kommer att kunna kringgå "Multiple-Time-Around" (MTA), vilket innebär att flera laserpulser kommer att vara ute i luften samtidigt, genom att använda ett särskilt modulationsschema. Databladet anger avståndsnoggrannheten 10 mm och avståndsprecisionen 5 mm. Riegl VUX-1 är förberedd att kunna integreras med en IMU.



Figur 6. Laserskanner Riegl VUX-1 väger 3.6 kg och är ca 4 dm³ i volym. Skannern består av flera lasrar och detektorer i par. Skanningen sker genom att sensordelen roterar runt sin egen axel.

3.2 Indirekt ToF-kamera

I en indirekt ToF-kamera beräknas avståndet i varje pixel i en kamerabild med hjälp av flera intensitetsbilder. Det finns några olika metoder för att koppla avstånd till intensitet.

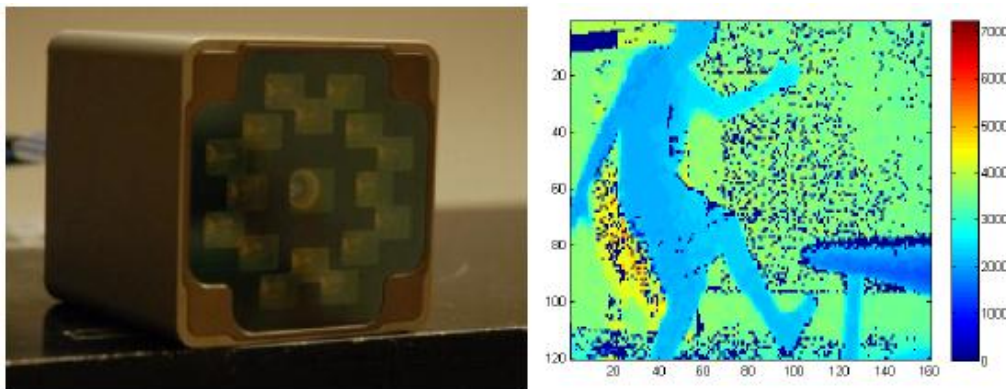
3.2.1 Amplitudmodulation

En metod för avståndsbestämning som har ökat i popularitet på grund av möjligheten till snabba bildhastigheter och låga SWaP parametrar är indirekt ToF med kontinuerligt amplitudmodulerat ljus. Principen baserar sig på att variera intensiteten av det utsända

⁹ http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/DataSheet_VUX-1_26-05-2014_PRELIMINARY_4pages.pdf

ljuset med en viss period. Oftast används en sinusmodulation men andra modulationsmönster kan användas. Genom att utföra fyra mätningar spridda på lika avstånd i moduleringsperioden kan modulationsamplituden, fasen och medelintensiteten bestämmas. Fasparametern möjliggör bestämningen av avståndet till objektet i scenen. De andra två parametrarna används dels för att återge ljusintensiteten och dels för att beräkna ett kvalitetsmått på signalen.

En begränsning med tekniken är att avståndsmätningen kan nå högst en period av modulationen. Oftast används modulationsfrekvenser på 3 till 100 MHz vilket motsvarar avstånd från 50 m ner till 1,5 m. Förutom den korta räckvidden är systemen ofta känsliga för andra ljuskällor och stora kontrastskillnader i den mottagna signalen. Detta medför att tekniken framförallt är lämplig för inomhusbruk, men tillverkarna förbättrar kontinuerligt tekniken för att klara av utomhusmiljö och starkare bakgrundsljus. Trots dessa brister och det relativt låga pixelantalet (CamCube 3.0 från PMD[vision] har 200×200 pixlar men andra tillverkare använder mindre matriser) har flera företag¹⁰ utvecklat kameror som använder sig av denna princip. Intresset för tekniken beror framförallt på att den ger möjlighet till bildhastigheter upp mot 50 fps med en kompakt design och låg energikonsumtion. Tillexempel är Fotonic¹¹ E40 bara $80 \times 80 \times 86.3$ mm³ med en vikt på 800 g och konsumerar maximalt 20 W, se Figur 7. En motivering till det stora intresset är att industrin och forskargrupper som arbetar inom datorgrafik, datorseende och robotik behöver sensorer med kort räckvidd som både är billiga, små och energisnåla för integrering i utvecklingsplattformar. Inriktningen på applikationerna är mera i linje med rörelsedetektion och mindre tyngd läggs på precisionsavbildning [10].



Figur 7: Till vänster Fotonic E40 sensorn som har specifikationerna: 15 Mhz moduleringsfrekvens (10 m räckvidd med en avståndsnoggrannhet på ± 10 mm), belysning med 43 stycken 850 nm laserdioder, 160×120 pixlar och 40×34 grader FOV. Höger bild visar en avståndsbild tagen med E40 modulen [11].

3.2.2 Fotonräknande indirekt ToF

Att övergå till fotonräknande matrisdetektorer för indirekt ToF med amplitudmodulerat ljus har visat sig ha fördelar både för avståndsnoggrannhet och bruspåverkan. Flera forskargrupper utvecklar koncepten där ett av de ledande projekten är MiSPiA¹² (Microelectronic Single-Photon 3D Imaging Array) [12,13].

En fotonräknande detektor har så hög förstärkning att signalen från en ensam absorberad foton överstiger det elektriska bruset i utläsningskretsen och kan detekteras. Den idag vanligaste tekniken är Geigermod-APD (lavinfotodiod, "Avalanche Photo Diode") där

¹⁰ Exempel på företag är: Fotonic, Mesa Imaging AG, Ifm electronic och PMD[Vision]

¹¹ www.fotonic.com

¹² <http://www.mispia.eu/index.aspx>

spänningen över dioden är så hög att en genererad fotoelektron skapar genombrott i halvledarmaterialet. Till skillnad från en linjär detektor, som ger en ström proportionell till ljusintensiteten, svarar Geigermod-APD:n med en digital signal som motsvarar att en foton har detekteras eller inte. En bild byggs upp genom att för varje pixel summera antalet detektioner över ett givet tidsintervall.

Inom ramen av MiSPiA projektet utvecklas nya matrisdetektorer med kapacitet för fotonräkning och 3D avbildning. Projektets mål är att utveckla sensorer som kombinerar ultra-hög ljuskänslighet med en snabb bildalstring för säkerhetssystem i fordon och övervakning i ljussvaga miljöer [14].

Ett 3D avbildningskoncept som MiSPiA utvecklat baserar sig på en 64×32 matrisdetektor med en belysning som intensitetsmoduleras med en 3.7 MHz sinussignal. Frekvensen på amplitudmoduleringen begränsar avståndet till 40 m. Avståndsinformationen fås genom att utföra fyra mätningar separerade med en kvarts period över den returnerade sinus signalen. Mätningarna utförs var och en för sig genom att trigga detektorn upprepade gånger över ett tidsintervall som är flera mikrosekunder långt. Sedan fasförskjuts triggpulsen en kvarts period för att sampla nästa av de fyra mätningarna. Hela cykeln kan göras så snabb att en bildhastighet på 200 fps fås. Bildhastigheten kan senare sänkas för att öka detektorns effektiva integrationstid [15,16].

Belysaren består av en kompakt rigg med 15 lasrar med våglängden 808 nm. Hela riggen drivs med 12 V och har en total energikonsumtion på 4 W. För en scen 40 m bort kan en avståndsnoggrannhet på 1 cm med 25 fps fås, ökas bildhastigheten till 100 fps fås en avståndsnoggrannhet på ca 5 cm. Kamerans storlek inklusive laserriggen är kompakt och totalvolymen är ca 4 dm³.

3.2.3 Pulsad indirekt ToF

Möjligheten till hög spatialupplösning, upp mot HD-kvalitet och över, med 3D-kapacitet och videoförmåga på långa avstånd är mycket åtråvärt men tekniskt svår. En metod är att använda befintlig COTS teknologi ("commercial off-the-shelf") som CCD eller CMOS matriser kombinerat med en elektrooptisk modulator för att erhålla djupledsinformation. En annan inriktning är att utveckla nya sensorer som baserar sig på beprövad teknik men med extra funktioner som möjliggör kodning av djupledsinformationen.

Ett företag som har inriktat sig på den sistnämnda metoden är SELEX Galileo¹³. De har utvecklat sensorn Swallow som har möjlighet att inom en given tidsgrind erhålla avståndsinformation [17]. Sensorn, som har 320×256 pixlar, är baserad på linjär APD-teknologi där en snabb variation på förstärkningen kan appliceras. Till skillnad från Geigermod-APD teknologin erhålls en analog signal som är proportionell mot ljusintensiteten.

Belysaren som används är en 1574 nm Nd:YAG laser med en pulslängd på ca 10 ns. Swallow-sensorn kan först ses som ett grindat system där en tidslucka öppnas vid en given tid för att registrera reflektionen från den utsända laserpuls. För att få avståndsinformation inom tidsluckan har SELEX utvecklat ett system där förstärkningen ökas succesivt över grindluckan. För varje laserpuls produceras två bilder. Ena bilden har samlats in utan ökande förstärkning, medan en tidsberoende multiplikativ faktor har applicerats vid insamling av den andra bilden. Kvoten av bilderna ger tillgång till den multiplikativa faktorn för varje enskild pixel. Genom kännedom om utseendet för den tidsberoende förstärkningen (SELEX använder en exponentialfunktion [18,19]) kan avståndet mellan objektet i scenen och grindluckans start- eller slutposition bestämmas för varje pixel.

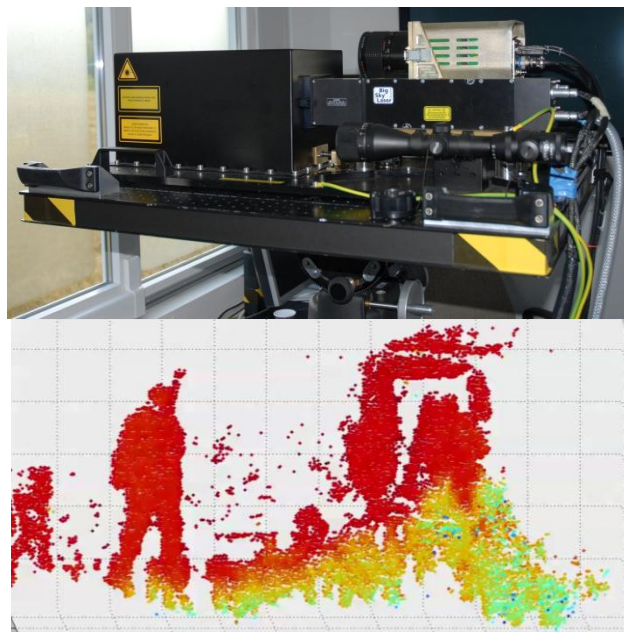
Fördelen med tekniken är att endast ett laserskott behövs för att erhålla djupledsinformation över hela synfältet, vilket möjliggör bildhastigheter på 5 till 10 Hz.

¹³ <http://www.selexgalileo.com/>

Datamängden som produceras är relativt låg, eftersom den motsvarar endast två 2D-bilder per uppmätt scen. En annan fördel är att ljuskänsligheten med APD-teknologin är hög vilket medför att laserenergin kan hållas nere. Trots detta är laserkraven så höga att det på avstånd längre än några kilometer oftast är nödvändigt att minska divergensen på lasern så att inte hela sensorns synfält är belyst för att få tillräcklig signal i det intressanta området i scenen.

Nackdelarna är dels att APD-sensorn måste kylas ner till $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ för att minska sensorbruset och att avståndsnoggrannheten blir beroende av grindluckans storlek. Det sistnämnda är framför allt på grund av att SELEX i sin implementering inte har en kontinuerlig ökning av förstärkningen utan gör det i 50 steg. Dessutom görs detta genom en exponentiell ökning av förstärkningen vilket leder till att noggrannheten ändras över tidsluckan. Som bäst kan avståndsnoggrannheten komma ner till strax under 10 cm men detta är endast över en liten del av grindluckan [20]. Variationen över grindluckan kan i vissa fall vara i storleksordningen en meter. En konsekvens av att detektorn integrerar över hela grindluckan är att bakomliggande ytor kommer att påverka avståndsestimeringen. Resultatet kommer att vara ett viktat medelvärde av retursignaler. Detta påverkar avståndsnoggrannheten på semitransparanta ytor och längs kanter på objekt.

Sensorn i sig har en relativt låg energiförbrukning, maximalt 44 W, men laserbelysningen måste täcka en hel scen på flera km avstånd vilket medför att energiförbrukningen för lasern är på 400 W. Den totala vikten för hela systemet närmar sig 80 kg med en volym på ca 400 dm^3 , men kan troligen minskas något om den optimeras för flygburna tillämpningar och något kortare räckvidd. Dock ingår inget positioneringssystem i angiven SWaP.



Figur 8: Överst är SELEX systemet med Swallow sensorn, den ljusare kamerasensorn ses i övre högra hörnet, med tillhörande laserhuvud och optik. Nedre bild visar ett punktmoln insamlad från 1.6 km.

Under 90-talet hade amerikanska flygvapnet ett program som gick under namnet Laser IMaging and Ranging System (LIMARS). Där utvecklades koncept för 3D kapacitet genom att kombinera kommersiellt existerande kamerateknologier, där hög spatialupplösning kan uppnås, med en pockelcell som kan utföra en tidsberoende polarisationsrotation för att koda in djupledsinformation [5].

Principen som arbetades fram och resulterade i flera patent är följande: en kort laserpuls belyser scenen och reflekteras tillbaka. Optiken samlar in ljuset som sedan passerar en polarisator för att rensa upp oönskade polarisations rotationer som kan ha uppstått i

scenen. En snabb elektrooptisk modulator, t.ex. en pockelcell, används sedan för att över en kort tid, typiskt ett tiotal till ett hundratal nanosekunder, linjärt förändra polarisationen på den inkommande ljussignalen. Typiskt används en sågtandsformad fasförskjutning för att erhålla ett linjärt samband mellan polarisationsfasen och avståndet till målet.

Med en polarisationsberoende stråldelare delas sedan signalen upp i två för att därefter detekteras av varsin kamera. Med korrekt synkronisering av kamerorna, den elektrooptiska modulatoren och laserpulsen kommer systemet att generera två bilder. Bilderna kommer att vara varandras komplement och den totala 2D bilden kan fås genom att summera bilderna. Resultatet av den tidsberoende polarisationsrotationen kommer vara att i intensitetsinformationen för varje pixel finns även avståndsinformation. För att extrahera avståndsinformationen tas kvoten av bilderna [21].

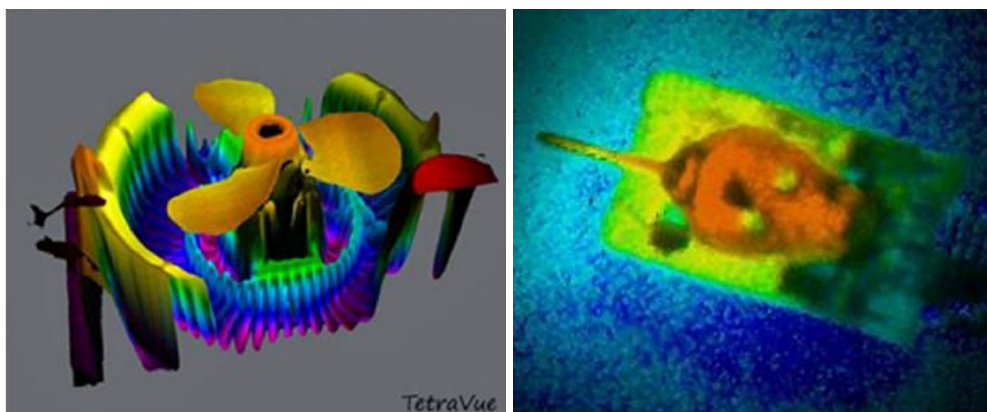
Avståndsnoggrannheten är kopplad till lutningen av den sågtandsformade fasförskjutningen, en brantare lutning ger högre noggrannhet men detta på bekostnad av den tillgängliga grindluckan som ges av sågtandsformens totala längd. Tekniker för att till viss del kringgå denna begränsning finns [5]. Avståndsnoggrannheten är också beroende av laserpulsens längd.

En av de stora nackdelarna med LIMaRS är att pockelceller måste användas och dessa kräver generellt höga spänningar kring kilovolt och har traditionellt sett haft begränsade synfält. På samma sätt som SELEX Swallow saknar även denna teknik möjlighet till multipla svar från bakomliggande ytor, varje pixel kan bara koda in ett avstånd. Om scenen innehåller flera delvis täckande bakomliggande ytor inom synfältet för en pixel kommer ett medelavstånd att erhållas.

DARPA sponsrar flera projekt för utvecklingen av teknologin. Bland annat finns SPI-3D (Standoff Precision Identification in 3D) som utvecklas av General Atomics¹⁴ och företaget TetraVue¹⁵ som utvecklar LIMaRS för flera stora amerikanska organisationer såsom DARPA, NASA och NSF. TetraVues senaste prototyp har demonstrerat 3D-kapacitet med ca 5 mm avståndsnoggrannhet med spatial HD kvalitet (1920×1080 pixlar) och en bildhastighet på 15 Hz. Prototypen demonstrerades på korta avstånd, men tekniken kan nå avstånd på flera kilometer med starkare lasrar. TetraVues system har en totalvikt på 22 kg med en volym kring 40 dm³ och en energikonsumtion på 202 W. Prototypen har varit designad som ett proof-of-concept system och nu omfokuseras arbete för att minimera paketering och energikonsumtion för att anpassa den till NASA's EDL (Entry, Descent and Landing) program. Målet är att nå en vikt på 2.7 kg, 30 W effektförbrukning och 4 dm³ volym för ett system med 50 m räckvidd. SPI-3D är inriktat på längre avstånd och bilder tagna på 7 km avstånd har publicerats, se Figur 9. I övrigt är öppen information om systemet starkt begränsad.

¹⁴ http://www.ga-asi.com/products/sensor_systems/spi3d.php

¹⁵ <http://www.tetravue.com/>



Figur 9: Vänster bild, en fläkt tagen med TetraVue LIMaRS. Bilden är från en videosekvens där förmågan att ha hög bildhastighet med 3D demonstreras genom en roterande fläkt. Videon finns tillgänglig på TetraVue's hemsida. Höger bild, falskfärgad SPI-3D bild av en stridsvagn mätt på 7 km avstånd hämtad från General Atomics hemsida.

3.3 Direkt ToF-kamera

Med direkt ToF mäts avståndet genom att använda en klocka i varje pixel för att mäta tiden från det att laserpulsens skickas ut tills detektorsignalen mäts. Detta är alltså samma princip som för skannande system, men här görs det i varje pixel i en matrisdetektor.

3.3.1 Samplande linjär ToF

En sensor där varje pixel innehåller en fotodiod, som tillsammans med utläsningskretsen samlar den inkommande strålningen, är den typ av sensor som samlar in mest information för varje laserpuls. Från dessa data kan ett 3D-punktmoln med flera svar per detektor och information om reflektansen i varje yta beräknas från en laserpuls. Ett exempel på en avståndsbild, insamlad med ett system av denna typ från Advanced Scientific Concepts (ASC)¹⁶, ges i Figur 10 [23]. Det finns två problem med denna typ av sensor. Det första och viktigaste problemet är att utläsningselektroniken är mycket komplicerad på grund av svårigheten att läsa ut många¹⁷ intensitetsvärden mätta med några få nanosekunders mellanrum ur varje pixel. Det andra problemet är att den reflekterade energin som krävs för tillräcklig SNR är hög och att systemet därför ställer höga krav på lasern för att nå längre räckvidder. Den maximala räckvidden beror på hur många pixlar laserpulsenergin ska spridas ut på. Dagens system består av 128×128 pixlar och når upp till 3 km räckvidd. Marknadsföringen riktar sig mot till exempel system för dockning i rymden. System för kartering och måligenkänning finns också, till exempel från Ball Aerospace¹⁸ som har integrerat ASCs sensor med kameror och navigationssystem samt med en skanner för att kunna samla in data för ett bredare stråk. ASC marknadsför sin detektor i flera olika paket integrerade med lasrar och med olika optik. Storleken på ladarsensorn ASC Tigereye är 1.5 dm³ volym och 2 kg vikt för 450 m räckvidd och 9° synfält. Vid den maximala räckvidden 450 m är punktseparationen 0.5 m. Genom att sätta på ett större objektiv med längre fokallängd och en starkare laser kan räckvidden ökas och synfältet minskas.

Något enklare utläsningskretsar kan göras om man accepterar detektion av reflekterad strålning från endast den första ytan [24], men sannolikheten att detektera mål i vegetation blir då starkt begränsad.

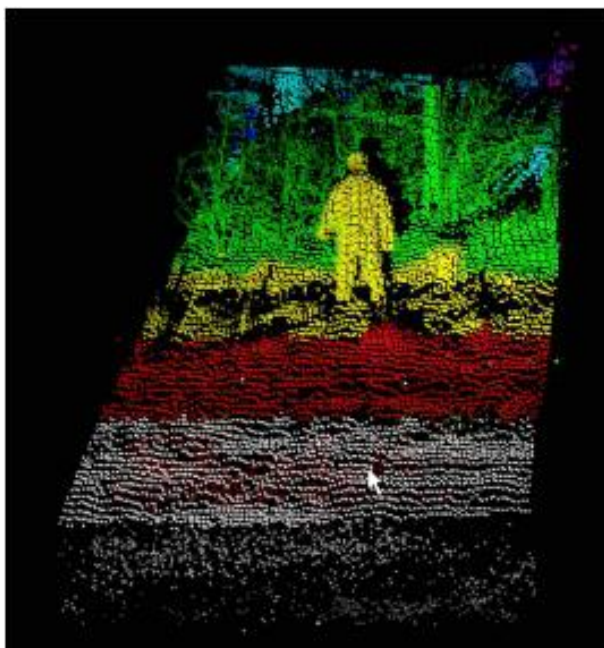
¹⁶ <http://www.advancedscientificconcepts.com>

¹⁷ 20 eller 44 för olika modeller av ASCs sensor, men optimalt fler.

¹⁸ <http://www.ballaerospace.com/page.jsp?page=288>

Avståndsupplösningen i denna typ av system begränsas framförallt av laserpulsens längd och bandbredden i elektroniken. Laserns pulsen energi måste vara relativt hög, så det är mycket besvärligt att nå pulslängder under 3-5 ns vid 1.5 μm våglängd och under 1-3 ns vid 1 μm våglängd. Vid den senare våglängden är det dessutom svårt att nå bra prestanda med belysning som är under maximalt tillåten exponering för oskyddade ögon. Med en 3 ns lång laserpuls begränsas avståndsupplösningen till knappt 0.5 m inom synfältet för en pixel. Även den laterala upplösningen är begränsad eftersom pixlarna är separerade med 100 μm på sensorn. För att inte slösa med fotonerna används en mikrolinsmatris framför detektorn som kan ge en effektiv fyllnadsgrad över 80 %. De stora pixelavstånden gör dock att mycket långa fokallängder krävs för hög lateral upplösning. För att nå 5 cm punktseparation och lateral upplösning på 1 km avstånd krävs till exempel 2 m fokallängd på mottagarteleoskopet.

Den stora fördelen med samplande linjära matrisdetektorer är bildalstringsförmågan där en 3D-bild skapas med endast en laserpuls, vilket sänker kraven på positioneringssystemet. Positionsdata kan samlas in med låg frekvens och bilddata kan användas för att förbättra registreringen av mätdata om bilderna tas med visst överlapp. Nackdelar är de höga kraven på laser och utläsningselektronik, behovet av lång fokallängd för att nå hög lateral upplösning, den begränsade räckvidden och att multipelsvarsförmågan begränsas av en avståndsupplösning på 0.5-1 m beroende på pulslängd.



Figur 10. Exempel på avståndsbild insamlad med en enda laserpuls med hjälp av en samplande linjär ToF-kamera [23].

3.3.2 Fotonräknande direkt ToF

Fotonräknande matrisdetektorer baserade på Geigermod-APD:er togs fram på MIT Lincoln Labs och används i flera amerikanska militära ladarsystem, till exempel ALIRT och HALOE. Kommersiellt säljs sensorer av Princeton Lightwave¹⁹ och Boeing Spectrolab²⁰. Detektion av enstaka fotoner är också möjligt med APD:er i linjär mod och utveckling av matrisdetektorer med denna teknik pågår, till exempel på Raytheon och DRS Technologies [5]. Fördelen med dem är att det går att särskilja om en eller flera fotoner detekteras. Högst prestanda för fotonräkning har visats med supraleddande

¹⁹ <http://www.princetonlightwave.com/mm-products/3d-ladar>

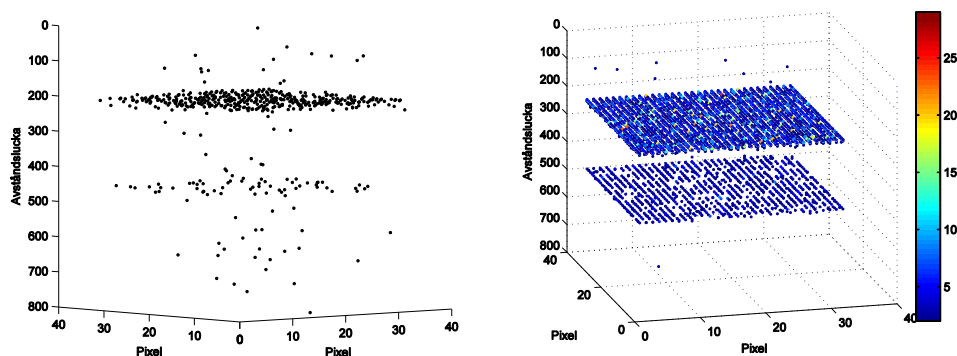
²⁰ http://www.spectrolab.com/sensors/pdfs/products/SPECTROCAM-LG3D_RevA%20062212.pdf

nanotrådar (SNSPD, ”superconducting nanowire single-photon detector”) [25], men dagens detektorer måste kylas till några få Kelvin vilket gör det svårt att använda dem i operativ utrustning.

För varje laserpuls ger varje pixel med Geigermoddetektorer antingen tidpunkten när den första fotonen detekterades eller svaret att ingen foton detekterades. Det finns inget sätt att för en enskild mätning avgöra om fotonen kommer från en reflekterad laserpuls eller bakgrundsljus. Det är därför nödvändigt att mäta många gånger mot samma punkt för att genom signalbehandling selektera de positioner som givit flera detektioner och därmed troligen motsvarar en reflekterande yta. Det är också nödvändigt med många mätningar för att upptäcka multipla reflekterande ytor på olika avstånd, då man endast kan få svar från en av dem i varje mätning. Eftersom till exempel Princeton Lightwaves sensor kan utföra mätningar med 186 kHz (pulsrepetitionsfrekvens för lasern) är det möjligt att nå över 100 Hz bildtakt för en 3D-video, beroende på vilken dynamik i intensitet som önskas.

Med detektorer i linjär mod är det möjligt att detektera flera fotoner vid olika tidpunkter för samma laserpuls [26]. Det är dock tveksamt om de mer komplexa utläsningskretsar som då krävs är möjliga utan att försämrade övriga prestanda mer än de fördelar som uppnås. Även med detektion av endast en foton per laserpuls kräver linjära detektorer mer komplexa utläsningskretsar, och ger dessutom högre mörkerström [27]. I dagsläget är därför Geigermod-APD att föredra även om det teoretiskt finns fördelar med fotonräknande APD:er i linjär mod.

Med Geigermod-APD är det viktigt att sannolikheten för att detektera en foton i varje laserskott hålls låg. Med i medeltal en absorberad foton per laserskott fås en detektionssannolikhet på 63 % (eftersom varje pixel endast kan triggas en gång), vilket kan tas som en ungefärlig övre gräns. För att mäta flera ytor och eliminera brus från bakgrundsljus och mörkerström används sedan koincidenssignalbehandling så att endast punkter som gett minst M detektioner med N laserpulser (till exempel 3 av 50) förs vidare som en detektion. Effekten av detta visas i Figur 11.



Figur 11. Simulering av mätning med en 32×32 pixlar geigermod-APD matrisdetektor mot två halvgenomskinliga ytor. I vänstra bilden resultatet av ett laserskott med detekterade fotoner i 509 av 1024 pixlar. I högra bilden visas resultatet av simulering av 100 laserskott där endast avståndsluckor med minst 2 detekterade fotoner är markerade och färgskalan visar antalet detektioner. Toppvärdena i avståndslucka 250 döljs delvis av flankerna på fördelningen, värdena i det planet går från 5 till 29 med medel på 16.7. I avståndslucka 450 som är centrum för andra planet går värdena från 0 till 9 med medel 2.2, och tydliga luckor finns i ytan. Ett fåtal bruspunkter från bakgrund och mörkerklick syns utanför något av de två planen.

Eftersom det med en fotonräknande detektor krävs ytterst lite energi vid mottagaren kan laserpulsenergin hållas låg. Detta möjliggör användning av fiberlasrar med pikosekundpulser. Detta är mycket fördelaktigt ur en SWaP-synpunkt eftersom lasrarna kan hållas små och lätta. Generellt så är det mycket enklare att generera många laserpulser med låg energi än få laserpulser med hög energi, och fotonräkning har därför en stor fördel på lasersidan.

Avståndsupplösningen bestäms av jittret i position för detekterade fotoner och inte av de genererade pulsernas längd, vilket gör att den analoga bandbredden i elektroniken kan överträffas. Med matrisdetektorer är det i dagsläget möjligt att nå runt 0.5 ns eller 7.5 cm avståndsupplösning. Med bara ett detektorelement är det möjligt att nå under 1 cm avståndsupplösning [28].

Fördelarna med fotonräknande matrisdetektorer är flera, till exempel lång räckvidd, hög yttäckning och hög avståndsupplösning. Nackdelarna är höga krav på positioneringssystem, stora krav på beräkningskapacitet och krav på långa fokallängder för att nå bra lateral upplösning.

Det finns flera operativa system baserade på fotonräknande Gm-APD-matrisdetektorer som används för kartering, till exempel ALIRT, HALOE och MACHETE [6]. Detta är dock relativt stora system för användning på hög höjd. Den publicerade informationen om systemen är mycket begränsad, men de används på relativt stora bemannade flygplan. Boeing har beskrivit en demonstration med Spectrolabs sensor med mätning från luftballong [29]. Systemet vägde under 10 kg, upptog ca 19 dm³ och drog 325 W inklusive optik och laser, men var fortfarande ett experimentsystem som kräver ytterligare paketering. Från 330 m (1000 fot) höjd uppnåddes 15 cm avståndsupplösning och 13 cm punktseparation med en yttäckning om 1.3 km²/h. I framtiden kan matrisstorleken förväntas öka från de 32×32 som användes vid försöken. Redan idag finns matriser med 256×64 detektorelement demonstrerade av MIT Lincoln Lab [5].

En annan typ av fotonräknande detektor används av Sigma Space Corporation²¹. Man använder mikrokanalplattebaserad fotomultiplikator (PMT) med en matrisdetektor med 10×10 element från Hamamatsu. En fördel jämfört med Gm-APD är att detektorerna kan mäta flera fotoner för varje laserpuls, med ner till 1.5 ns separation. Tekniken är dock inte lika skalbar som en Gm-APD-matris och detektorns aktiva yta är 18 mm [30], eller 1.8 mm per pixel i sida och tekniken kan inte enkelt skalas till större matriser. Eftersom detektorn endast är känslig i det visuella området används gröna lasrar, och tillämpningar har främst varit inom kartering av grunt vatten och isområden. Sigma Space Corporation har demonstrerat en variant av systemet ombord på en Aerostar UAV och även visat en mindre variant med volym 30 dm³, 12.7 kg vikt och 168 W strömförbrukning i en Viking 300 UAV [31].

²¹ <http://www.sigmaspace.com/instruments/single-photon-lidar>

4 UAV-plattformar

Under detta kapitel görs en inventering av befintliga obemannade flygfarkoster både inom försvaret idag och vad som kan tänkas finnas tillgängligt för framtida UAV-system både militärt och civilt. För att utröna vilken punktseparation och lateral upplösning olika sensorsystem kan erhålla på marken är det intressant att studera sensorplattformens normala flyghöjd och marschfart. För laserbaserad spanings- och underrättelseinhämtning erhålls en mindre punktseparation i flygfarkostens flygriktning ju långsammare farkosten färdas. Sensorplattformens förmåga att bära en viss nyttolast är en annan parameter som är begränsande för olika sensorsystem.

UAV:er finns i olika storlekar för olika tillämpningar. Idag finns tre olika system av obemannade flygfarkoster inom det svenska försvaret, UAV 03 Örnen, UAV 05A Svalan och UAV 05B Korpen (Figur 12). Dessa tre farkoster är alla av typen fast vinge men har i övrigt stor spännvidd avseende storlek, flyghöjd samt nyttolast och möjligheten att flyga olika uppdrag. Alla tre farkosterna kan idag bära video- eller EO-kamera (IR). En första analys av möjligheten att installera ett ladarsystem på dessa eller liknande plattformar kan göras baserat på vikt. Svalan väger inte mer än 450 g och har inte möjlighet att bära något aktivt EO-system på grund av dess minimala nyttolast. Korpen väger 5.85 kg och kan bära en nyttolast på uppskattningsvis knappt 2 kg vilket skulle göra installation av ett i vikt lättare aktivt EO-system möjligt. Örnen klarar en nyttolast på 45 kg och skulle klara att bära större ladarsystem. Även flyghöjd och hastighet skulle kunna vara begränsande faktorer. Korpen flyger normalt på en höjd mellan 50 till 150 m vilket gör att en sensor som Velodyne HDL-32E inte klarar flyghöjden och Riegl VUX-1 skulle bli för tung. Utveckling av ett lämpligt system borde dock vara möjlig. Örnen är en taktisk UAV, dvs den klarar att manövrera på hög flyghöjd ända upp till 15.000 fot (ca 4600 m). Den normala flyghöjden är dock mellan 900 och 1800 m. För en normal flyghöjd skulle t ex AHAB DragonEye 400 vara möjlig att använda (specificerad flyghöjd är max 1500 m). Örnens normala flyghöjd och hastighet begränsar dock antalet punkter per kvadratmeter till några få. Ladarsystem baserade på fotonräknande matrisdetektorer skulle kunna anpassas till plattformens prestanda, och det högre antalet punkter per sekund utnyttjas för förbättrad punktseparation.



Figur 12. Obemannade flygfarkoster inom det svenska försvaret, UAV 05A Svalan, UAV 05B Korpen och UAV 03 Örnen (Bilder från FMV^{22,23})

Trenden civilt är en utveckling mot lätta flygfarkoster främst utformade som multiroteror. Civilt delas dessa in i fyra kategorier, klass 1A, 1B, 2 samt 3. Klass 1A inkluderar obemannade luftfarkoster med en maximal startvikt på mindre än eller lika med 1.5 kg, klass 1B startvikt på mer än 1.5 kg men mindre än eller lika med 7 kg, klass 2 över 7 kg men mindre än eller lika med 15 kg, samt klass 3 luftfarkoster över 15 kg i startvikt. För kategori 1A, 1B samt 2 krävs det att piloten har luftfarkosten inom synhåll. För forskningsändamål (flygande sensorplattformar) använder FOI multiroteror i kategori 1B och ska även certifieras för kategori 2 under 2014. Kategori 1B kan bära en nyttolast på ca

²² <http://www.fmv.se/sv/Nyheter-och-press/Nyheter-fran-FMV/Nya-mini-UAV-er-i-luften/?p=3>

²³ <http://www.fmv.se/sv/Projekt/Ornen---Taktisk-UAV-03/>

2.3 kg och kategori 2 ca 5 kg. Förmågan att bära dessa nyttolaster gör dem till användbara plattformar för aktiva EO-sensorsystem.



Figur 13. Multirotor klass 1B (nyttolast 2.3 kg) och multirotor klass 2 (nyttolast 5 kg).

För tyngre EO-sensorsystem krävs det större flygfarkoster som kan bära tyngre nyttolaster. Linköpingsbaserade företaget Unmanned Systems Group (USG) utvecklar två system med fast vinge, Discoverer och Discoverer II. Discoverer I räknas till ett litet så kallat RPAS (Remotely Piloted Aircraft Systems), medan Discoverer II anges till Tactical RPAS, på grund av sin flyghöjd (15.000 fot). Discoverer I och II har snarlika prestanda som Korpen och Örnen. USG utvecklar också obemannade helikopterplattformar (VTOL; Vertical Take Off and Landing). De har två VTOL att erbjuda, dels den lättare NEO-S 350 som klarar en nyttolast på 30 kg, dels den tyngre ATRO-X som klarar hela 120 kg i nyttolast (snarlik med SAAB Skeldar). Det finns ett stort antal tillverkare av UAV:er i olika storleksklasser runt om i världen. I Sverige finns förutom USG till exempel UAS Europe AB, Cybaero AB och SAAB.

Tabell 2. Nyttolast, flyghöjd samt fart för några utvalda UAV-plattformar

UAV	Nytto- last	Normal flyghöjd	Max flyghöjd	Marschfart	Maxfart
Svalan	0.1 kg (?)	50-150 m	?	32-64 km/h	?
Korpen	2 kg (?)	50-150 m	?	37-74 km/h	?
Örnen	45 kg	900-1800 m	4600 m	130 km/h	200 km/h
Skeldar	40 kg	?	3500 m	?	140 km/h
Discoverer	10 kg	?	4900 m	80 km/h	130 km/h
Discoverer II	70 kg	?	4900 m	120 km/h	200 km/h
ATRO-X VTOL	120 kg	?	?	?	?
NEO S-350 VTOL	30 kg	?	4500 m	?	120 km/h
Multirotor 1B	2.3 kg	5-120 m	120 m	18 km/h	36 km/h
Multirotor 2	5 kg	5-120 m	120 m	18 km/h	36 km/h



Figur 14. Unmanned sensors obemannade flygfarkoster, överst till vänster Discoverer I och till höger Discoverer II, nederst till vänster NEO S-350 VTOL och till höger ATRO-X VTOL UAV (bilder från Unmanned System Group)

5 Prestandavärdering för tillämpningar

5.1 Önskvärd sensorprestanda i olika tillämpningar

Man kan tänka sig flera olika tillämpningar för ett UAV-baserat ladarsystem, till exempel underrättelseinhämtning, spaning, rekognosering av framryckningsvägar och hotidentifiering. Dessa tillämpningar ställer olika krav på sensorernas prestanda. För att beskriva en sensors bildkvalitet används ofta NIIRS (National Imagery Interpretability Rating Scale), som anges i en tiogradig skala. Det finns fyra olika tabeller för visuella bilder, IR-bilder, multispektrala bilder och radarbilder²⁴. En tolkad översättning av skalan för visuella bilder ges i Tabell 3. Skalan anger upplösningsgrad och möjligheten att urskilja olika saker avseende markupplöst avstånd. Den extra avståndsdimensionen bör göra att ladardata är mer användbar än visuella bilder för samma punktseparation. Det finns dock åsikter om att NIIRS-skalan inte anger tillräckligt tät punktseparation för de högre stegen, med alternativa krav på 0,02 m punktseparation för att identifiera om en person bär på ett vapen eller något annat²⁵. De vapen som åsyftas i NIIRS-skalans nivå 8 är enligt vissa uppgifter framförallt bärbara luftvärnssystem. Flyghöjden för Örnen, 900-1800 m, motsvarar NIIRS 6-7 för den termiska sensorn.

Tabell 3. NIIRS anger markupplöst avstånd och vad som går att upptäcka i det visuella området

NIIRS	Markupplöst avstånd (punktseparation) [m]	Visuella området
0	-	Tolkning omöjlig pga hinder, sensorfel, osv.
1	>9.0	Särskilj mellan taxibanor och landningsbana på en stor flygplats.
2	4.5 - 9.0	Upptäck stora hangarer på flygfält eller stora radarstationer (FPS-85)
3	2.5 - 4.5	Upptäck tåg. Klassificera stora fartyg eller typ (Kryssare, handelsfartyg, mm.)
4	1.2 - 2.5	Upptäck en öppen robotsilodörr. Klassificera attackflygplan (F-18, JAS-39, MIG-29, osv.) som står parkerade
5	0.75 - 1.2	Klassificera taktiska markrobotar (SCUD, SS-21, FROG, osv.)
6	0.40 - 0.75	Upptäcka en människa
7	0.20 - 0.40	Identifiera enskilda syll/sliper längs ett järnvägsspår
8	0.10 - 0.20	Särskilja om en person bär på ett vapen eller något annat
9	< 0.10	Identifiera registreringsnummer på fordon

²⁴ <http://www.fas.org/irp/imint/niirs.htm>

²⁵ FOI, opublicerat material.

5.1.1 Spaning

Tillämpningar som bygger på upptäckt av föremål eller insamling av data för ruttplanering kan sammanföras till noggrann kartering, i vissa fall med förändringsdetektion mot tidigare mätning. Önskad punktseparation kan här uppskattas till 0.2 m (25 punkter per kvadratmeter). Detta ger möjlighet att identifiera fordon, men inte föremål personer håller i händerna. I dessa tillämpningar är det ofta viktigt att kunna särskilja objekt under trädskronor, och multipelsvarsförmåga är därför ett krav men avståndsupplösning på ca 1 m kan vara tillräcklig. I vissa fall, framförallt för underrättelseinhämtning, är det intressant att kunna identifiera kamouflerade objekt, och då ställs högre krav på avståndsupplösning. Yttäckningskravet ansätts till 20 km²/h för att kartera ett operationsområde inför nästa dag, men ofta kan nog sämre yttäckningshastighet accepteras. Tillsammans med den spatiella upplösningen ger detta ett krav på mätning av 140 000 punkter per sekund. Det är önskvärt att använda flyghöjd på över 1 km och att operera nattetid för att minska risken för nedskjutning vid operationer i konfliktområden.

5.1.2 Skydd av konvoj

För hotidentifiering ställs ofta högre krav på spatiell upplösning, särskilt om hotet består av människor där identifieringen består i att avgöra om de håller i vapen eller inte. För att identifiera ett vapen kan så låg punktseparation som 2 cm vara nödvändig. Ett exempel när detta kan vara relevant är för förvarning om eldöverfall vid transporter i till exempel internationella operationer. För en konvoj bestående av flera fordon skulle det kunna vara tänkbart att använda en UAV som flyger framför konvojen för att ge förvarning om hotfulla situationer. Detta kräver troligen ett semiautonomt system där signalbehandling används för att separera ut misstänkta situationer som behöver granskas manuellt. Med en körhastighet på 70 km/h och ett undersökt stråk om 500 m på var sida vägen behöver ett område om 20 000 m²/s sökas av. Det är inte rimligt att göra full 3D-avbildning med lateral upplösning som räcker till för att upptäcka människor och klassificera dem som möjliga hot med denna yttäckning. Alltså kommer någon form av tvåstegssystem med en yttäckande upptäcktssensor och en 3D-avbildande identifieringssensor krävas.

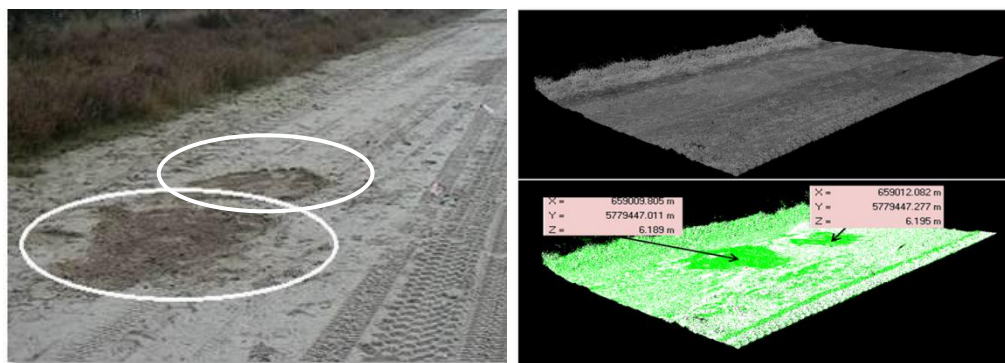
Upptäcktssensorn kan till exempel vara en IR-kamera med stort observationsområde. Det är också möjligt att i förväg peka ut områden som ska undersökas beroende på terrängens utseende. Automatiskt urval baserat på IR-bilder fungerar troligen dåligt i bebyggelse, men bättre i terräng. För att klara två gimbaler, en med IR-kamera och en med 3D-ladar kommer en plattform i samma storleksklass som Örnen krävas. IR-kameran kan antas ha minst 640×512 pixlar och en bildtakt på 100 Hz. På grund av begränsningar i skanningen kan en effektivitetsgrad i avsökningen där kameran studerar samma område en gång till ansättas till en faktor 0.1. Då fås en pixelstorlek på marken om i storleksordningen 0.006 m² eller ca 8 cm i sida. Med denna relativt höga upplösning bör det gå att reducera det område som behöver studeras med 3D-sensorn till under 1 % av det område som i varje ögonblick är nåbart från plattformen. Urvalet måste ske så snabbt att en helautonom algoritm krävs, och först efter att 3D-mätningen och ett andra urval är genomfört visas bilderna för en operatör.

För 5 minuter förvarning krävs att UAV:n flyger 6 kilometer framför konvojen, om 1 minut förvarning kan accepteras kan avståndet minskas till drygt 1 kilometer. För maximalt 30° betraktningvinkel krävs 1000 m flyghöjd vid rak flygning. Eftersom ett obemannat flygplan kan flyga med högre hastighet än markfordonen i konvojen kör kan dock en sicksackbana vara möjlig och en lägre flyghöjd användas.

5.1.3 Upptäckt av IED

En annan tänkbar ladartillämpning är att upptäcka IED:er på vägen vid transport. Trenden är att sensorer är antingen mastmonterade på fordon eller flygande bredvid eller framför. Det är av stor nytta att komma upp på höjd med sensorn jämfört med en sensor direkt

monterad på ett fordon. En multirotor kan manövreras inifrån ett militärt fordon som körs i låg hastighet. Upptäckt av IED:er sker främst genom förändringsdetektion där uppgrävning av vägbanan detekteras, se exempel i Figur 15. Detta ställer mycket höga krav på punktseparation och positionsnoggrannhet vid mätningen och kräver alltså ett mycket bra positioneringssystem i plattformen. Möjligheten att montera ett tillräckligt noggrant positioneringssystem på plattformen är det som främst begränsar användningen av ladarsensorer för förändringsdetektion. Det är möjligt att registrering av 3D-data mot den tidigare mätningen eller 3D-SLAM kan sänka kraven på positioneringssystemet till något som är möjligt att placera i en mindre UAV. 3D-SLAM undersöks för närvarande på FOI.



Figur 15. Vänster bild är en visuell bild som visar två små områden på en väg där någon har grävt och gett upphov till "störd jord". Övre höger bild visar två punktmoln överlagrade mot varandra, gråskalan anger laserintensiteten. Genom att enkelfärga dessa båda punktmoln, här vit och grön, kommer den ena eller andra färgen förtätas där en förändring finns (beroende på om förändringen anger en urgrävning eller att jorden ligger högre en referensmätningen)

5.1.4 Spaning på gruppnivå

För användning på gruppnivå är bara små plattformar aktuella. Främst är antagligen multirotorsystem lämpliga då de är lättare att handha, men små plattformar med fast vinge ska inte uteslutas. I denna typ av tillämpningar blir SWaP viktigare än exakt prestanda. Utvecklingen under den senaste tiden har gjort att det idag finns möjlighet att bygga skannande system med vikt under 2 kg, och i framtiden kan även fotonräknande matrisdetektorer bli möjliga för plattformar med den lastkapaciteten. Nyttan för försvaret är momentan lägesbild, där omgivningen kan avbildas för att erhålla till exempel uppgifter om terrängens topografi (eventuella skymda platser, siktlinjer), urbana miljöer, spaning bakom hörn och backkrön, incidentavbildning etc.

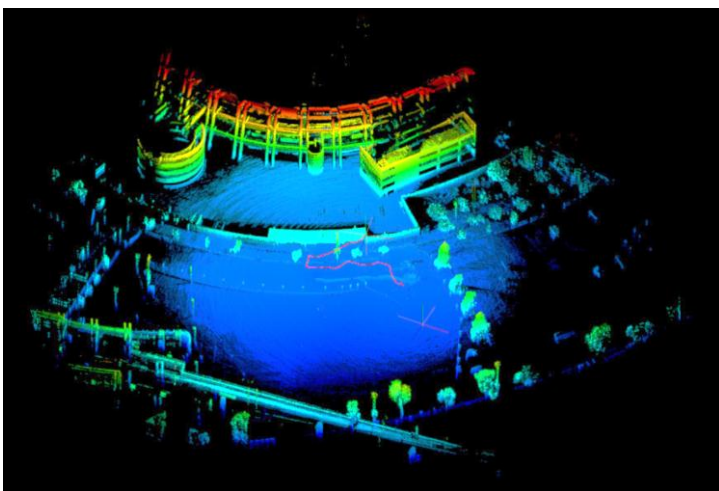
Det finns system som i öppen terräng kan ge god datakvalitet i denna tillämpning baserat på 2D-bilder registrerade från multipla vyer. Fördelen med ett ladarsystem är att mätningen bara behöver göras från en riktning, och att farkosten därmed inte behöver exponeras lika mycket.

5.1.5 Dokumentation av incidenter

Tillsammans med Livgardet K1 har FOI provat ut den handhållna sensorn Mantis-Vision F5 och nyttan att använda den för militära forensiska mätningar och dokumentation av incidenter. Med F5 erhålls en högupplöst geometrisk 3D-avbildning med en precision bättre än 1 mm, se Figur 16. Denna utrustning genererar punktmoln precis som andra sensorer beskriva i denna rapport. Skalade punktmoln från olika sensorer går alldeles utmärkt att kombinera med varandra. En flygburen sensor likt Velodyne kan avbilda ett incidentområde för en snabb lägesbild, likt Figur 17, och för att erhålla helheten av en incident, medan en sensor som F5 dokumenterar detaljer.



Figur 16. Forensisk geometrisk 3D-dokumentation av sprängd bil. Vänster bild är visuell och höger bild det avbildade punktmolnet i 3D. (Bilder FOI)



Figur 17. Bearbetad lägesbild insamlad med Velodyne HDL-32E (Bild Phoenix Aerial Systems²⁶)

5.2 Jämförelse av ladarprinciper

Vi försöker här i tabellform (Tabell 4) ge en skala för hur bra olika tekniker är för de olika mått vi har angivit i avsnitt 2. Vi tar bara med de system där vi ser god potential att ha räckvidd större än tiotals meter i dagsljus och utesluter alltså de system för indirekt ToF baserat på amplitudmodulation som utvecklats under senare år.

²⁶ <http://www.phoenix-aerial.com>

Tabell 4. En enkel jämförelse av prestanda för olika typer av ladarsystem. Jämförelsen gäller representativa data och både bättre och sämre prestanda kan finnas. Färgskalan är relativ för varje rad, där grön är bäst, gul sämre och röd sämst.

Parameter	Skannande multistråle miniatyr-system	Större skannande system	Pulsad indirekt ToF	Linjär matris-detektor	Foton-räknande matris-detektor
Avstånds-upplösning	Ca 0.5 m	Ca 0.5 m	Medel-avstånd	Ca 1 m	Ca 0.1 m
Lateral vinkel-upplösning	Ca 100 µrad	Ca 50 µrad	Pixelstorlek ~25 µm	Pixelstorlek ~100 µm	Pixelstorlek ~100 µm
Bildalstrings-förmåga	Utskäring ur stor scen, stort antal pulser	Utskäring ur stor scen, stort antal pulser	En puls	En puls	Multipla pulser
Räckvidd	100tals m	Någon km	Flera km	Upp till 3 km	>10 km
Punkter per sekund	~500 kHz	~500 kHz	~100 kHz	~100 kHz	~MHz
SWaP	>1,5 kg	25-50 kg	>20 kg	>20 kg	>10 kg
Positioneringskrav	1 punkt per puls	1 punkt per puls	3D för varje puls	3D för varje puls	Många pulser för 3D

I karteringsliknande tillämpningar är datakvalitet och mätastighet viktiga parametrar. I dagsläget är skannande system den klart mest mogna tekniken, men fotonräknande matrisdetektorer används i amerikanska militära system. På sikt kan den överlägsna avstånds-upplösningen och den snabbare mätastigheten göra att fotonräknande system tar över även den civila marknaden. För båda typerna av system har lasrar och detektorer idag tillräcklig prestanda, även om detektorer för fotonräknande system främst finns i USA. De system som finns idag är dock anpassade till större plattformar och är inte avpassade till mellanstora UAV-plattformar. Uppgiften i framtiden blir att minska SWaP för systemen, och då framförallt för kringutrustning i form av system för positionering och datalagring. Om det blir möjligt att få flygtillstånd för UAV:er i civila tillämpningar så kommer utvecklingen på detta område troligen gå mycket snabbt då det finns många kommersiella tillämpningar inom till exempel inspektion av pipelines och större kraftledningar. Om kostnaden för mätning sjunker kommer troligen även tillämpningar inom exempelvis skogsbruk och miljöövervakning explodera.

För hotidentifiering är bildalstringsförmåga kritiskt. System baserade på matrisdetektorer är därför att föredra, då skannersystem som kan välja ut en viss ruta är komplicerade och bör undvikas på en UAV. Ett problem är de stora pixelavstånden i matrisdetektorerna. Om 2 cm punktseparation önskas på målet krävs på 1 km avstånd 5 m fokallängd på optiken om pixelavstånden är 100 µm som i dagens linjära och fotonräknande APD-matriser. Med spegeloptik är den fysiska längden inte lika stor som fokallängden, så fokallängder på ungefär 1 m är rimliga på en mellanstor UAV och det är möjligt att utnyttja även längre fokallängder på de största plattformarna som diskuterats i den här rapporten. Tydligt är dock att den spatiella upplösningen är en fördel för sensorer baserade på indirekt ToF där pixlarna inte är lika komplicerade och kan göras mindre, dock offras då multipelsvarsförmågan. Det är dock inte säkert att de ändå är bättre än fotonräknande sensorer i ett totalt SWaP-perspektiv då högspänningsaggregat och dubbla detektorer kan

ta upp det som vunnits med kortare fokallängd på optiken. Det är troligen enklare att krympa pixlarna för fotonräknande system än för system med linjär detektion i varje pixel. De fotonräknande systemen har även fördelar av bättre avståndsupplösning och potential för mindre SWaP, främst beroende på lägre pulsenergi för lasern. Överslagsberäkningarna visar att det inte är självklart att det går att uppfylla krav om identifiering av hot i form av igenkänning av handeldvapen från en UAV med 1 km räckvidd.

För små plattformar börjar idag skannande system bli tillgängliga där totalvikten är under 2 kg. Skannande system med multipla lasrar där hela sensordelen roterar kommer fortsatt ha fördelar när alla riktningar ska studeras, till exempel för att få en snabb lägesbild eller för dokumentering av omgivningen. Den låga vikten kräver att räckvidd och absolutpositionering offras, men räckvidd på i storleksordningen 100 m förväntas vara möjligt utan att överstiga lastförmågan för små multirotorfarkoster.

På sikt kommer det troligen även bli möjligt att bygga fotonräknande system i en storlek som kan monteras på små multirotorplattformar. Ett fotonräknande system kräver en avancerad skanner för att täcka stora områden, vilket inte är lämpligt för små plattformar. En fotonräknande matrisdetektor är därför mer lämpad för fokuserad spaning mot ett mindre område på något längre avstånd, där bildalstringsförmågan och den höga känsligheten kommer till sin rätt, och där synfältet kan riktas genom att hela plattformen roteras. UAV-plattformen är här till stor nytta genom att lyfta upp sensorn för att få fri sikt och för att undvika marknära turbulens som annars försämrar bilden [32]. Dock kommer fokallängden på optiken vara begränsad av plattformens storlek, och därmed kommer lateral upplösning och punktseparation begränsa användbar räckvidd. Med dagens pixelavstånd på 100 μm , 200 mm fokallängd och ett önskemål om 20 cm punktseparation så begränsas räckvidden till 400 m. En förbättring av detta med en faktor 2-10 är önskvärt. Detta kan delvis lösas genom att pressa ihop pixlarna på sensorn, men det är inte troligt att pixlar mindre än 25 μm kommer inom överskådlig framtid på grund av problem med överhörning mellan pixlarna. En möjlighet kan vara att utnyttja den begränsade utfyllnaden på sensorn, där den aktiva ytan bara är några få procent av pixelns totala yta. Om lasern med hjälp av avancerad men statisk optik kan ges samma mönster, kan den laterala upplösningen bli mycket bättre än punktseparationen. Mikroskanning kan sedan fylla i mellanrummen och ge en förbättrad punktseparation jämfört med vad som fås i varje mätning. Detta ställer dock mycket höga krav på riktningsnoggrannheten och kanske endast kan användas från markbundna stationära sensorer. Där kan dock också längre fokallängder användas och behovet av mindre pixlar är därför inte så stort.

6 Slutsatser och rekommendationer

I den här rapporten har vi granskat olika typer av ladarsensorer för 3D-mätning som finns kommersiellt tillgängliga eller demonstrerade. Ett enklare resonemang om tillämpningar och vilka krav detta ställer på sensorprestanda har lett till en bedömning av vilka sensorprinciper som är mest intressanta för UAV-tillämpningar.

System för underrättelseinhämtning, storskalig spaning och kartering har till stor del liknande prestandakrav. De kommersiella karteringssystem baserade på skannande laserradar som finns idag ger ofta tillräcklig datakvalitet, men är för stora och tunga för användning på medelstora UAV:er samt kräver eventuellt för låg flyghöjd för bruk i konfliktområden. Militären i USA har infört ladarsystem baserade på fotonräknande matrisdetektorer för kartering och spaning, och denna teknik kommer troligen sprida sig till andra aktörer och tillämpningar då den har stora fördelar i avståndsupplösning, mätastighet och krav på lasereffekt för att nå en viss räckvidd.

Fotonräknande system ger data på ett format som kräver till stor del annan signalbehandling än från ett klassiskt skannande system. Det är därför önskvärt att Försvarsmakten ger FOI i uppdrag att inhämta praktisk erfarenhet så att framtida urval av sensorer kan göras och så att vi lär oss hur data ska hanteras.

System för karteringsliknande tillämpningar kommer troligen fortsatt väga mer än 10 kg och därmed kräva mellanstora UAV:er av samma storleksklass som Örnen. Positioneringssystem i form av GPS och IMU kan vara ett större problem än själva ladarsensorn. Möjligheterna att utnyttja SLAM för att sänka kraven på positioneringssystemet bör därför undersökas.

Det finns många potentiella civila tillämpningar av ladarsystem för kartering och övervakning från en UAV om priset kan bli billigare än vid användning av de bemannade plattformar som krävs idag. Om användning av UAV:er i allmänt luftrum blir tillåtet kommer troligen ladarsystem anpassade till UAV:er i olika storleksklasser snabbt utvecklas.

System baserade på lasrar med hög pulsenergi som beskrivits i avsnitt 3.2 och 3.3.1 kommer troligen främst ha nisch tillämpningar, kanske framförallt mot snabbt rörliga mål där det är viktigt att mäta hela scenen med en enda laserpuls. De kanske är mest intressanta i mark till luft-situationer där kraven på SWaP inte är lika stora som vid montering på UAV. När det är den egna plattformen som rör sig är det relativt enkelt att kompensera för rörelsen och därför är problemet med behov av många laserpulser för att mäta en 3D-scen mindre här. Denna typ av system kan också vara intressanta på plattformar som ändå har en laser med hög pulsenergi, till exempel i form av en belysarlaser för målutpekning.

För små multirotorplattformar har det börjat komma roterande system för mätning av avstånd längs ett antal linjer. Med hjälp av små förflyttningar och SLAM så kommer det vara möjligt att bygga upp en god 3D-miljö för en snabb lägesbild och dokumentation av omgivningen med räckvidd upp till ca 100 m. Detta provas för närvarande på FOI inom en beställning från FMV.

När det gäller identifiering av hot genom avbildning av ett begränsat område är matrisdetektorer att föredra. Dock gör de stora pixlarna att det kan vara problematiskt att nå tillräcklig lateral upplösning med rimliga fokallängder på kameraoptiken. I många fall kan troligen aktiv avbildning med laserbelysta 2D-bilder, eventuellt i kombination med IR, vara ett bättre alternativ då pixlarna i denna typ av sensorer kan vara mycket mindre. SWIR-området och speciellt våglängder runt 1.55 μm är mycket intressant då här finns många komponenter tillgängliga kommersiellt och relativt höga lasereffekter kan användas utan risk för skador på ögon samtidigt som militär utrustning i dagsläget ofta inte är signaturanpassad vid dessa våglängder. Dock ger inte en 2D-bild, med eller utan

belysning, möjlighet att segmentera bort till exempel vegetation som delvis skymmer objektet på det sätt som kan göras med 3D-data.

Som sammanfattning har två lovande koncept identifierats. En UAV av samma storleksklass som Örnen skulle kunna utrustas med en ladar för storskalig spaning, underrättelseinhämtning och kartering. Det andra lovande konceptet är att på en liten multirotor-UAV montera en roterande laserskanner med räckvidder på 20-100 m som kan ge en snabb lägesbild eller dokumentera en situation.

7 Referenser

1. F. Blais, "Review of 20 years of range sensor development," J. Electron. Imaging **13**, 231–243 (2004).
2. L. Harrie, B. Andersson, C.-G. Persson, M. Horemuz, A. Boberg, P. Olsson, H. Rost, and Y. Reshetyuk, *Geodetisk Och Fotogrammetrisk Mättnings- Och Beräkningsteknik* (Lantmäteriet, 2013).
3. J. Geng, "Structured-light 3D surface imaging: a tutorial," Adv. Opt. Photonics **3**, 128–160 (2011).
4. W. C. Stone, M. Juberts, N. Dagalakakis, J. Stone, J. Gorman, P. J. Bond, and A. L. Bement, *Performance Analysis of next-Generation LADAR for Manufacturing, Construction, and Mobility* (National Institute of Standards and Technology, 2004), p. NISTIR 7117.
5. P. F. Mcmanamon, "Review of lidar : a historic , yet emerging , sensor technology with rich phenomenology," Opt. Eng. **51**, 060901 (2012).
6. *Laser Radar Progress and Opportunities in Active Electro-Optical Sensing* (National research council of the national academies, 2014).
7. S. M. Beck, J. R. Buck, W. F. Buell, R. P. Dickinson, D. A. Kozlowski, N. J. Marechal, and T. J. Wright, "Synthetic-aperture imaging laser radar: laboratory demonstration and signal processing,," Appl. Opt. **44**, 7621–7629 (2005).
8. B. L. Stann, "Research progress on a focal plane array lidar system using a laser diode transmitter and FM/cw radar principles," Proc. SPIE **4723**, 19–30 (2002).
9. G. Petrie, "Airborne Topographic Laser Scanners," GEO Informatics **14**, 34–44 (2011).
10. S. Foix and G. Aleny, "Lock-in Time-of-Flight (ToF) Cameras : A Survey," IEEE Sens. J. **11**, 1–11 (2011).
11. H. Larsson, E. Amselem, J. Berggren, C. Brännlund, P. Engström, F. Gustafsson, F. Hemström, M. Henriksson, C. Grönwall, A. Linderhed, L. Sjöqvist, O. Steinvall, and G. Tolt, *Multispektral Dynamisk 3D- Avbildning Med Laser* (FOI, 2013), p. FOI-R–3768–SE.
12. C. Niclass, C. Favi, T. Kluter, F. Monnier, and E. Charbon, "Single-Photon Synchronous Detection," IEEE J. Solid-State Circuits **44**, 1977–1989 (2009).
13. S. Bellisai, F. Guerrieri, S. Tisa, and F. Zappa, "3D ranging with a single-photon imaging array," Proc. SPIE **7875**, 78750M (2011).
14. F. Zappa and A. Tosi, "Improving car safety with low-light , high-speed cameras," SPIE Newsroom 10 June (2013).
15. F. Zappa and A. Tosi, "MiSPIA: microelectronic single-photon 3D imaging arrays for low-light high-speed safety and security applications," Proc. SPIE **8727**, 87270L (2013).
16. S. Bellisai, D. Bronzi, F. A. Villa, S. Tisa, A. Tosi, and F. Zappa, "Single-photon pulsed-light indirect time-of-flight 3D ranging," Opt. Express **21**, 390–397 (2013).

17. I. Baker, L. Hipwood, C. Maxey, H. Weller, and P. Thorne, "High-performance ,low-cost IR detector technology," SPIE Newsroom 15 November (2012).
18. I. Baker and S. Duncan, "A low-noise laser-gated imaging system for long-range target identification," Proc. SPIE **5406**, 133–144 (2004).
19. A. Ashcroft and I. Baker, "Developments in HgCdTe avalanche photodiode technology and applications," Proc. SPIE **7660**, 76603C (2010).
20. I. Baker, D. Owton, K. Trundle, P. Thorne, K. Storie, P. Oakley, and J. Copley, "Advanced infrared detectors for multimode active and passive imaging applications," Proc. SPIE **6940**, 69402L (2008).
21. K. W. Ayer, W. C. Martin, J. M. Jacobs, and R. H. Fetner, "Laser IMaging And Ranging System (LIMARS): A proof of concept experiment," Proc. SPIE **1633**, 54–62 (1992).
22. B. Schmidt, S. Tuvey, and P. S. Banks, "3D sensor development to support EDL (entry, descent, and landing) for autonomous missions to Mars," Proc. SPIE **8519**, 851905 (2012).
23. H. Larsson, F. Gustafsson, B. Johnson, R. Richmond, and E. Armstrong, "Characterization measurements of ASC FLASH 3D ladar," Proc. SPIE **7482**, 748207 (2009).
24. E. de Borniol, J. Rothman, F. Guellec, G. Vojetta, G. Destéfanis, and O. Pacaud, "Active three-dimensional and thermal imaging with a 30- μ m pitch 320 $\times$ 256 HgCdTe avalanche photodiode focal plane array," Opt. Eng. **51**, 061305 (2012).
25. S. Miki, T. Yamashita, Z. Wang, and H. Terai, "A 64-pixel NbTiN superconducting nanowire single-photon detector array for spatially resolved photon detection," Opt. Express **22**, 7811–7820 (2014).
26. M. Jack, G. Chapman, J. Edwards, W. Mc Keag, T. Veeder, J. Wehner, T. Roberts, T. Robinson, J. Neisz, C. Andressen, R. Rinker, D. N. B. Hall, S. M. Jacobson, F. Amzajerdian, and T. D. Cook, "Advances in ladar components and subsystems at Raytheon," Proc. SPIE **8353**, 83532F (2012).
27. M. Halmos, R. Reeder, B. Boland, J. Bulot, and M. Klotz, "Photon Counting LADAR," in *Coherent Laser Radar Conference* (2011).
28. L. Sjöqvist, M. Henriksson, P. Jonsson, and O. Steinvall, "Time-correlated single-photon counting range profiling and reflectance tomographic imaging," Adv. Opt. Technol. **3**, 187–197 (2014).
29. P. Yuan, R. Sudharsanan, X. Bai, P. Mcdonald, E. Labios, B. Morris, J. P. Nicholson, G. M. Stuart, H. Danny, B. Des, T. W. Ne, S. Van Duyne, G. Pauls, and S. Gaalema, "Three-dimensional imaging with 1.06 μ m Geiger-mode LADAR camera," Proc. SPIE **8379**, 837902 (2012).
30. W. E. Carter, R. L. Shrestha, and K. C. Slatton, "Photon counting airborne laser swath mapping (PC-ALSM)," Proc. SPIE **5661**, 78–85 (2004).
31. J. J. Degnan and C. T. Field, "Moderate to high altitude, single photon sensitive, 3D imaging lidars," Proc. SPIE **9114**, 91140H (2014).

32. O. Steinvall, M. Elmqvist, T. Chevalier, and O. Gustafsson, "Active and passive short-wave infrared and near-infrared imaging for horizontal and slant paths close to ground.," *Appl. Opt.* **52**, 4763–78 (2013).

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