



Internationell utveckling inom 3D-laserradarområdet

OVE STEINVALL, TOMAS CHEVALIER, HÅKAN LARSSON, DIETMAR LETALICK

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
Informationssystem
Box 1165
581 11 Linköping

Tel: 013-37 80 00
Fax: 013-37 81 00

www.foi.se

FOI-R--2572--SE Teknisk rapport
ISSN 1650-1942 Oktober 2008

Informationssystem



Ove Steinvall, Tomas Chevalier, Håkan Larsson,
Dietmar Letalick

Internationell utveckling inom 3D-laserradarområdet

Rapportnr/Report no	FOI-R--2572--SE
Rapporttyp Report Type	Teknisk rapport Technical report
Utgivningsår/Year	2008
Antal sidor/Pages	68 p
ISSN	ISSN 1650-1942
Kund/Customer	FM
Forskningsområde Programme area	4. Sensorer och signaturanpassning 4. Sensors and Low Observables
Delområde Subcategory	42 Sensorer 42 Above surface Surveillance, Target acquisition and Reconnaissance
Projektnr/Project no	E3080
Godkänd av/Approved by	Ola Kärvell

Totalförsvarets Forskningsinstitut FOI
Avdelningen för Informationssystem
Box 1165
581 11 Linköping

Innehåll

Sammanfattning	5
Summary	6
1 Översikt	7
1.1 Inledning	7
1.2 System och tekniktrender	7
1.3 Tillämpningar	8
1.4 Nyttan för försvar och säkerhet	10
2 Teknologi	11
2.1 Allmänt	11
2.2 Detektorer	11
2.2.1 Linjära APD (avalanche photodiode) matriser	11
2.2.2 Geigermod APD (GAPD)	15
2.2.3 Amplitudmodulerade CMOS detektormatriser	18
2.2.4 Grindade bildförstärkarrör	19
2.3 Framtida detektorutveckling	21
2.3.1 Adaptive Focal Plane Array (AFPA)	21
2.3.2 Quantum Sensors Program (QSP)	21
2.3.3 Linsfriamerateknik (kodade aperturer)	21
2.3.4 Koherent detektion med enfotonteknik	22
2.3.5 Syntetisk aperturteknik	23
2.3.6 Multiaperturteknik	25
2.3.7 Kodade vågformer	26
2.3.8 Ladar baserad på frekvenskamteknik	28
2.3.9 Bioinspirerad avbildning	30
2.4 Laserkällor	30
2.5 Avsökning, pekning och stabilisering	33
2.6 Fysikaliska begränsningar	35
3 Signalbehandling	38
3.1 Registrering	38
3.2 Detektion	39
3.2.1 Markestimering	40
3.3 Måligenkänning	40
4 System och tillämpningar	42
4.1 Spaning och kartering	42
4.2 Måligenkänning	46
4.2.1 Upplösning för olika tillämpningar	46
4.2.2 Parametrar förutom 3-D	46
4.2.3 Systemexempel måligenkänning och målsökning	47
4.3 Navigering och hinderindikering	51
5 Sammanfattning av system och tekniktrender	55

6	Nyttan av 3D-laser för försvar och säkerhet	56
6.1	Se igenom moln, vatten, dimma	57
6.2	Se igenom vegetation och andra skyl	58
6.3	Känna igen mål på långa avstånd	58
6.4	Hög yttäckningshastighet	58
6.5	Multifunktionssystem	59
6.6	Systemexempel: Lynx	60
7	Diskussion	62
7.1	Spaning och måligenkänning	63
7.2	Kartering	63
8	Referenser	64

Sammanfattning

Rapporten beskriver utvecklingsläget för 3D-avbildande laserradar i ett internationellt perspektiv. Fokus ligger på hårdvara, även om ett mindre avsnitt med signalbehandling förekommer. I huvudsak beskrivs utvecklingsnivån vid forskningslaboratorierna, men till viss del beskrivs även kommersiellt tillgängliga system.

Rapporten ramas in av en beskrivning av tänkbara tillämpningar där 3D-avbildande laserradar ger en förhöjd förmåga. I ett avsnitt beskrivs vilka ökade förmågor för försvar och säkerhet dessa system kan medföra. För- och nackdelar med olika systemlösningar för respektive tillämpning diskuteras.

Rapporten inleds med en sammanfattning av de viktigaste slutsatserna.

Nyckelord: 3D, laserradar, laser, ladar, teknikutveckling

Summary

This report describes the international status of the development of 3D laser radar systems. It focuses on hardware, even though a small section is dedicated to signal processing. Mainly the report describes work performed at the research laboratories, but in some cases commercially available systems are described.

Applications for the defense and security is discussed, where 3D laser radar gives an increased ability. The report also contains a discussion of pros and cons of different system designs.

The first chapter of the report contains an executive summary.

Keyword: 3D, laser radar, laser, ladar, technology status

1 Översikt

1.1 Inledning

Denna rapport utgör del i avrapporteringen till det försvarsmaktsfinansierade projektet *3D-avbildande laser i dynamiska tillämpningar*. Projektet, som pågår 2008-2010, undersöker förutsättningarna att på sikt använda 3D-avbildande lasersystem inom militära tillämpningar.

Termen 3D-laserradar (ladar) brukar i allmänhet tillskrivas en avbildande laser som genererar data i tre dimensioner (punktmoln) eventuellt åtföljda av andra egenskaper som reflektion (intensitet), polarisation mm. Ibland brukas benämningar som 1D- och 2D-ladar, som då avser att man mäter i en respektive två spatiella dimensioner. Termen 1D-ladar åsyftar oftast att man mäter en avståndsprofil, vilket också är en sorts 3D-avbildning, fast i en "pixel" motsvarande en position hos laserloben. Denna information kan vara mycket värdefull för igenkänning på mycket långa avstånd eller för små mål där målet inte är vinkelupplöst. Med 2D-laseravbildning kan lasern ses som en strålkastare som ger en vanlig 2D-bild. Ett viktigt specialfall är grindad avbildning där denna "plana" avbildning endast sker inom ett bestämt avståndsintervall i scenen, styrd av en faltning mellan laserpulsens och kamerans tidsstyrda förstärkningsfunktion. Genom att svepa grindluckan kan en 3D-bild rekonstrueras.

I denna rapport ges en översikt av den internationella utvecklingen inom 3D-ladarområdet med tonvikt på AFRL¹s s.k. Flash-sensor där 3D-data genereras med hjälp av en pulsad laser och en detektormatris där varje pixel kan registrera både avstånd och intensitet. Dessutom diskuteras kombinationer av aktiva och passiva sensorer, för att få ut maximalt av sensordata.

Rapporten kan ses som en uppdatering av motsvarande avsnitt i 2007 års slutrapport [1] med en utökad diskussion om fortsatt systemverksamhet för den svenska försvarsmaktens behov.

Nedan sammanfattas de system- och tekniktrender som vi ser inom 3D-laserområdet tillsammans med tillämpningar och nyttan av dessa system inom försvars- och säkerhetsområdet. I kapitel 3 beskrivs den tekniska utvecklingen på en mer detaljerad nivå.

1.2 System- och tekniktrender

Laserradarområdet utvecklas för närvarande snabbt. Utvecklingen inom området 3D-ladarsystem sammanfattas enligt nedanstående.

Teknologi:

- Nya laserkällor utvecklas ständigt, speciellt intressant är utvecklingen av
 - Fiberlaser, främst vitljuslasrar med bred spektral emission och ultrakorta pulser.
 - Frekvenskamteknik (fs-laser).
 - Diodpumpade fasta-tillståndslasrar (mikrochip, avstämbbara lasrar).
- Nya detektormatriser
 - Större Geigermod APD (128×64) matriser.
 - Koherent detektion och fotonräkning.
 - CMT APD matriser för passiv (MWIR) och aktiv 3D-avbildning.
 - Fortsatt utveckling av matriser med analog detektion (Advanced Scientific Concepts).

¹ AFRL: Air force research laboratory, USA.

- Stark utveckling på processorchip och snabba AD omvandlare. Alltmer kan göras med digital signalbehandling i stället för i den optisk analoga domänen.

Systemutveckling:

- Utveckling mot kompakta tripoder och handhållna ladarsystem samt system för UAV.
- Fortsatt utveckling av JIGSAW-konceptet (se genom vegetation från UAV).
- Fortsatt stark utveckling av lidarsystem för fjärranalys (vind, CO₂, farliga ämnen etc.).
- Nya koncept utnyttjande
 - Direkt/koherent detektion med fotonräkning.
 - Multiapertursystem/3D-avbildning med multivåglängd och fasinformation.
 - Syntetisk aperturladar (SAL), två olika systemkoncept demonstrerade från flygplan.
 - Ladar med extrem precision i avstånd och Doppler (fs-frekvenskamteknik mm.).

1.3 Tillämpningar

De 3D-laserradartillämpningar som hittills studerats har varit spaning och måligenkänning, målsökning, kartering, hinderindikering samt navigering. I tabell 1 ges en översikt och sammanfattning av laserradarnas egenskaper/förmågor och potential visavi status för dessa tillämpningar.

Tabell 1. Översikt av tillämpningar och utvecklingsläget för 3D-laserradar

Tillämpning	Speciell förmåga	Teknisk utmaning/kommentar	Utvecklingsläget
Spaning	"Se igenom" via tids-(avstånds)-diskriminering. Upptäckt av speciella signaturer via aktiv spektral avbildning, polarisation. Optikspaning via retroreflex mm. Dopplereffekten kan ev. även utnyttjas för spaning.	Finna en lämplig kombination och samverkan mellan ladar och annan sensor (passiv EO, radar, signalspaning) för att erhålla ett robust spaningssystem med hög avsökningshastighet. Utnyttja aktiv spektral avbildning med hög avstånds-upplösning (< 10 cm). Stora matriser med många små pixlar som laserdetektor. Se igenom tät vegetation, moln, rök, vatten och eld har demonstrerats. Bl.a. finns operativa system för undervattensbruk. Yttäckningsförmågan vid spaning begränsas av lasereffekt och detektorkänslighet. Med enfoton-känsliga system bedöms 10-100 MPixel/sek som full realistiskt idag. För ett pixelavstånd/fotavtryck på 10×10 cm² ger detta minst 360 km²/h. Flygburen minspaning över vatten används redan operativt.	Minspaning för undervattensminor operativt (ALMDS, 25 system beställda för US navy). Magic Lantern användes i 1:a Gulfkriget. Minspaning landminor (ASTAMIDS) laser plus IR. Försökssystem (JIGSAW, PILAR, ALIRT) främst USA. Flera system utvecklas för att stödja helikopter vid landning (i Afghanistan finns brown out problemet innebärande kraftigt nedsatt sikt vid landning). Motto: See and remember (på hög höjd, håll reda på var hkp är i navsystemet o presentera insamlad 3D-info). Idag finns ladarsystem med ca 2.2 Mpixel/sekund för spaning o kartering.
Måligenkänning	3D-avbildning med hög upplösning för 100-200 pixlar på målet har visat sig ge god måligenkänning. 1D-profilering på långa håll.	Grindad avbildning, 2D eller 3D, är nära operativt införande i attackpodar, eldledningsinstrument samt på UGVer. System för full 3D-avbildning studeras för UAV, flygplan, UGV mm. Framtida intresse inkluderar mm-upplösning bl.a. för kropps- och ansiktigenkänning.	Försökssystem och prototyper finns framtagna Tekniska utmaningar: uppdateringshastighet täckning o upplösning. Tillämpningar för både lång o kort räckvidd. Realtids signalbehandling och presentation. Mycket goda resultat avseende igenkänning med 3D-ladar har demonstrerats bl.a. i målsökar- och UAV tillämpningar samt inom DARPAS E 3D program
Målsökning	Förmåga att ge robust måligenkänning och följning.	Få ned storlek och kostnad på sensorn. Utveckla stora matriser med små pixlar. Vågformsfångning i varje pixel önskvärd. Stor insats inom signalbehandling både sensornära och i form av efterbehandling.	Ett stort antal projekt (främst i USA) studerar eller har studerat laserradar (LOCA-AS, LAM, CMRTD m.fl.)
Kartering	Mycket hög upplösning / noggrannhet (< 10 cm) i x,y,z.	Stor civil marknad. På den militära sidan studeras detta intensivt. Målet att öka yttäckningshastigheten med bibehållande av den höga upplösningen. Sensorerna blir sannolikt mindre och kunna bäras även av mindre UAV:er.	Satsning på detektormatriser med enfotonkänslighet. Samverkan aktiv/passiv EO (motion stereo laser för 3-D) skapar nya möjligheter. Teknisk utmaning: uppdateringshastighet täckning o upplösning.
Hinderindikering	Förmåga till avståndsdiskriminering samt ofta god förmåga att detektera hinder (vagnar, diken etc.).	Laser används för hinderindikering för både UAV och UGV tillämpningar. Teknisk utmaning: uppdateringshastighet täckning o upplösning	Operativa system finns (Hellas Tyskland för hkp, LOAM Selex hkp. m fl) Prototypsystem OASYS USA. Hinderindikering för landfordon, se t.ex. DARPA's Grand Challenge där de vinnande fordonen använder laserskanner för hinderindikering och styrning.
Navigering	1) Terrängnavigering via 3D-kartbild. 2) Omvärldsnavigering laserradar tillsammans med andra sensorer och tolkar omgivningen samt orienterar sig därefter. 3) Yttre inmätning av plattformen.	Ladar provas för navigering både inom o utomhus för landfordon. Ladar för flygburen navigering provas i olika koncept som komplement till GPS (kan vara störd eller falla bort). Man har även visat hur data från en 3D-ladar från UAV kan leda en UGV genom ett komplicerat landskap. Teknisk utmaning: uppdateringshastighet, täckning o upplösning	Ett stort antal prototypsystem både på UGV o UAV Se t.ex. DARPA Grand Urban Challenge etc,

1.4 Nyttan för försvar och säkerhet

3D-laser ger nya förmågor som svårligen kan uppnås på andra sätt. I tabell 2 nedan sammanfattar vi några sådana tillämpningar och fysikaliska begränsningar sätter press på teknologi och metodutveckling.

Tabell 2. Sammanfattande tabell över förmågor och tillämpningar för 3D-laser.

Förmåga	Tekniska utmaningar	Exempel på lösning	Taktiska behov	Exempel på internationell utveckling
Se igenom moln och dimma, grumligt vatten etc.	Klara täta medier med mycket multipelspridning.	Utnyttja "ballistiska fotoner", hög tidsupplösning, hög känslighet (ned till enkelfotondetektion). Bistatiska system.	Flyga ovanför moln och se markmål, se i extremt dåligt väder, se i grumligt vatten.	DARPA program, UAV system (SPI 3-D), kunna landa helikopter och följa fordon med reducerat inflytande av upp- virvlande stoft ("brown-out").
Se igenom vegetation, kamouflage-nät, etc.	Att se igenom tät skyl (ned till djungel) och kamouflagenät med så få vyer och på så kort tid som möjligt.	Hög tidsupplösning, tät sampling, flera vyer som sätts samman. Ev. penetration genom blad med ballistiska fotoner.	Se igenom skog från flyg och markburna plattformar.	JIGSAW, SPI 3D och flera andra 3D-ladar-system.
Känna igen mål långa håll (>10 km fordon, fartyg, flygplan, etc.). Alt. soldater, vapen, missiler, små UAV under 10 km.	Små och många pixlar samt stor mottagarapertur. Relativt hög lasereffekt. Alternativt multiaperturer eller syntetiska aperturer.	Pixelmatriser med pixelavstånd kring 10-15 μm . Syntetisk aperturlidar (SAL) samt multiapertur-system utnyttjande koherent mätteknik. TCSPC-teknik (time correlated single photon counting). Grindade system med kort (10 ps) grindför-måga.	Markmål från flygburna plattformar, luftmål, mål på havet. Alternativt små mål (soldater, missiler, vapen på mellanavstånd 5-10 km). Detaljer som antenner och andra del av mål. Optikklassificering.	UK Selex system, GV system baserade på Intevac eller gen 3 bildförstärkare (Obzerv). SALTI syntetisk aperturlidar (DARPA).
Hög yttäckningshastighet.	Stora detektormatriser, fåfotonskänslighet per pixel.	3D-FPA baserad på konventionell analog detektion alternativt Geigermod.	Kartering, spaning.	Olika lidarstern (Sigma Space corporation, ALIRT, RAIDER.
Multifunktionssystem. Spaning, kartering, igenkänning, inmätning mm.	Flexibla kompakta lösningar, programmerbara vågformer, strålkontroll.	I dag gimbalbaserade lösningar, i morgon lösningar baserade på icke mekanisk strålstyrning och strålformning.	UAV eller fordonsbaserade system, "persistent surveillance", kartering och eldledning i samma system för att korta ledtider.	RAIDER.
Integrerade aktiva/ passiva system	Full integration med samma detektor och optik för passiva och aktiva funktioner. Spaning och igenkänning, samt bekämpning med hjälp av samma typ av sensor.	APD matriser baserad på CMT. Effektiva optiklösningar för olika våglängdsband, zoomfunktion. Utnyttja passiv 3D-avbildning där detta passar o kombinera med laser för att uppnå absolut och hög noggrannhet, klara fall där passiv teknik har svårigheter (skuggor, lågkontrastytor etc.).	Passiv icke röjande spaning, aktiv igenkännings- inmät- nings- och målutpekningsfas.	Selex dual mode CMT detektor. För passiv avståndsmätning baserad på motion stereo se t.ex. [2].

2 Teknologi

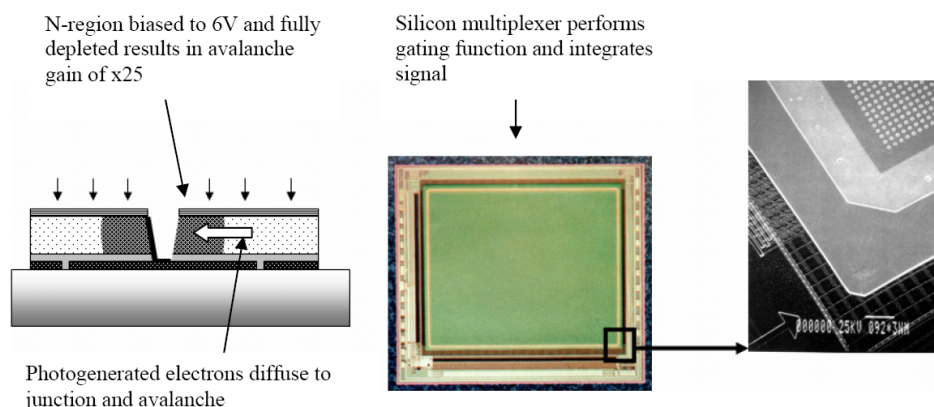
2.1 Allmänt

Ladarsystem med 3D-förmåga kan baseras på olika principer för avståndsmätning. Den vanligaste principen baseras på enkel time-of-flight (TOF) pulssade system med analog direkt detektion. Andra tekniker baseras på fotonräkning i analog eller Geigermod. Koherenta system medger stor mångsidighet med möjlighet till både Doppler, intensitets- och avståndsbildning i samma system, dock till kostnad av viss komplexitet. 3D-avbildning kan uppnås med grindade system där 3D-information. Streakkameror är en annan typ av grindbara kameror med mycket hög upplösning och med mångsidig användning, hittills främst för minspaning. För närmare presentation av de olika teknikerna hänvisas till nyligen publicerade tekniköversikter [3-5]. Nedanstående sammanställning är inte fullständig utan ger endast exempel på utvecklingen under de senaste åren.

2.2 Detektorer

2.2.1 Linjära APD (avalanche photodiode) matriser

APD-matriser baserade på CMT utvecklas av flera aktörer. De som verkar ha kommit längst är Selex [6] i Storbritannien. Två olika detektorkoncept har nyligen redovisats baserade på en CMT-matris och en CMOS-multiplexer för att åstadkomma en snabb grindfunktion respektive att fånga den mottagna signalen. Man har bl.a. utvecklat en detektor som snabbt kan växlas mellan passiv (3-5 μm) och aktiv (1.5 μm) mod, se figur 1. Härigenom kan man erhålla två kamerafunktioner i en enda enhet. Den kombinerade passiva/aktiva detektorn (kallas Swan) styrs mellan de två operationsmoderna med ett enkelt kommando, all intern omställning av bias och pulskontroll sker internt i detektorchipet. I passiv mod har detektorn en känslighet på 16-18 mK (MRTD²) och i aktiv mod (grindad avbildning) ca 10 fotoner rms. Man utvecklar även en matris med full 3D-kapacitet d.v.s. att man erhåller både avstånd och intensitet i varje pixel.



Figur 1. Selex CMT teknologi för aktiv/passiv detektor för 1,5/3-5 μm området. Från ref [6].

För grindad avbildning behöver en CMT-detektor vara ca 100 ggr mer känslig än för en passiv mod och responstiden måste vara 10 000 ggr snabbare. Detta uppnås genom att utnyttja detektorn i lavinmod med en förstärkning upp till 150 ggr (vanligen räcker 20-40 ggr). Dessutom används en

² Minimum resolvable temperature difference

snabb interfacekrets i CMOS-multiplexern samt en grindkrets som snabbt förmår slå av och på dektelementet. Grindningen kontrolleras av lasersystemets värddator. Figur 2 visar detektorteknologin vid Selex. Tyvärr måste detektorn kylas med en liten Stirling-maskin. Detektorn har en standardiserad storlek på 320×256 element och ett pixelavstånd på $24 \mu\text{m}$ (anpassad till diffraktionsgränsen för använd optik). Utveckling sker dock för att dubbla matrisstorleken.

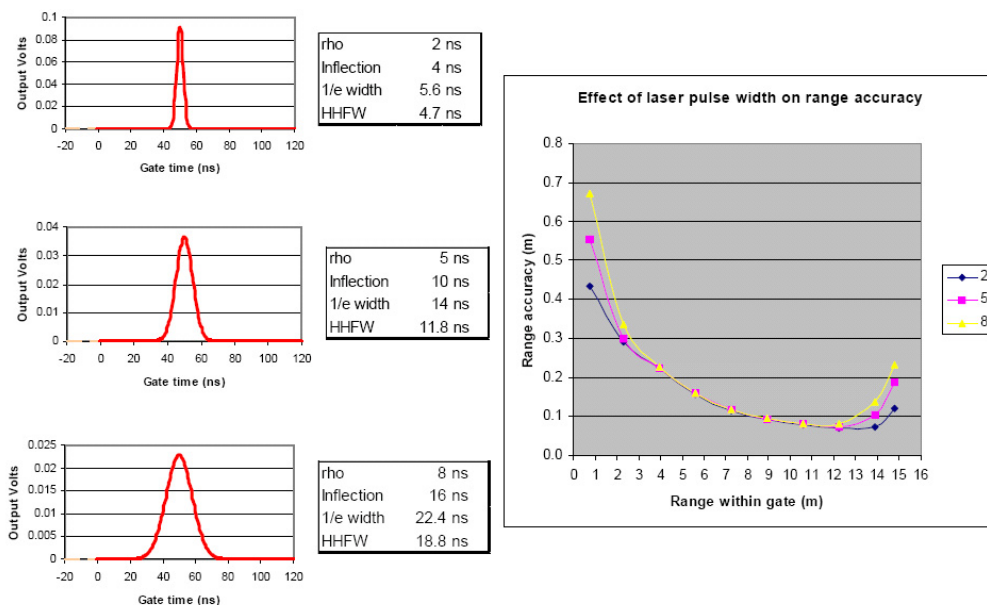
Utveckling av full 3D-avbildning sker även baserad på Selex tidigare grindbara detektorer. Många tekniska lösningar från grindbara detektorer, matris- och pixelavstånd, kyleffekt och klockfrekvens (10 MHz), har behållits. En annan synpunkt som Selex tog hänsyn till var att existerande militära laser med tillräcklig pulsenergi för långa räckvidder har en typisk pulslängd på 20 ns vilket innebär en teoretisk upplösning av 3 m! Kortare pulser ger i allmänhet sämre verkningsgrad vid aktuella pulsenergier (10-100 mJ). Selex har designat detektorn så att ett avstånd kan erhållas inom ett av operatören definierat avståndsintervall. På så sätt kan, med ett givet antal avståndssteg, olika upplösning erhållas av scener med olika djup (avståndsintervall). Det finns också behov att registrera intensitetsvärden för alla avståndsintervall (kanske 10-20). Antalet avståndsintervall måste hållas relativt lågt eftersom detta påverkar pixelstorleken. Sammantaget skulle detta påverka den existerande kretsen för mycket och en helt ny design skulle behövas. Selex har valt en annan lösning för att kunna ta till vara så mycket som möjligt av existerande kamera och detektorteknik. Man kallar principen "autokorrelation" som baseras på analog signalbehandling i varje pixel för att bestämma avstånd och intensitet i separata frames. I själva verket sker avståndsbestämningen genom att ta kvoten mellan intensiteten mellan två frames, en kvot som beror av avståndet om tidskillnaden mellan de två bilderna är tillräckligt kort. Principen med intensitetskvotbildning för att erhålla avstånd är inte ny och lanserades av Sandia m.fl. på 1990-talet.

I 3D-detektorn har man två utläsningar per integrationsintervall. För den termiska detektorn behövs 10 ms integrationstid medan den är $< 1 \mu\text{s}$ för den aktiva moden. Detta är mycket centralt för om man kan erhålla två utläsningar under denna korta tid elimineras inverkan av scintillations- och speckelbrus eftersom dessa vanligtvis har längre tidskonstanter (storleksordningen 1 ms). Samma eliminering sker för andra brusallor (KTC-brus som förknippas med termiskt brus som uppstår när kapacitanser ändras snabbt). Den uppmätta intensitetskvoten beror av laserpulsens läge relativt slutet på grindluckan. Genom att mäta tyngdpunkten för laserpulsläget kan man uppnå avståndsnoggrannheter nedåt 1 ns trots att puls är lång, 20 ns. Ett inneboende problem med metoden är om det finns multipel-ekon per pixel samt pulsträckning p.g.a. en kombination av reflektion och form hos målet inom aktuell pixel. Om man sveper grindluckan kan man reducera multipel-ekoproblemet. Ett typiskt värde för grindlucka är 100 ns motsvarande 15 m i djupledd. Figur 2 visar exempel på avståndsnoggrannheten som funktion avståndet inom grindluckan samt för olika pulslängder. Vid början och slutet av grindluckan blir avståndsnoggrannheten något sämre men i den centrala delen understiger den 15 cm. Detta kan delvis avhjälpas om laserpulsens svans förkortas.

Det finns flera andra aktörer som utvecklar APD-matriser för 3D-ladar. DRS [7] i USA (f.d. Texas Instruments) har visat på en liknande detektor baserad på MCT APD-matriser. Man talar om "gated FLIR" d.v.s. att i samma sensor kombinera passiv avsökning och igenkänning med aktiv 3D-avbildning vid $1,5 \mu\text{m}$. Man har uppnått sub-fotonkänslighet med förstärkning > 300 (kyld i detta fall). Detta är så vitt vi vet bättre än Selex detektor, där känsligheten är 10 fotoelektroner inom 1 μs grindtid.

Vid CEA Leti utvecklas för APD-matriser i CMT för 3D-avbildning i kombination med passiv funktion i 3-5 μm området. Man har demonstrerat försöksmatriser med storleken 10×10 pixlar och 40 μm pixelavstånd [8]. Vid en första test har en avståndsupplösning på 30 cm demonstrerats. Känslighet ned till 100 fotoner per pixel har specificerats. Man uppnådde en förstärkning på 20 vid en bias på 5 V. Leti förbereder en process i 0.18 μm CMOS med möjlighet till mindre pitch. I ett annat arbete presenterat CEA Leti CMT APD-detektorlösningar som kombinerar passiv och aktiv avbildning. Man visade mycket hög känslighet för försöksdetektorer ($\text{NETD} = 17 \text{ mK}$ vid 3-5 μm) och 2

fotoelektroner rms vid 1.55 μm och 50 μs grindtid. Dessa data är klart bättre än vad Selex presenterat. Å andra sidan skedde demonstrationen inte på fullskaliga matriser.



Figur 2. Noggrannhet i avståndsbestämning som funktion av olika laserpulslängder. Från ref [6].

Raytheon utvecklar 3D-fokalplansmatriser (FPA) för ladar. Raytheon publicerade relativt mycket kring 2000-2001 [9] kring 3D-FPA men har på senare år varit återhållsamma med publicering. I en publikation från 2007 [10] visas dock utveckling av 2×128 element matriser med mycket goda prestanda. Dessa detektorer har monterats in i en målsökarfunktionsmodell vid China Lake och uppvisar $\text{NEP} < 1 \text{ nW}$ (ned till 0.15 nW eller 12 fotoner för en 10 ns matchat pulsmottagare vid 1.55 μm våglängd). Förstärkning > 100 , 3% uniformitet inget överskottsbrus och GHz-bandbredder har vidare demonstrerats vid 300 K. Raytheon har ett kontrakt med US Air Force att tillverka CMT MBE (molecular beam epitaxy) APD's samt att produktionsanpassa tillverkning av dessa och större matriser genom att odla dem på stora kiselkivor, upp till 182 cm^2 . Figur 3 illustrerar denna utveckling.

Raytheon rapporterade nyligen mer från denna utveckling [11]. Andra aktörer som utvecklar 3D-FPA baserade på CMT och InGaAs inkluderar bl.a. Voxtel. De har nyligen presenterat resultat [12] med multistegs InGaAs APD med känsligheter närmare sig en foton i linjär mod och vid GHz bandbredder (se figur 4 för illustration av linjär mod och Geigermod). Linjär mod har fördelen att inte uppvisa någon dödtid för detektorns återhämtning och kan därmed detektera vågformer till skillnad från Geigermoddetektorer.

En intressant ROIC krets som fångar hela vågformen har utvecklats av Advanced Scientific Concepts (ASC) [13]. Varje enhetscell i matrisen arbetar oberoende av den andra och ansluts till ett oberoende detektorelement. Detektorchipet monteras direkt mot ROIC:n enligt figur 5. Varje pixel innehåller en krets som fångar vågformen. F.n. har 10 avståndsceller @ 420 MHz sampling (0.36 m) demonstrerats med en InGaAs APD matris om 128×128 pixlar. Man arbetar med att öka känsligheten och minska pixelstorleken som tyvärr är väl stor (100 μm) för att kunna åstadkomma riktigt hög vinkelupplösning. Multiplexlogik ingår i varje pixelkrets. ROIC:en kan kombineras med ett flertal detektormatriser t.ex. InGaAs, CMT PIN eller APD. Ett intressant alternativ för mycket hög känslighet är att kombinera ROIC:en direkt med ett bildförstärkarrör enligt figur 6. I detta fall interagerar de frigjorda fotoelektronerna direkt i ROIC:ns kiselchip.

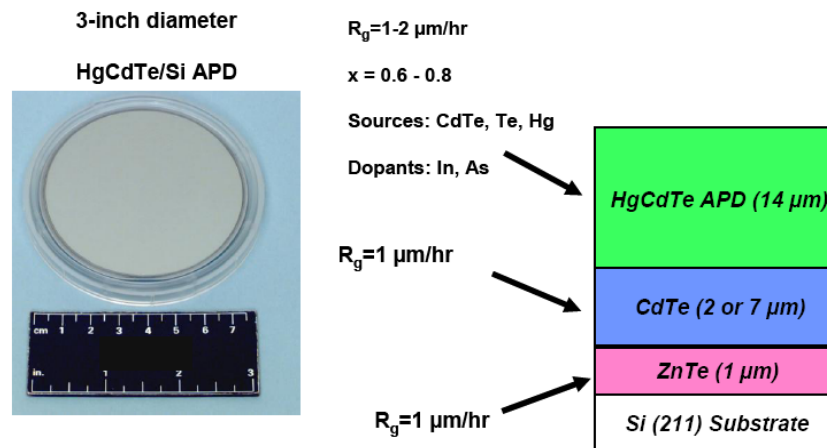
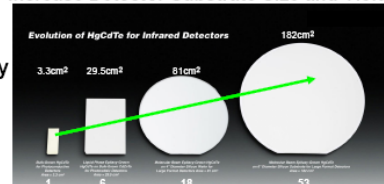


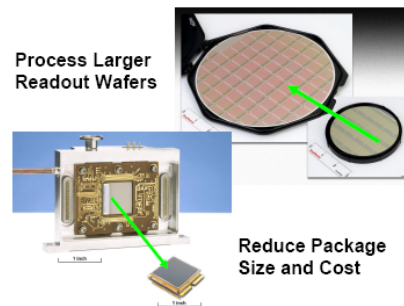
Figure 14 HgCdTe APDs on Si: MBE Growth Results and Process Sequence

- MBE Material Growth
 - Defect Reduction
 - Improved Yield and SCA Operability
- Process Improvements
 - Transition ROIC and Detector Processing to Production
 - Achieve Reduction in Detector/SCA Test and Hybridization Times
- Large Substrates/Silicon
 - Growth on Large 30cm² CZT
 - Transition to Growth on 6" Silicon,
- Packaging Cost Reduction
 - Develop Low Cost Package (IDA) and Packaging Process
 - Implement Rate Tooling

Increase Detector Substrate Size and Yield

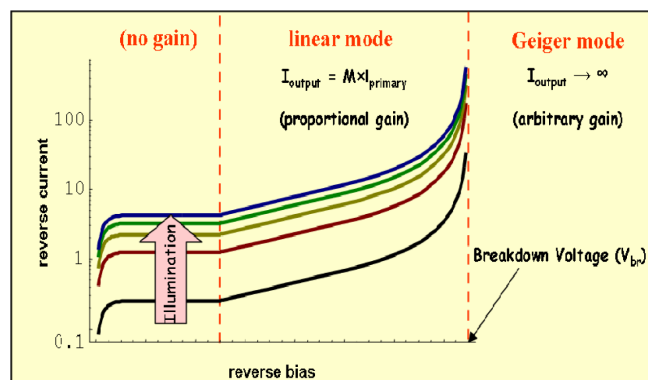


Process Larger Readout Wafers

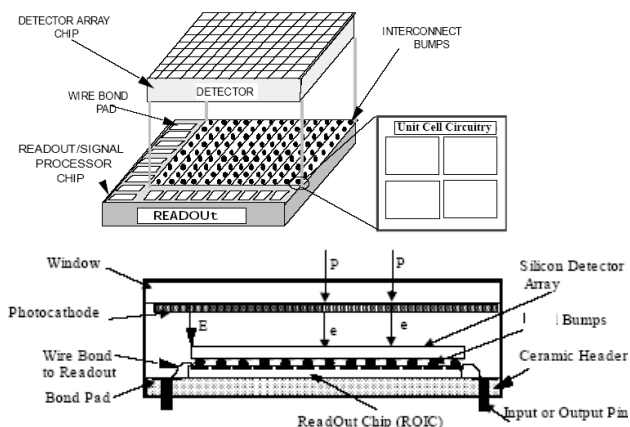


Reduce Package Size and Cost

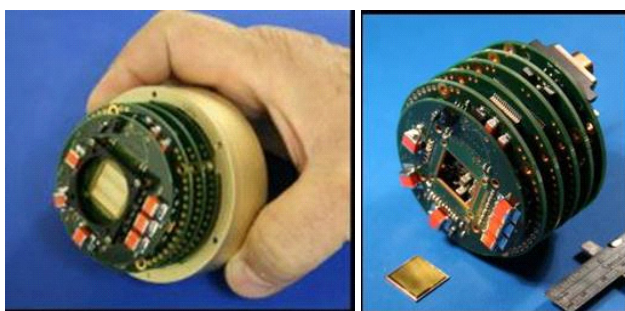
Figur 3. Den övre bilden visar CMT-tillväxt på kisel och den under illustrerar de steg som tas för att sänka kostnader och produktionsanpassa 3D-FPA. Källa Raytheon, [10].



Figur 4. Illustration av linjär respektive Geigermode hos avalanche detektorer (APD).



Figur 5. T.v. principen för en hybrid 3D-FPA enligt Advanced Scientific Concepts [13].



Figur 6. Advanced Scientific Concepts 128*128 matris med tillhörande detektor och elektronik. Källa <http://www.advancedscientificconcepts.com/>.

2.2.2 Geigermod APD (GAPD)

Vid sidan av linjära APDer sker mycket utveckling inom området Geigermod APDer. (GAPD). MIT [14, 15] Lincoln Laboratory har utvecklat GAPD för flera olika 3D-ladarsystem (JIGSAW, ALIRT m.fl.). Man har utvecklat matriser både i kisel och för InGaAs. Nyligen har denna teknologi förts över till industrin (Boeing Spectral Lab). De fördelar med GAPD som kan anföras är:

- Direkt överföring från foton till digital information
- Hög uniformitet till följd av att detektor drivs till mättnad
- Hög känslighet – i princip enfotondetektion (1 foton vid $1,55 \mu\text{m}$ motsvarar $\text{NEP}=0,015 \text{ W}$ vid en bandbredd matchande 10 ns).
- Sub-ns-upplösning (avståndsupplösning högre än 15 cm).

Dock har GAPD några nackdelar som

- Mättnadsdetektion - detta innebär att man inte får någon intensitets- (reflektions-) information
- För att en vågform skall genereras krävs många multipla pulser som bygger upp ett tidshistogram - detta tar tid samt leder till krav på laser med hög (många kHz-MHz) prf (pulsrepetitionsfrekvens) vilket ger tvetydighetsproblem.
- Dödtid - efter en fotondetektion är detektorelementet dött en viss tid.
- Falsklarm och begränsningar i dagsljus. Se t.ex. Marcus Henriksson [16].

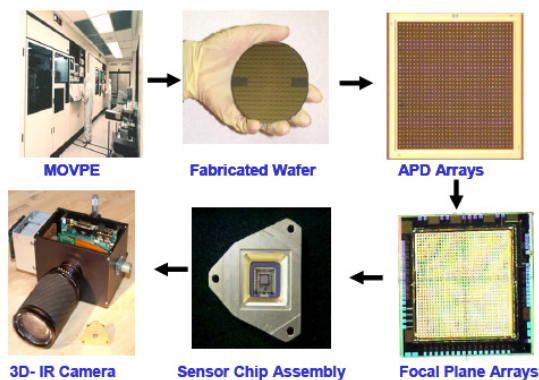
Phil Gatt [17] från CTI (numera Lockheed Martin Coherent Technologies) har analyserat den s.k. dödtidens inverkan på SNR och detektionsstatistik. Dödtiden uppstår eftersom detektorn är blind en bråkdel av en μs innan den på nytt kan registrera en foton.

Det skall dock noteras att enkelfotondetektion kan göras utan operation i Geigermod (se Voxel ovan samt Sigma Corp., som baserar en 10×10 matris på Hamamatsu Segmented Anode Microchannel Plate Photomultiplier (MCP/PMT)³. Följande egenskaper anges:

- En MCP/PMT med 100 anoder stödjer 100 kanaler
- Enkelfotonkänslighet med en GaAsP fotokatod har demonstrerat 32%-40% kvantverkningsgrad.
- Snabb stigtid (~ 170 ps) ger cm-noggrannhet.
- Ingen (0) dödtid (jfr. 50-100 ns för APD's).
- Låg mörkerström (ca 30 kcounts/s) över alla anoder.

Hamamatsus 10×10 -matris har dock mycket stort pixelavstånd (2.2 mm) vilket begränsar användbarheten i högupplöst avbildande system. För lidar däremot fungerar den utmärkt [18].

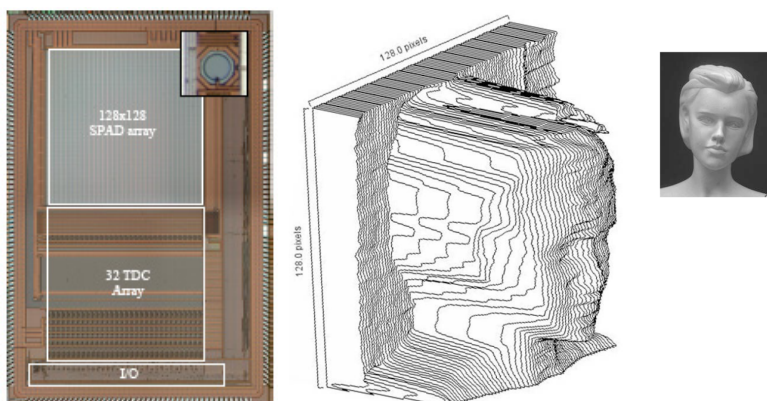
MIT har utvecklat 64×64 element GAPD [19] med $50 \mu\text{m}$ pixelavstånd. Chipen baseras på full 3-dimensionell integration mellan tre plan, ett detektorplan och två CMOS plan för tidsmätning. Boeing [20] har övertagit och industrialiserar MIT:s GAPD-matriser, se figur 7. Det skall noteras att en optimal operation av GAPD inte är trivial främst p.g.a. fenomen som mättnad och nödvändighet till snabb återställning efter detektion (detektorn har en viss dödtid). Nyligen har MIT Lincoln Lab [21] utvecklat en algoritm som med konstant falsklarmsannolikhet (CFAR) minimerar insamlingstiden. Simuleringar och experiment har validerat algoritmen. En GAPD kan operera nära en ideal linjär fotodetektor om man anpassar laserns prf så att man i snitt per puls detekterar mindre än en fotoelektron.



Figur 7. Exempel från Boeings tillverkaning av 3D-kamera som använde en 32×32 GAPD matris.

Nyligen har en grupp vid Ecole Polytechnique i Lausanne rapporterat om 128×128 element GAPD matriser [22], se figur 8. Pixelavståndet var $25 \mu\text{m}$. Man har uppnått mycket hög avståndsnoggrannhet (mm-noggrannhet). Samplingen sker med en tidsupplösning på 97 ps över 100 ns. Mörkerströmmen uppges till 284 Hz i medeltal. Matrisen är baserad på kisel med en våglängdstäckning mellan 350-800 nm och en kvantverkningsgrad på max 40 % (vid 460 nm). Millimeternoggrannheten uppnås genom medelvärdesbildning över flera pulser. Sedan beräknas avståndet från tidshistogrammet som kommer att utgöra "vågformen" i varje pixel. Denna bearbetning kan göras i realtid.

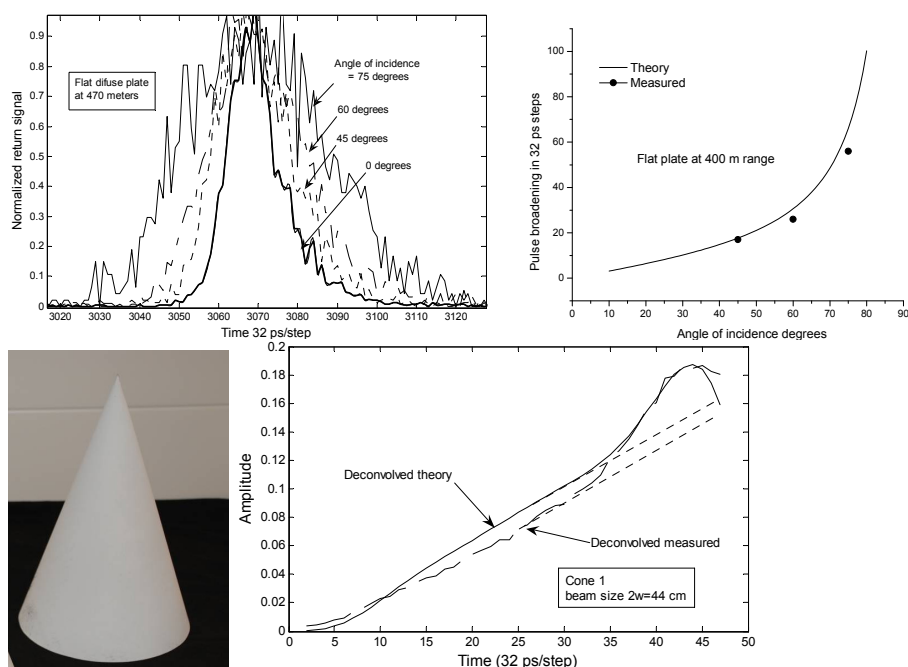
³ http://209.73.52.252/assets/pdf/parts_R/R8520U-00-C12.pdf



Figur 8. T.v. Foto av sensorchipet med en pixel förstörd uppe t.h. Kretsen är tillverkad 0,35 μm CMOS teknologi. T.h. en 1 bild upptagen under 1 sekund med en 1 mW (40 MHz prf) laser som belyser 1 m^2 yta på knappt 4 m avstånd. Avstånds-osäkerheten är ca 1,4 mm.

Vissa företag inriktar sig på att få ned kostnaden på matriserna för att erbjuda ladarsystem för mängdtillämpningar. Företaget Apeak integrerar GAPD-matriser med AQC's (quenching circuits), TDC (time to digital converter), grind och andra programmerade funktioner i FPGA:er. Detta förkortar utvecklingstiden jämfört med ASIC (med en faktor 2-10) och ger flexibla ROIC till lägre kostnad. Man förutser en stegvis uppgraderingsmöjlighet till större matriser.

På FOI har vi gjort liknande mätningar fast med ett endektorsystem [23, 24], se figur 9. Med mm-noggrannhet och en avståndsupplösning under 6 cm på 470 meters avstånd har demonstrerats. Med denna typ av avståndsnoggrannhet kan den geometriska pulssträckningen till följd av olika ytformer mätas och formen för små objekt uppskattas. T.ex. kan infallsvinkeln mot en plan yta bestämmas (se figur 9). Detta är av intresse att kunna göra i varje pixel för att på så sätt ytterligare för en god uppskattning av objektets form.



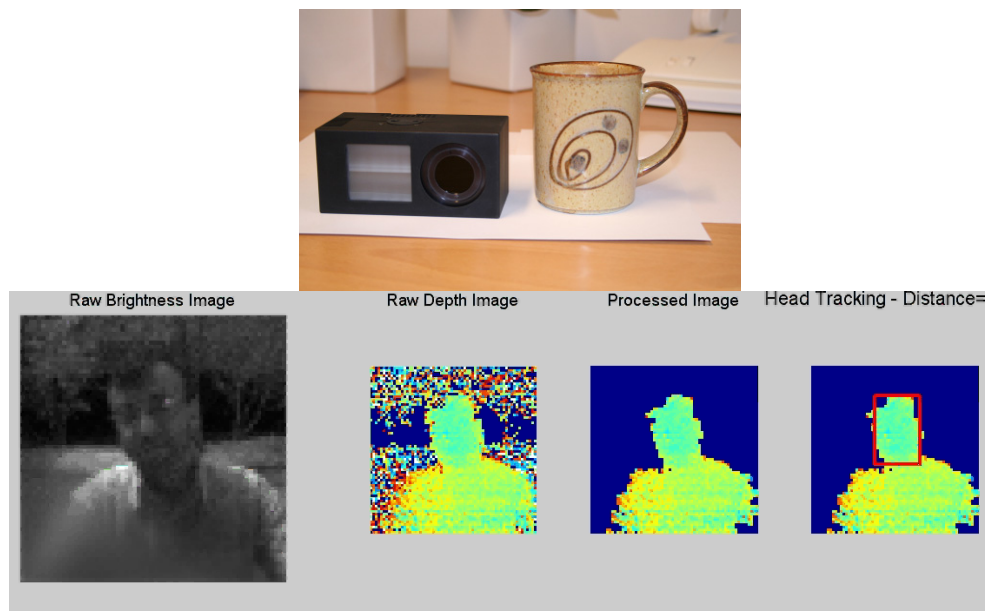
Figur 9. Överst t.v. visas laserpulssvar från en plan diffus yta som betraktas under olika infallsvinklar och t.h. den härledda infallsvinkel baserad på den förväntade pulssyträckningen. Laserfläckens diameter var 12 cm. Den bilden visar en kon med längd 22 cm och konvinkel 18,6 grader. T.h. den uppmätta pulsformen (avfärdad systemresponsen (tidskonstant för (detektor + laserpuls)) jämfört med den teoretiska.

2.2.3 Amplitudmodulerade CMOS detektormatriser

Andra koncept för 3D-FPA utvecklas också. En vanligt utnyttjad princip är ”photonic mixing”, där en backspänningen för en standard CMOS fotodiodmatris moduleras med samma frekvens som den transmitterade laserstrålen. Fotodiodens respons innehåller därmed en blandning mellan förstärkningsmodulation och den modulerade retursignalen som blivit fasskiftat till följd av tidsfördröjning över aktuellt avståndintervall. Tekniken benämns *AM-homodynladar*.

Flera grupper [25, 26] har byggt och demonstrerat AM-homodyn-ladarsystem. Dessa system lider dock av två nackdelar, den första rör tvetydighet i avstånd när noggrannheten skall öka (högre modulationsfrekvens). Lösningen till detta är att använda flera frekvenser till priset av ökad komplexitet. Den andra nackdelen rör tvetydighet vid multipla mål inom samma pixel. Här produceras något slags medelvärde av avståndsinformation inom samma pixel. Problemet kan reduceras med utnyttjande av frekvensmodulering (FM-chirp). Denna teknik har tillämpats för både direktdetekterande [27] och koherenta [28] system. I en *chirp* varierar frekvensen linjärt med tiden. Exempelvis har man byggt system med startfrekvenser på 200 MHz till en slutfrekvens på 800 MHz. Gränserna sätts av laser och detektorbandbredd. Avståndsupplösningen för ett sådant ladarsystem blir $\Delta R = c/2\Delta F = 250 \text{ mm}$ för $\Delta F = 600 \text{ MHz}$. Det finns flera metoder att modulera lasern, exempelvis direkt amplitudmodulering för icke koherenta system, samt direkt frekvensmodulering eller fasmodulering för koherenta system.

För en typisk laserdiod med en bandbredd på 2 GHz uppnås t.ex. en avståndsupplösning på 75 mm. Det är klart att för mm-upplösning så blir denna teknik opraktisk till följd av extrema bandbredder. Detta gäller i och för sig även för pulssade system även om det där är lättare att öka noggrannhet och upplösning genom signalbehandling. Det finns ett antal kommersiella system [29-31] som baseras på fasmodulering för avståndsmätning. Dessa är främst avsedda för industriella tillämpningar med begränsad räckvidd (10-tals meter) och avståndsnoggrannheter i mm-cm området. FOI har undersökt en av dessa (Canesta, se figur 10). Principen kan utnyttjas för längre räckvidder genom att öka lasereffekten. Ett exempel på ett sådant system är Sandias [32] system. Man uppger en avståndsnoggrannhet på 5 mm.



Figur 10. Kamera från Canesta som undersökts vid FOI. Under visas bildexempel.

Inom området undervattensavbildning har 3D avbildande tekniker varit intressanta för att öka kontrasten för mål visavi botten eller omgivande vattenvolym och att kunna göra detta på långa avstånd. I kustvatten kan siktdjupen i många fall understiga 1 meter och här behövs förbättrade

räckvidder, kontrast och upplösning vid optisk undervattensavbildning. På FOI har vi studerat grindad avbildning [33] samt skannande lidarteknik [34, 35] för undervattensavbildning. För närvarande bedrivs ingen FOT-verksamhet inom området undervattensavbildning.

Inom undervattensavbildning och sensorn i vattnet har man typiskt uppnått 5-7 dämpningslängder med kontinuerlig linjeskanner och 9 dämpningslängder indikeras via simuleringar med pulsad linjeskannerteknik, där tidsgrindning kombineras med spatiell filtrering för att undertrycka bakåtspridning från vattnet [36-38]. Mullen [39] vid NAVAIR i USA har sedan en längre tid arbetat med modulerad laser för att öka avbildningsförmågan i vatten. Idén är att om man gör koherent detektion på den modulerade reflekterade vågformen och använder modulationsfrekvenser i 10-100 MHz-området så kan man med radarsignalbehandling undertrycka spridning (ger icke-koherenta bidrag) och utöka avbildningsförmågan, speciellt i starkt spridande vatten. Metoden optimerar bl.a. energi per pixel och kan förmodligen uppnå resultat i paritet med (eller bättre än) de två andra teknikerna.

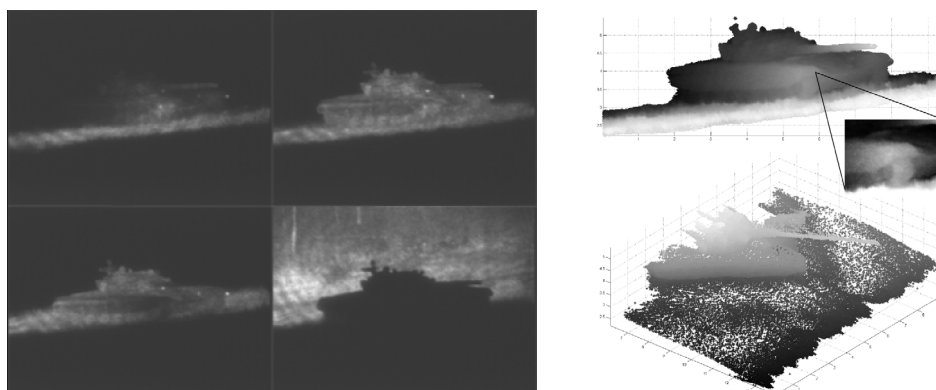
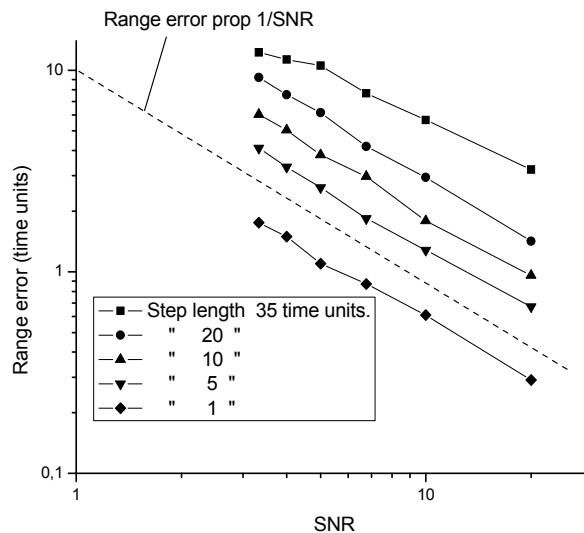
2.2.4 Grindade bildförstärkarrör

Grindbara bildförstärkarör har använts en tid. 3D-bilder kan erhållas genom att ensa en serie 2D-bilder upptagna med glidande grindlucka. Detta kan ske med en upplösning som är med är en faktor 10 ggr bättre än den som ges av faltningen mellan laserpuls längden och grindluckan. Vid FOI har grindad avbildning studeras under de senaste åren[40-44]. Figur 11 illustrerar 3D-avbildning och den avståndsnoggrannhet som kan uppnås vid 3D-rekonstruktionen. Denna beror av grindluckans steglängd, stigtid och laserpuls längden enligt Andersson [45]. Nyligen har andra modulationstekniker studerats t.ex. linjär förstärkningsvariation inom grindluckan för att extrahera reflektions- och avståndsinformation. Detta sker genom att snabbt ta (alternativt via två kameror) två bilder av ett scenavsnitt och bilda kvoten mellan den bild som upptagits med linjärt ökande förstärkning och den som sker under konstant förstärkning. Metodens finess är bl.a. att resultatet blir oberoende av laserpulsens utseende samt att 3D-avbildning kan uppnås med 1-2 pulser i stället för ca 10 . Metoden har demonstrerats experimentellt [46].

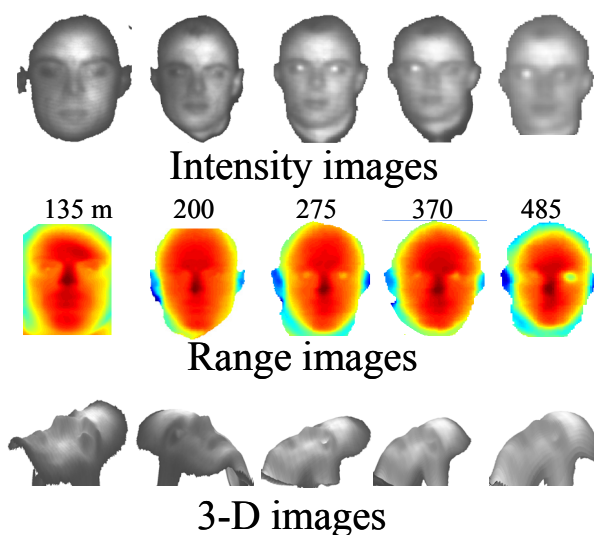
Grindbara bildförstärkarör finns hos flera tillverkare. Xybion tillverkar rör med god spatiell upplösning (upp till 60 linjepar/mm) och god tidsupplösning. Tyvärr erbjuder Xybion inga rör vid ögonsäkra våglängden 1,5 μm vilket däremot Intevac [47] gör. Dessa uppvisar en spatiell upplösning på 32 lp/mm, en pixelstorlek på 12 $\times$ 12 μm , en bildtakt på 30 Hz och stig/falltid hos grindlucka på < 75 ns. Dynamiken är 48 dB och utläsningsbruset är ca 100 e⁻/pixel (efter förstärkning). FOI har god experimentell erfarenhet av både Xybions och Intevacs kameror.

Stanford computer optics [48] tillverkar en serie ultrasnabba kameror med steglängder och grindluckor ned till 10 ps! (motsvarar 1,5 mm). FOI har nyligen beställt en sådan kamera. Jens Busck et al. vid dåvarande FOFT i Danmark har demonstrerat [49] avbildning av minor och ansikten med sub-mm noggrannhet, se figur 12.

Kaman Aerospace Corporation [50] och Dalsa Corporation har utvecklat en ny kamera som kan arbeta i en "burst"-mod vid en bildhastighet på 100 Mbilder/sek. Den initiala designen inkluderar 64 $\times$ 64 $\times$ 16 lager vid 380 Hz bildtakt. Varje skur om 16 bilder bildar en datakub som är 160 ns djup. Tillämpningen avses vara undervattensavbildning.



Figur 11. Överst visas avståndsfelet vid 3D-rekonstruktion som funktion av signalbrusförhållandet (SNR) och för olika stegförflyttningar hos grinluckan mellan successiva bilder. Under visas exempel på 3D-rekonstruktion med en laserpulslängd på 4 nsgrindlängd på 40 ns och 10 ns steglängd. Avståndsnoggrannheten i den 3D-rekonstruerade bilden är ca 10 cm (0,6 ns).



Figur 12. Exempel på 3D-avbildning av ansikten på strax under 500 meters avstånd med Stanford Picokamera och en 0.5 ns mikrochip laser. Från Busck [44].

2.3 Framtida detektorutveckling

Några intressanta koncept på detektor-/mottagarsidan bedrivs i USA i DARPA:s regi och till vissa delar i England. Några av dessa listas nedan, och beskrivs i följande avsnitt.

- Adaptiv fokalplansmatris (AFPA)
- Quantum Sensors Program (QSP)
- Kodade aperturer
- Koherent detektion med enfotonteknik
- Syntetisk aperturteknik
- Multiaperturer
- Kodade vågformer
- Ladarbaserad på frekvenskamteknik
- Bioinspirerad avbildning

2.3.1 Adaptive Focal Plane Array (AFPA)

Målet med detta DARPA-program är att demonstrera en FPA som är brett elektriskt tonbar i våglängd oberoende över varje enskild pixel och på så sätt göra möjligt till multispektral avbildning på ett enskilt chip. Utvecklingen avser främst multi- och hyperspektral passiv avbildning men teknik är naturligtvis intressant för aktiva avbildning också, speciellt med kommande bredspektrala laser som den ”vitljuslaser” som nyligen köpts in vid FOI [51]. Tekniken sägs medge en avvägning mellan spektral och spatiell upplösning. Sensorn sägs förena hyperspektral förmåga med ”FLIR”-förmåga utan att lida av den stora vikten hos hyperspektrala sensorer och det dåliga signal-till-klotterförhållandet hos FLIR.

2.3.2 Quantum Sensors Program (QSP)

Detta DARPA-program tillämpar fenomen från kvantmekaniken för att förbättra prestanda hos avbildande sensorer utöver vad som förutsägs av de vanliga ”klassiska” fysiklagarna. Vinkelupplösningen ges som bekant av λ/D där λ är våglängd och D aperturdiametern. Med ett kvantmekaniskt synsätt kan högre vinkelupplösning uppnås för ett kvanttillstånd med högre energi motsvarande en kortare våglängd. För flera fotoner kan ett tillstånd benämnt *entanglement* (”intrassling”) uppstå där två ”röda fotoner” kan erbjuda samma upplösning som för en ”blå” foton. Detta har visats i laboratorieexperiment. Om man lyckas att på ett praktiskt sätt frikoppla upplösning från faktisk våglängd så får vi ett genombrott på den optiska sensorsidan inte bara för laserradar utan även för passiva EO-sensorer.

2.3.3 Linsfri kamerateknik (kodade aperturer)

Den gamla pinnhålskameran hade flera fördelar: stort skärpedjup samt frånvaro av kromatisk aberration. Ju mindre pinnhål ju bättre blir upplösningen. Tyvärr medför detta att mycket lite strålning tränger in i kameran. Om man ersätter ett enkelt pinnhål med en pinnhålsmask kan man emellertid höja ljusstyrkan och även digitalt avfalta den sammansatta bilden från de störningar som masken ger så att en skarp bild erhålles [52]. Pinnhålsmasker eller kodade aperturer som man även kallar tekniken har använts av röntgenastronomer [53] i årtionden p.g.a. av svårigheten att realisera fokuserande element (linser) för röntgenstrålning. Om man kan realisera denna typ av linsfri kamerateknik med programmerbara masker så skulle flera potentiella fördelar kunna utnyttjas; exempelvis kombination av smalt och brett synfält, tålighet mot lasermotmedel (låg retrosignatur) samt möjlighet till konform utformning, d.v.s. integration i plattformens skal. Eftersom svagheter med pinnhålsteknik är ljussvagheten kan det vara av intresse av att fundera över vad laserbelysning kan tillföra. Förutom

mörkerkapacitet kan lasern belysa olika delar av scenen anpassat till den variable masken. Icke-mekanisk strålstyrning med olika fasstyrningsprinciper skulle kunna nyttjas för att distribuera laserbelysning i samklang med maskbyten.

DARPA har ett program som heter LACOSTE (Large Area Coverage Optical Search-while-Track and Engage) som syftar till att från en enda sensor täcka in ett stort vinkelområde. Man avser att samtidigt kunna täcka in ett stort område (500 km^2 , typiskt en stads storlek) samtidigt som man befinner sig på stort avstånd (20 km).

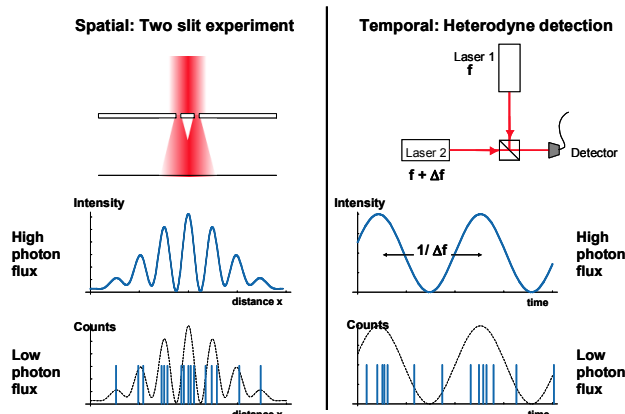
Den tekniska och praktiska utmaningen för den adaptiva pinhålsmaskningen (kodade aperturtekniken) är att skapa små snabbt adresserbara pixlar (millisekund eller kortare) som har god kontrast och drar lite effekt; allt detta till en låg kostnad. Slinger et al. [54] diskuterar kodad aperturteknik och tillämpningar.

2.3.4 Koherent detektion med enfotonteknik

Richard Heinrichs på MIT Lincoln Lab [55] utvecklar koherent detektion med fotonräknande detektormatriser. Det intressanta med detta är att man härigenom undviker det stora problemet med hög lokaloscillator-(LO)-effekt per pixel. Vid analog detektion brukar $\sim 1 \text{ mW}$ per pixel behövas för att bli hagelbrusbegränsad. Detta motverkar stora matriser, exempelvis skulle en 10 kpixel-matris behöva belastas med en total LO-effekt av 10 W ! Med en fotonräknande GAPD-matris kan även LO-effekten vara av samma storleksordningen som signalen d.v.s. enstaka fotoner undre samplingstiden och LO-effektbelastningen blir då försumbar. Man kan se många fördelar med detta:

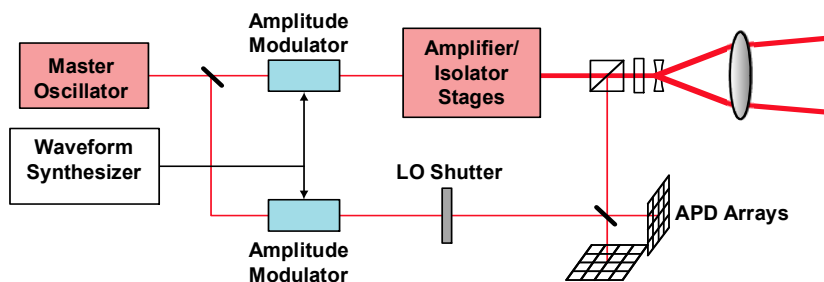
- Både direkt och koherent detektion i samma detektor (Doppler + 3-D) och med samma laser
- Stora matriser (ROIC registrerar bara tid för anländande foton, låg LO-effekt)

En jämförelse mellan konventionell koherent detektering och fotonräknande koherent detektering visas i figur 13, omsatt i ett multifunktionssystem kan det resultera i figur 14. LO-slutaren medger växling mellan direkt och koherent detektion. Master-oscillatorn och amplitudmodulatorerna medger sändning av olika vågformer. Två detektormatriser ger möjlighet att detektera både vertikal och horisontell polarisation.

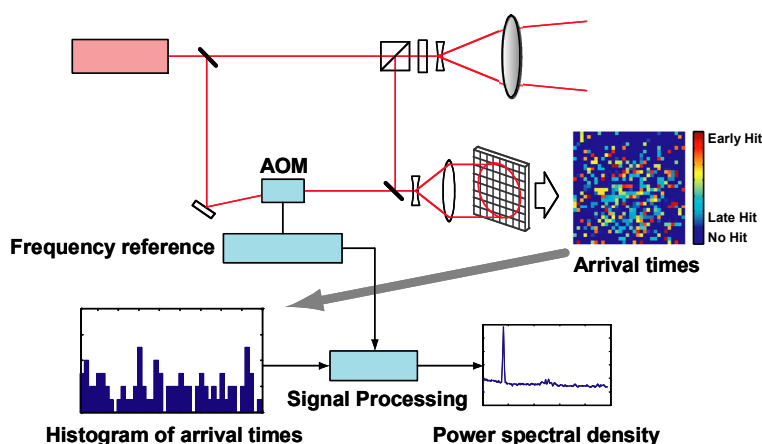


Figur 13. Koherent detektion/interferens vid höga och låga fotonflöden. (Källa R. Heinrich MIT, ref [46]).

Figur 15 visar principen för 3D- och Doppleravbildning med GAPD-matriser. I varje pixel detekteras under varje LO-period tiden för anländande fotoner. Detta ger ett tidshistogram som efter FFT ger Dopplerinformation. Samtidigt erhålles även avståndet i varje pixel. Detta kan även mötas med direkt detektion med fördelen av lägre speckelbrus. Tidsupplösningen hos chipklockan (2 GHz för MITs detektor) bestämmer bandbredden.



Figur 14. Koncept för ett direkt/koherent system baserat på GAPD-matriser. Högupplöst Doppler-avbildning, polarisation och 3D-avbildning möjliggörs i samma sensor. Källa R, Heinrichs MIT ref. [46]

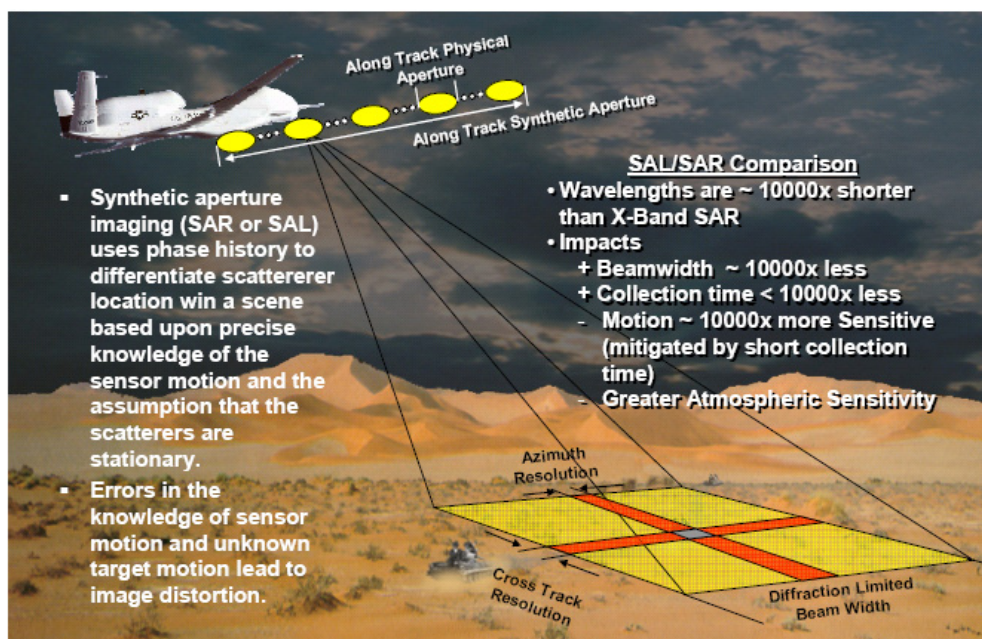


Figur 15. Koherent detektion med GAPD. Källa R, Heinrichs MIT, ref. [46].

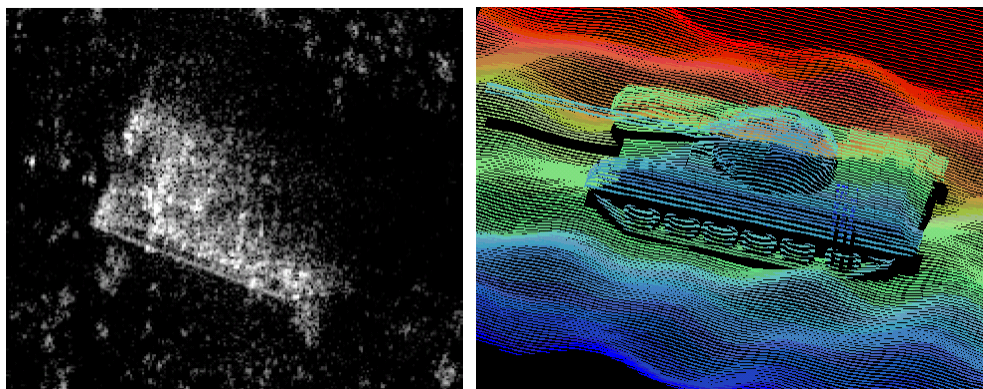
2.3.5 Syntetisk aperturteknik

DARPA programmet SALT - *Synthetic Aperture Lidar for Tactical Imaging*, behandlar syntetisk aperturlidar. Man har nu för första gången flugit två olika syntetiska apertur-ladarsystem med "unprecedented 3D renderings of extended diffuse targets", se figur 16. Man talar om system som skall identifiera mål på 20-30 km för taktiskt bruk eller t.o.m. för rymdbaserade system med möjligheter att avbilda från geostationära satelliter. Alla bilder från SALT är hemliga men man har visat en jämförelse mellan en SAR bild och en simulerad SAL bild (figur 17). Eftersom SAL använder sig av optiska våglängder blir bilderna mer lika "fotografier" jämfört med SAR-bilderna där reflektionen sker i en helt annan geometrisk skala.

Det finns för- och nackdelar med SAL jämfört med SAR. Tabell 3 jämför några egenskaper mellan SAL och SAR. Den stora skillnaden i våglängd medför att SAL har ca 10 000 ggr kortare exponeringstid och följaktligen 10 000 ggr kortare syntetisk antenndiameter jämfört med RF SAR. Vidare ger den optiska våglängden mer tolkningsbara bilder och 3D-avbildning med mycket högre upplösning jämfört med SAR. Laseremission har låg röjningsrisk (inga sidolobber) samt medför inte något problem med frekvensallokering som man har vid RF-frekvenser. Den stora nackdelen med SAL är naturligtvis beroendet av atmosfären både avseende turbulens och dämpning. Viss väderpenetration kan ske men på bekostnad av högre sändareffekt. En mer fundamental begränsning kan ges av atmosfärsturbulens. Man skiljer på olika fall avseende atmosfärens koherensdiameter r_0 (det transversella avstånd relativt strålen över vilken ingen nämnvärd fasdistorsion sker). I området 1 ($V_{T_{exp}} > r_0$), är turbulensbegränsningen försumbar, i område 2 ($D < r_0 < V_{T_{exp}}$) kan bilder erhållas dock efter viss signalbehandling såsom autofokusering. I område 3 ($r_0 < D$) är det svårt att erhålla god avbildning.



Figur 16. Principen för syntetisk aperturladar (SAL) och jämförelse med konventionell X bands-SAR. (Tomlinsen et al. [55]).



Figur 17. T.v. en RF SAR bild och t.h. en simulerad SAL bild. (Tomlinsen et al. [55])

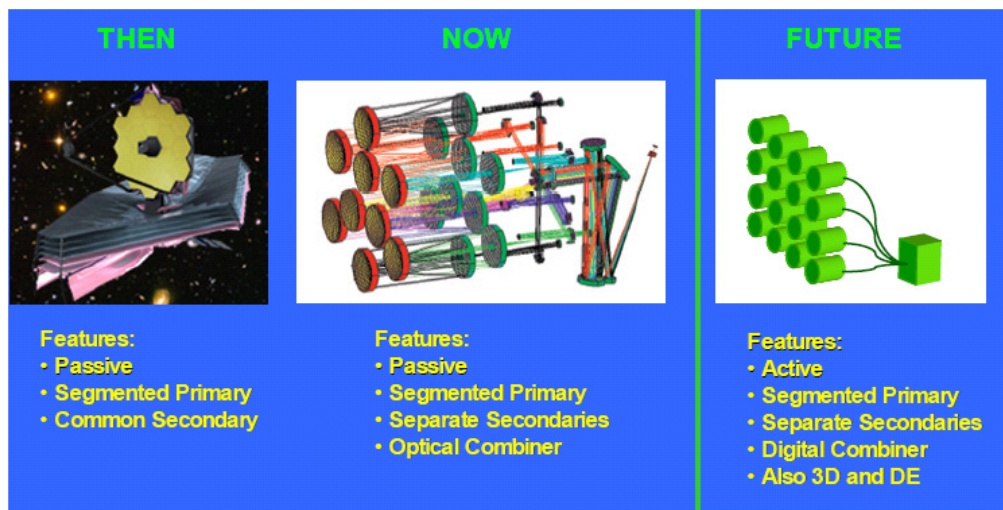
Tabell 3. Jämförelse mellan SAL och SAR.

Egenskap	SAL	SAR	Kommentar
Hög upplösning	+	0	Upplösning λ/D eller λ/VT_{exp}
Tolkningsbarhet	++	0	Optiska våglängder ger bilder som vi är vana att tolka
Exponeringstid	++	0	T_{exp} ca 10 000 ggr kortare
Synfält	0	++	Strålbredd λ/D
Väderberoende	0	++	Stor nackdel för SAL, både turbulens och dämpning i atmosfären reducerar prestanda
Se in i urban miljö	++	0	SAR frå problem med interferens i urbana strukturer ("urban canyons")
Röjningsrisk	++	0	Inga sidolober för SAL
3D-avbildning	++	0	För ladar i princip ned till mm. Svårare vid radarvåglängder på grund av interferens mellan olika spridare.
Frekvensallokering	++	0	
Teknisk mognad	0	++	SAR har funnits några årtionden, flygburen SAL demonstrerad 2006.

I DARPA:s "Long View"-program utvecklas en invers syntetisk aperturladar som skall medge hög-upplöst avbildning från geostationära satelliter (ca 36000 km ovanför ekvatorn). En speciell utmaning blir laserns frekvensstabilitet eftersom gångtid fram och tillbaka blir ca ¼ sekund. Avbildningstiden beräknas till ca 100 sekunder (på denna tid hinner sensorn förflytta sig ca 4630 meter till följd av jordrotationen) för att uppnå sub-cm-upplösning. Autofokuseringstekniker behövs för att kompensera för atmosfärens turbulens och driften i lokaloscillatorn under avbildningstiden.

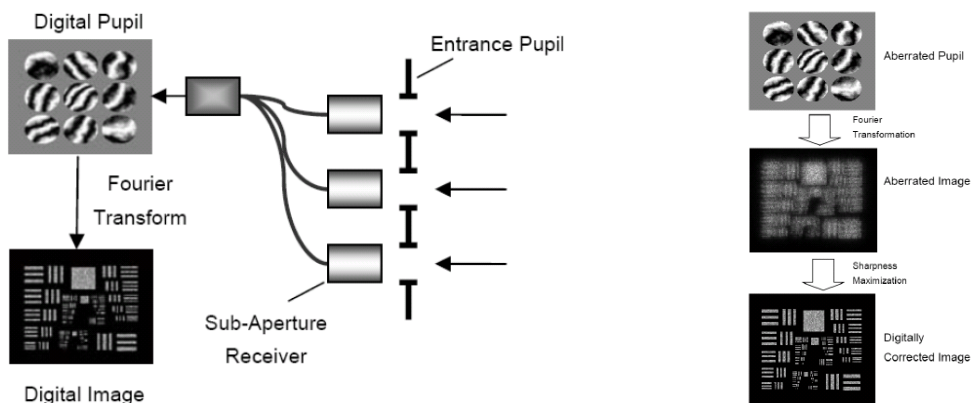
2.3.6 Multiaperturteknik

Lockheed Martin Coherent Technologies bedriver forskning kring aktiv avbildning med multiapertursystem. Genom att koherent kombinera bilder från olika aperturer kan man hålla nere volym och vikt samtidigt som man kan uppnå hög upplösning. Om man använder en avstämbar laser kan man även uppnå högupplösta 3D-bilder. I dessa multi-apertursystem sker avbildningen med hjälp av digital korrektion av fäfel på grund av optik och atmosfär. Figur 18 visar utvecklingen av stora optiska teleskop som går från stora segmenterade speglar till multiteleskop-system med optisk multiplexering. I framtiden kan man genom att använda laserbelysning digitalt multiplexa signaler från många små teleskop. Även på sändarsidan kan man tänka sig digital strålstyrning och strålformning genom faskontroll av de olika delsändarna.

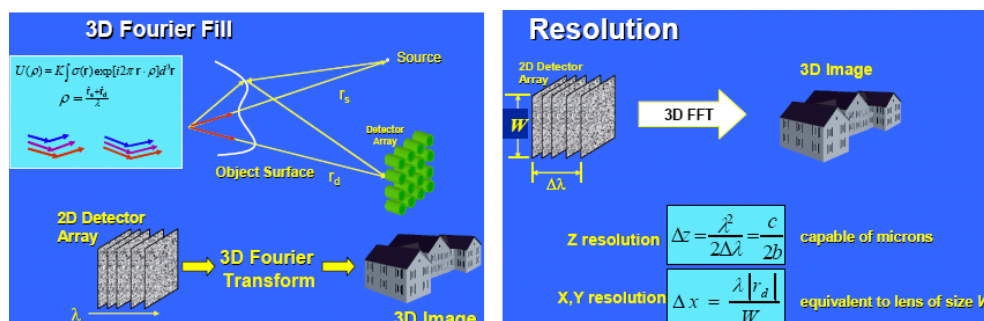


Figur 18. Utveckling av stora teleskop för hög upplösning (Då – nu – i framtiden). (Marron et al. [55]).

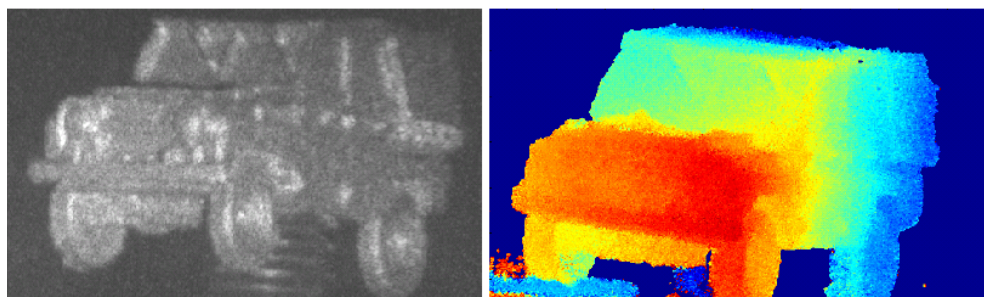
Figur 19 visar principen för aktiv koherent multiapertur-avbildning. För att registrera det optiska fältet i varje subapertur används en variant av holografi med digital lagring. En sändarstråle blandas inom en del av den utsända strålen (referensstrålen eller lokaloscillatorn) och det bildade speckelmönstret registreras i detektormatrisen. Eftersom det mottagna elektriska fältet från målet innehåller fastermen $\exp(i\mathbf{k}\mathbf{r})$ inses att man kan mäta avstånd genom att variera våglängden hos sändaren (ändra absolutbeloppet på vågvektorn ($k=2\pi/\lambda$)). Den avståndsupplösning man kan uppnå härleds enkelt till $\Delta z \approx \lambda^2/\Delta\lambda$ där $\Delta\lambda$ är separationerna mellan två använda våglängder. Figur 20 och figur 21 illustrerar 3D-avbildningen och den upplösning som kan uppnås.



Figur 19. T.v. Principen för koherent avbildning med multiapertur. Data från varje delapertur kombineras digitalt i en matris som motsvarar hela aperturen. Bilden formas sedan efter en digital Fouriertransform. T.h. visas hur autofokus metoder kan användas för att kompensera för avbildningsfel. (Marron et al. [55]).



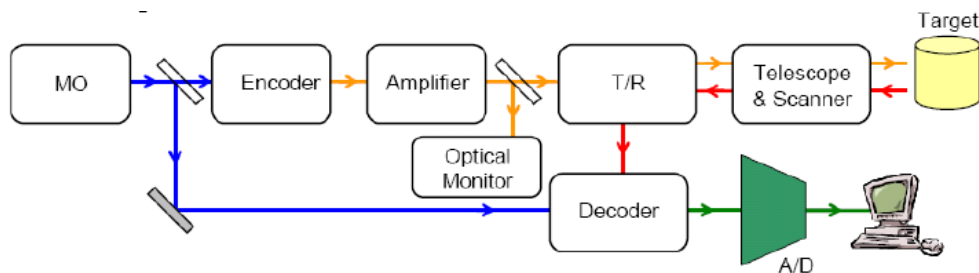
Figur 20. T.v. en intensitetsbild och t.h. en avståndsbild uppnådd genom koherent avbildning med två våglängder. Medelvärdesbildning över 8 bilder. (Marron et al. [55]).



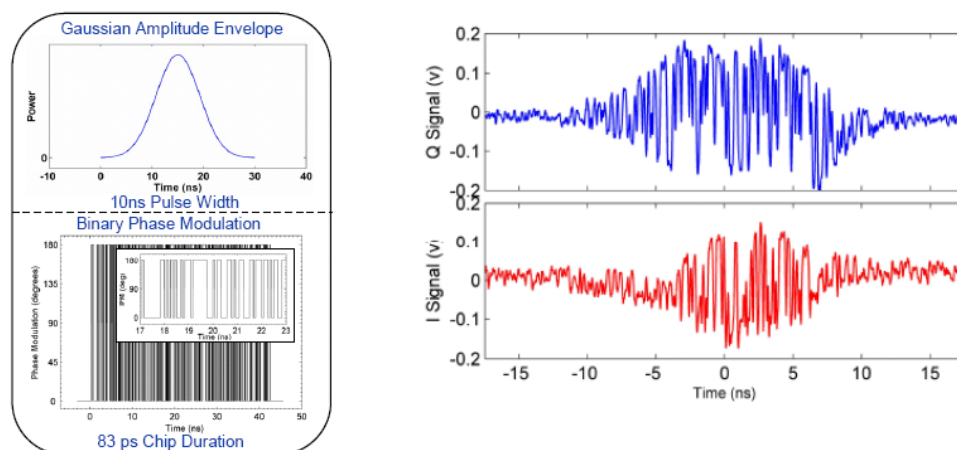
Figur 21. T.v. en intensitetsbild och t.h. en avståndsbild uppnådd genom koherent avbildning med två våglängder. Medelvärdesbildning över 8 bilder. (Marron et al. [55]).

2.3.7 Kodade vågformer

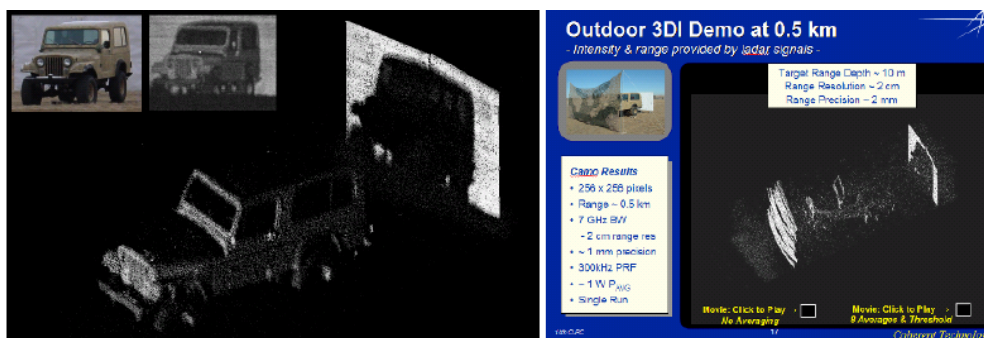
Lockheed Martin Coherent Technologies (f.d. CTI) har ett ”Superresolution Sensor System (S3) program”. Detta program är mycket ambitiöst och syftar till att förena 3D-avbildning, vibrometri, polarimetri samt apertursyntes i samma sensor. Avståndsupplösningen för en ladar ges i allmänhet av uttrycket $c/2B$. Medan man för hög upplösning i allmänhet kräver hög bandbredd B kan det vara svårt att realisera och därför försöker man ofta att utnyttja en implementation som inte kräver hög bandbreddselektronik (t.ex. FMCW). Medan det är svårt att generera och detektera ps-pulser med full detektorbandbredd är det lättare att koda en puls med t.ex. en fas eller polarisationskodning med mycket hög momentan bandbredd (THz) och utnyttja multikanalteknik med GHz-bandbredd på elektroniksidan. Figur 22 visar ett blockdiagram, medan figur 23 visar principen för mätningarna. Figur 24 visar ett mätdataexempel.



Figur 22. Blockdiagram för LMCT's multifunktionsladdar. MO är en "master oscillator" och "Amplifier" är en fiberförstärkare. Laser-prf: 1-300 kHz, pulslängd: 10 ns och medeleffekt: ca 1 W. (Buck et al. [55]).

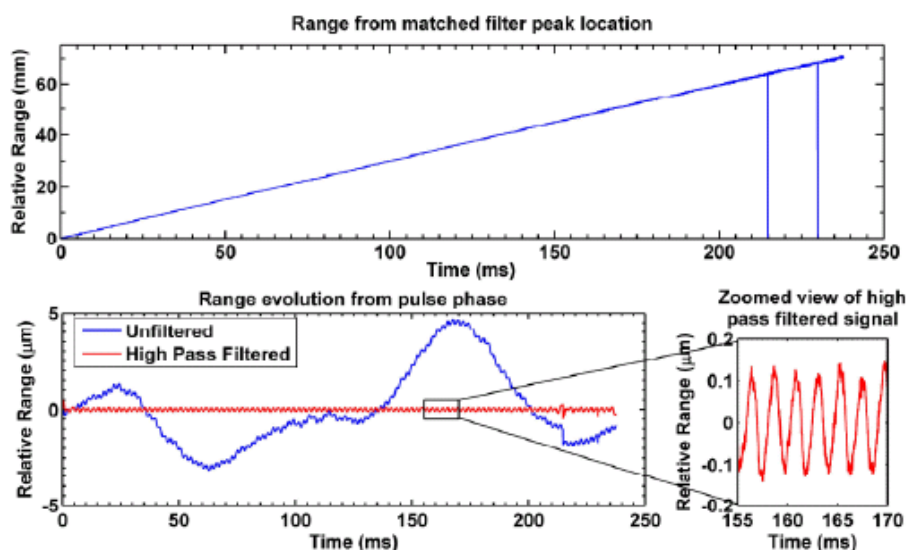


Figur 23. T.v. fasmodulering med upplösningen 83 ps av den 10 ns utsända laserpulsens. T.h. I- och Q-komponenterna från ett punktmål. Kvadraturdetektion medger analytisk rekonstruktion av den komplexa mottagna signalen med efterföljande signalbehandling med matchat filter. (Buck et al. [55]).



Figur 24. T.v. en punktmolnbild av en jeep på 0,5 km avstånd. Transversell bildstorlek 256×256 pixlar. Medelvärde av 8 bilder. De små insatta bilderna visar ett foto resp. en intensitetsbild. T.h. visas en bild av jeepen bakom ett kamouflagenät med 50 % transmission. Avståndsupplösningen var imponerande 2 cm och avståndsnoggrannheten uppgavs till 2 mm. (Buck et al. [55]).

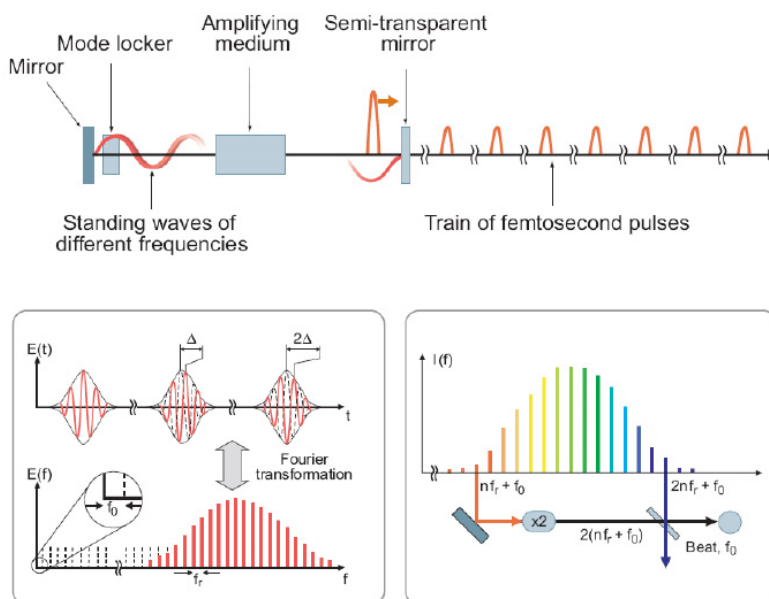
Figur 25 visar ett exempel från vibrometri. En högtalare har satts på en rörlig plattform med en hastighet av ca 3,3 m/s. Genom att subtrahera denna hastighet med tillhörande fasförändringar samt filtrera bort "långsamma" speckelinducerade avståndsförändringar kunde högtalartonen plockas fram. Det svåra uppstår när speckelbrusets frekvenskaraktistik överlappar den önskade signalens.



Figur 25. Mätning och signalbehandling för att extrahera en ton från en rörlig högtalare. (Buck et al. [55]).

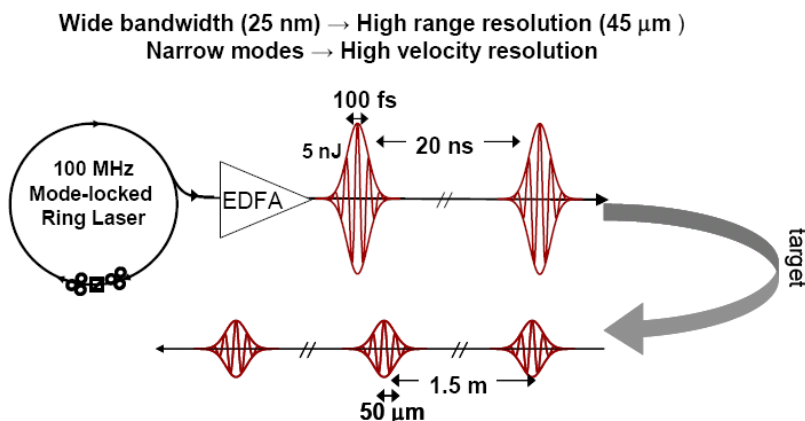
2.3.8 Ladar-baserad på frekvenskamteknik

Hall och Hänsch erhöill 2005 års Nobelpris i fysik genom sina insatser i laserbaserad precisions-spektroskopi som bygger på den så kallade frekvenskamtekniken. Denna teknik kan enkelt beskrivas som en ny mätlinjal för tid och frekvens [56], se figur 26. Helt nyligen har frekvenskamtekniken utvidgats att inkludera det extremt högfrekventa ultraviolette området vilket kan leda till ännu mer precisa klockor vid röntgenfrekvenser. Genom att faslåsa de korta pulserna kan ännu kortare pulser (10^{-18} s, attosekunder) genereras genom interferens. Detta kommer att ha stor betydelse för utvecklingen av GPS till mm- och cm-precision och vidare för telekommunikation, liksom för naturvetenskapen i allmänhet. Man avser bl.a. att studera naturkonstanterna med än högre precision.

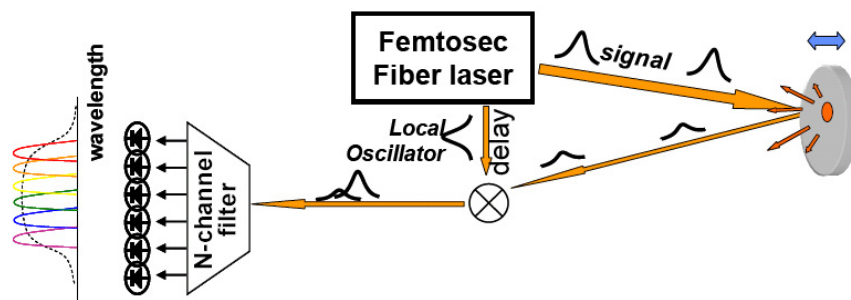


Figur 26. Principen för frekvenskamtekniken. Den övre delen av diagrammet visar hur laserpulserna bildas och deras tid och frekvensspektrum. Den spektrala fördelningen består av frekvenser som är extremt väldefinierade. Genom frekvensdubbling kan man bestämma den okända grundfrekvensen f_0 och därmed få en ny extremt noggrann mätlinjal för tid och frekvens. Tekniken har utvecklats av Hänsch och belönades med 2005 års Nobelpris [56].

Newbury et al. [56] från NIST i Boulder bedriver forskning kring “Lidar with Femtosecond Fiber-Laser Frequency Combs”, se figur 27. Femtosekund(fs)-laser behandlas även i en översiktlig FOI-rapport [57]. Några egenskaper och möjligheter med frekvenskamtekniken för koherent lidar är hög avståndsupplösning, reducerat speckelinflytande (bred spektral emission), hög Dopplerupplösning samt koherent detektion från puls till puls (som för konventionell radar). Man får helt enkelt en bredbandskälla ekvivalent med 10-tusentals separata koherenta sändare.



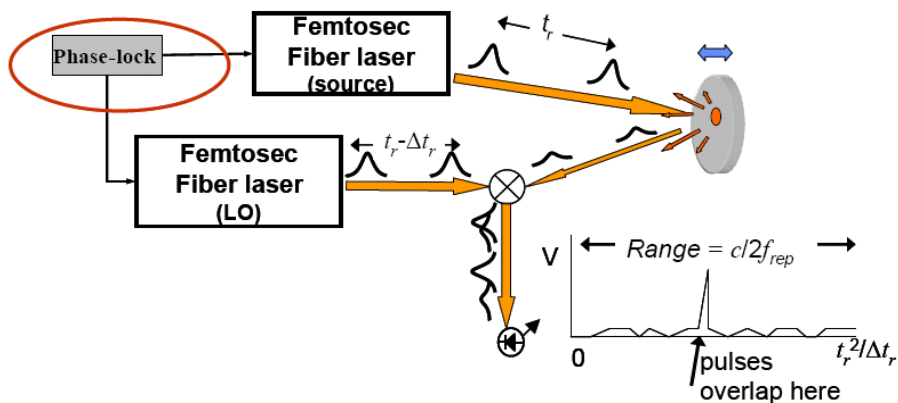
Figur 27. Exempel på ladarsändare baserad på en fiber-fs-frekvenskamlaser. (Newbury [55]).



Figur 28. Spektralt upplöst fs-frekvenskamladar. (Newbury [55]).

Newbury [59] redovisar två olika ladarsystem (laboratorienivå); ett spektralt upplöst system (figur 28) samt ett baserat på två faslåsta fs-fiberlasrar (figur 29). I det första systemet delas spektrumet för varje puls upp i ett antal kanaler. Fördelen med detta är att man kan tillämpa spektral medelvärdesbildning i Dopplerkanalen för att reducera speckelinflytandet samt att man bättre kan kompensera för dispersion i systemet. Med detta system demonstrerades en avståndsupplösning av 45 μm (i laboratoriet) och en stabil Dopplersignal genom spektral medelvärdesbildning.

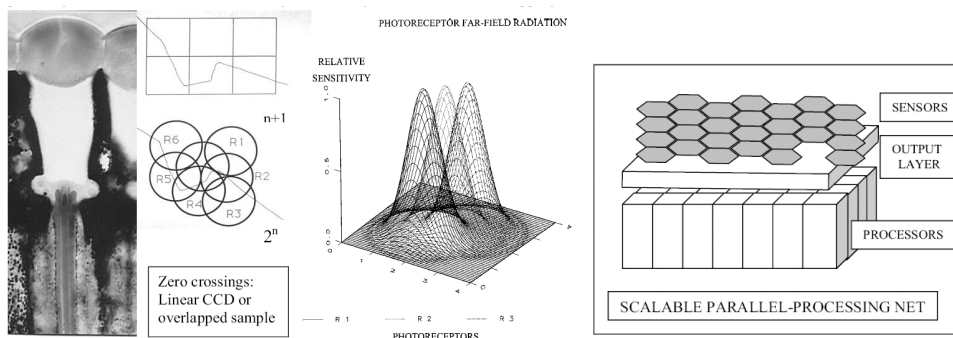
I det andra konceptet (figur 29) används två frekvenslåsta fs-fiberlasrar. Härigenom undviks fördröjningsledning för lokaloscillatorn och man får ett enklare system genom att endast en detektor/digitalomvandlare behövs. Den dyra delen utgörs av frekvenslåsningsen mellan de två lasrarna. Med detta system demonstrerades sub-mm-avståndsupplösning med 1,5 m avståndstvetydighet. Frekvenskamtekniken för lidar verkar för närvarande vara lite för exklusiv för implementering i taktiska militära system.



Figur 29. Ladarsystem baserat på två frekvenslåsta fs-fiberlasrar. (Newbury [55]).

2.3.9 Bioinspirerad avbildning

Djurens och det mänskliga ögat arbetar ofta på ett annat sätt än det som sker i EO-sensorer. Det bör finnas många nya möjligheter att genom en kombination av hårdvara och signalbehandling att närma sig den avbildningsteknik som sker inom biologin. Som ett exempel på den enastående förmåga som djurens och människans öga besitter kan vi betrakta vinkelupplösning. Undantagslöst kan dessa klara subpixelupplösning. Insekter har superupplösning som är bättre än människans. Wilcox [58] har nyligen utvecklat en detektor som, utgående från principer för flugans öga, ger ca 40 ggr bättre upplösning än vad som ges av pixelavståndet. Detektorn har bl.a. analog signalbehandling som ger logaritmisk känslighet. Genom att varje pixel inte ges lika känslighet över hela pixelytan utan t.ex. en gauss-fördelad sådan kan vinkelupplösningen förbättras åtskilligt. Detta kan ske optiskt t.ex. som i fallet flugögat genom att det optiska flödet integreras i en vågledande cell. En bildpunkts position kan erhållas genom att jämföra intensiteten mellan intilliggande fotodetektorer. Detta illustreras i figur 30.

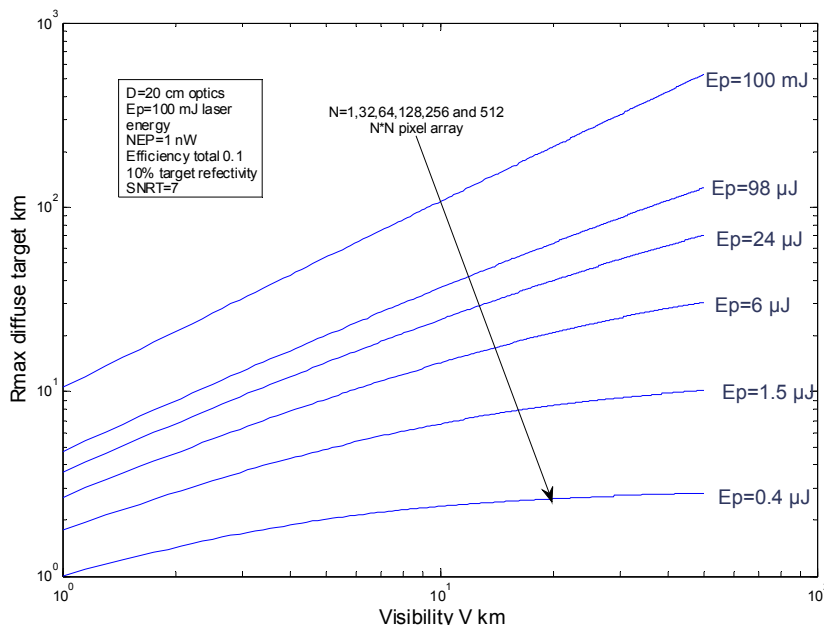


Figur 30. T.v. en illustration av flugans öga jämfört med en CCD kamera och hur subpixelupplösning kan uppnås genom att utnyttja en Gaussliknande känslighet över varje pixel. T.h. en generell arkitektur för att efterlikna bioinspirerade koncept. Från Wilcox [55].

2.4 Laserkällor

Laserkällan i ett 3D-ladarsystem är naturligtvis intimt förknippad med tillämpning och detektorlösning. För skannade system krävs hög prf så att en rimlig total avsökningstid kan erhållas. För andra system med fulla 3D-matriser eller grindade bildförstärkare är snarare den totala pulsenergin drivande för att uppnå räckvidd. För långräckviddiga system, där avståndsmätaren och designatorn utgöra del av samma sändare, kan den även användas för avbildning. För dessa lasrar ligger pulsenergin i området 10-100 mJ (1,5 μm och kanske ngt högre för designatorn vid 1,06 μm). Med hjälp

av Lambertfunktionen (se avsnitt 2.6) kan man enkelt studera hur räckvidden beror av antalet pixlar i mottagaren eller alternativt hur laserenergin per pixel påverkar räckvidden under olika siktförhållanden V . I figur 31 har vi antagit ett upplöst mål, $1,5\ \mu\text{m}$ laservåglängd, 20 cm optikdiameter, ett ekvivalent detektorbrus (NEP) på 1 nW samt 10 % målreflektivitet och ett signal brusförhållande på $\text{SNR}=7$ i optisk effekt. Nedan följer några exempel på 'state-of-the-art' avseende lasrar för ladar i $1,5\ \mu\text{m}$ området.

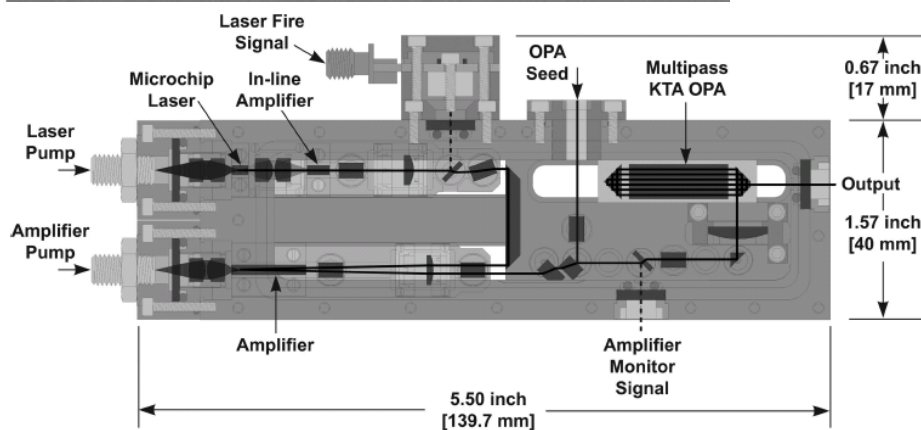
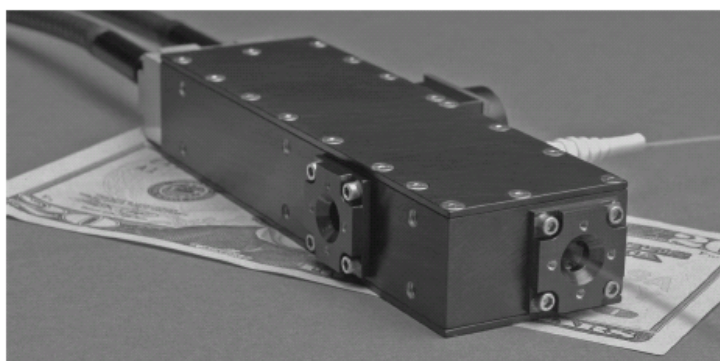


Figur 31. Laserenergin alternativt antalet pixlars inverkan på räckvidd som funktion av sikt. Laservåglängd $1,5\ \mu\text{m}$ och övriga parametrar enligt figuren.

MIT Lincoln Laboratory har utvecklat en rad sändare för deras 3D-system som baseras på fotonräkande matrisdetektorer. Ett exempel på en nyligen publicerad konstruktion av Zayhowski et al. [59] visas i figur 32. Laser består av en OPO som pumpas av en mikrochiplaser och ger $35\text{-}\mu\text{J}$ vid $1.537\text{-}\mu\text{m}$ våglängd och med så pass kort pulslängd som 190 ps vid en prf på 8 kHz. Laserns anges som flygkvalificerad och det optiska huvudet har en volym på $12.7 \times 4.0 \times 2.5\ \text{cm}^3$ och väger 0.34 kg.

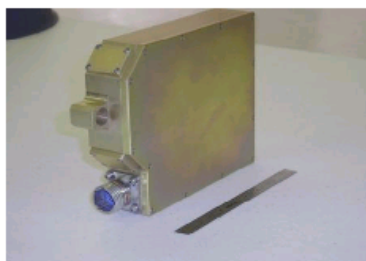
I klassen 10-100 mJ ger vi exempel på en laser från Lite Cycles. De säljer $1,5\ \mu\text{m}$ -lasrar med pulsenergies mellan 10-40 mJ och 100 Hz prf och en kort pulslängd (2ns). Se vidare data och bild i figur 33.

En annan typ av laser med hög pulsrepetitionsfrekvens är fiberlasern som lämpar sig både för skannande system samt även för 3D FPA och grindad avbildning, då med pulsintegration för varje bild. FOI ha införskaffat en laser av den typ som visas i figur 34. Fiberlasarna kan göras mycket kompakta för höga medeleffekter och är oftast luftkylda.



Figur 32. Minilaser för 3D-ladar i det ögonsäkra området $1.5 \mu\text{m}$. Från Zayhowski et al. [59].

10, 20, and 40 Millijoules Per Pulse

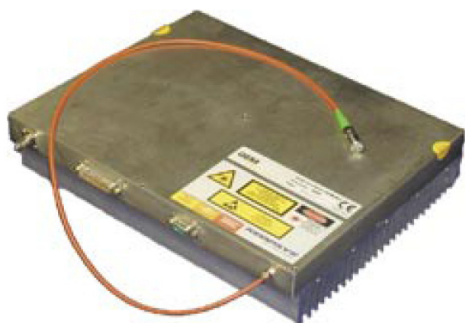


LCI offers diode-pumped laser transmitters with unmatched performance in very small and rugged packages. Some of the distinguishing characteristics of LCI's transmitters include:

- Air-cooling (no liquid needed)
- Short pulsewidths
- Compact efficient electronics packages
- Variable pulse repetition frequencies (PRFs)
- Continuous operation
- Wide operating temperature ranges
- ANSI Class I eye-safety (with beam expander)
- Rugged designs for use in adverse conditions, including:
 - Military applications
 - Desert environments

Energy/pulse (mJ)	40	20	10
Standard Pulse Repetition Frequency (Hz)	Up to 100		
Avg. Power at 100 Hz (W)	4	2	1
Pulsewidth (ns)	2		
M ²	3.5		
Wavelength (nm)	1574		
Standard Operating Temperature (C)	-20 to +55		
Storage Temperature Range (C)	-40 to +65		
Dimensions of Laser Head (cm / in)	15.3 x 30.5 x 7 / 6 x 12 x 2.75	17 x 12 x 6 / 6.75 x 4.75 x 2.36	
Weight of Laser Head (kg / lbs)	11.8 / 26	3.6 / 8	2.3 / 5

Figur 33. Exempel på lasrar från Lite Cycles med pulsenergier i området 10-40 mJ och en prf på 100 Hz.



TYPICAL SPECIFICATIONS

OPTICAL PARAMETERS	TYPICAL VALUES
Fixed operating wavelength	From 1540nm to 1550nm
Energy per pulse	up to 125μJ*
Peak power	Up to 25kW*
Adjustable repetition rate	From 40kHz to 10MHz**
Fixed pulse width	From 400ps to 10ns
Polarization	Unpolarised source
Beam quality	M ² < 2.5

*5ns pulse duration at 40kHz rep. rate, 5W average power.

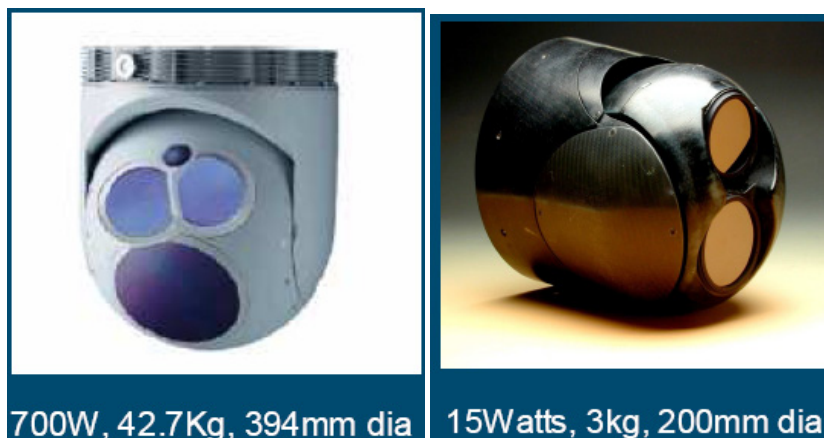
**External TTL pulse generator required.

ELECTRICAL SPECIFICATIONS	TYPICAL VALUES
DC Voltage	13.5V
Power consumption	< 180W

GENERAL SPECIFICATIONS	TYPICAL VALUES
Operating temperature	+0°C / +40°C
Storage temperature	-40°C / +70°C
Size	330 x 260 x 30 mm

Figur 34. Fiberlaser från Keopsys.

2.5 Avsökning, pekning och stabilisering

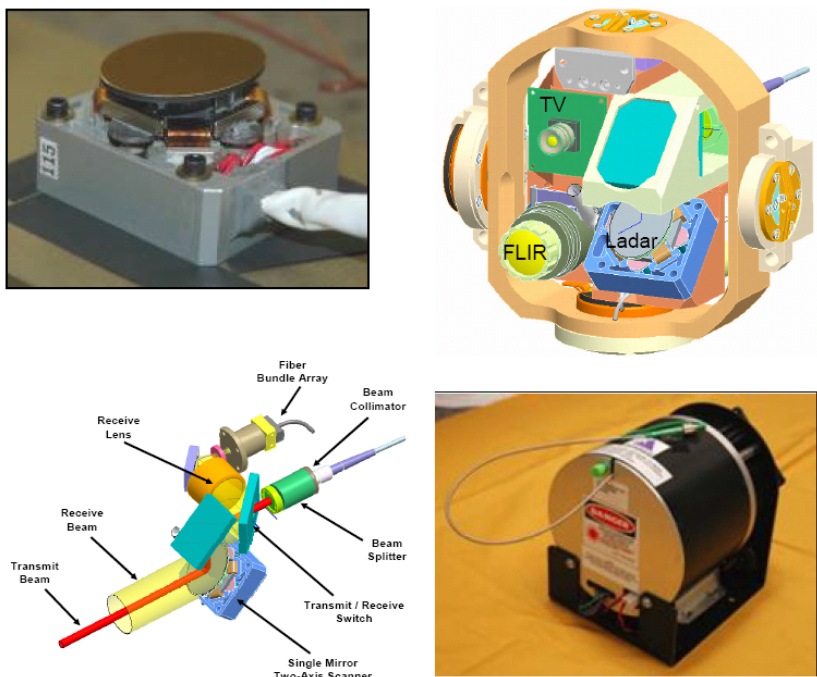


Figur 35. Tv. Traditionell gimbal och t.h. en miniversion. Källa A. Seedhouse DSTL, UK.

Traditionellt används oftast stabiliserade speglar för att avsöka, peka och förflytta laserstrålar inom ett större vinkelområde. Gimbaler är väletablerade men kräver hög elektrisk effekt och väger ofta relativt mycket. 'State-of-the-art' avseende peknoggrannhet är 20-40 μrad. I figur 35 illustreras en sådan traditionell gimbal men även en miniversion lämpad för UAV och lite kortare avstånd. Det finns alltså ett behov att på sikt kunna ersätta gimbaler med mer kompakta och effektsnålare lösningar. Små tvåaxliga galvanometerskannrar har utvecklats för ladar i målsökare, se exempel i figur 36. FOI har bedrivit forskning kring icke-mekanisk strålstyrning baserad på flytkristallmatriser [60] (en typ av SLM: Spatial Light Modulator) och medverkat även i ett strålstyrningsprojekt inom det tidigare europeiska samarbetsformen CEPA [61]. Vi bedömde då att den icke-mekaniska strålstyrningstekniken var lite för outvecklad på komponentsidan för att vara motiverad att införa i tillämpningar. Dock är området fortfarande aktuellt och en god översikt av de senaste årens utveckling har publicerats av bl.a. Hans Tholl [62].

Tabell 4 visar prestanda hos de mest lovande kompakta strålstyrningsteknikerna. För optiskt bredbandig styrning över större vinkelområden är Risley-prismor attraktiva även om de inte helt möter kraven på låg vikt och låg effektkonsumtion. Diffractionsgritter ('*blazed grating*') erbjuder bredbandig avsökning inom ett måttligt vinkelområde men de behöver ytterligare optiska komponenter som förmår att styra strålar mellan gitterloberna. Optiska fasade matriser är lovande men fungerar än så

länge bara inom ett smalt vinkelområde (några få grader). Man kan tänka sig en kombination av ovanstående tekniker för att uppnå både grov och fin avsökning.



Figur 36. Exempel på kompakt ladartechnik för målsökare. Ladaraperturen är 2,5 cm. Överst t.v. en tvåaxlig skanner, överst t.h. målsökarhuvudet. Undre raden t.v. systembeskrivning av ladarn samt t.h. fiberlasersändaren. Källa AMRDEC USA.

Tabell 4. Översikt av olika kompakta avsökningstekniker. Från Tholl [65].

Property	Risley prisms	Blazed grating	Optical phased arrays
Max. steering angle	60 deg	25 deg	75 μrad / 1.5 deg
Angular coverage	continuous	discrete	quasi-continuous
Aperture diameter	< 100 mm	< 150 mm	< 20 mm
Spectral range	0.4–12 μm	0.4–12 μm	0.4–1.5 μm (LC) 0.4–5 μm (MEMS/EOC)
Update rate	500 Hz	1000 Hz	50 Hz
Etendue	105 mm*rad	65 mm*rad	0.0015 / 0.5 mm*rad
Throughput	75 %	65 %	60 %

Optisk fasstyrning kan möjliggöra helt nya laserkoncept. Förutom icke-mekanisk strålstyrning, lobformning och fokusering kan man utnyttja subaperturer för att kunna få den stora aperturens upplösning. På längre sikt kan man t.ex. genom att utnyttja fiberlaser och optisk faskontroll utveckla ladar och laservapensystem som integreras med AESA-radar. Se vidare McManamon [63] och referenser i detta papper.

2.6 Fysikaliska begränsningar

Detta avsnitt ger en grund för att diskutera prestandagränser för 3D-laserradarsystem. Först sammanfattar tabell 5 en diskussion om fysikalisk begränsning av prestanda som redovisades i en tidigare rapport [1]. Denna följs av formler och uttryck utgående från laserradarekvationen för att estimer prestanda för laserradarsystem. Nyttan med Lambert's W-funktion illustreras.

Laserradarekvationen kan skrivas:

$$SNR_T = \frac{P_m}{NEP} = \frac{P_L \cdot \eta \cdot \rho \cdot A_m}{NEP \cdot \pi R^2} \cdot \exp(-2\sigma R) \quad (\text{vinkelupplöst mål}) \quad (1)$$

$$SNR_T = \frac{P_m}{NEP} = \frac{P_L \cdot \eta \cdot \rho \cdot A_m}{NEP \cdot \pi R^2} \cdot \frac{A_T \cdot 4}{(R\theta)^2} \exp(-2\sigma R) \quad (\text{punktmål}), \quad (2)$$

där SNR_T är tröskelvärde för signal till brusförhållande SNR , R avståndet, P_m mottagen lasereffekt, NEP är brusekvivalent effekt, η är total systemverkningsgrad, ρ målets reflektionskoefficient (vi har antagit ett diffust mål), A_T målets tvärsnittsarea och σ atmosfärens dämpningskoefficient.

Lösningen till ekvation (1) respektive (2) med avseende på räckvidd vid given SNR_T kan skrivas:

$$y = \text{lambertw}(x_1), \text{ där } y = \sigma R \text{ med } x_1 = \sigma \sqrt{\frac{\eta \cdot P_L \cdot \rho \cdot A_m}{\pi \cdot NEP \cdot SNR_T}} \quad (\text{vinkelupplöst mål}) \quad (3)$$

$$y = 2 \cdot \text{lambertw}(x_2), \text{ där } y = \sigma R \text{ med } x_2 = \sigma / 2 \cdot \left[\frac{\eta \cdot P_L \cdot \rho \cdot A_m \cdot A_T \cdot 4}{\pi \cdot NEP \cdot SNR_T \cdot \pi \theta^2} \right]^{1/4} \quad (\text{punktmål}) \quad (4)$$

där lambertw är Lamberts W -funktion [64]. Denna funktion är en lösning $w(x)$ till ekvationen $w \cdot \exp(w) = x$ och finns avbildad i figur 37. Parametern x kan skrivas som:

$$x \approx \sigma \sqrt{\text{Systemkonst}} \quad (\text{vinkelupplöst mål}) \quad (5)$$

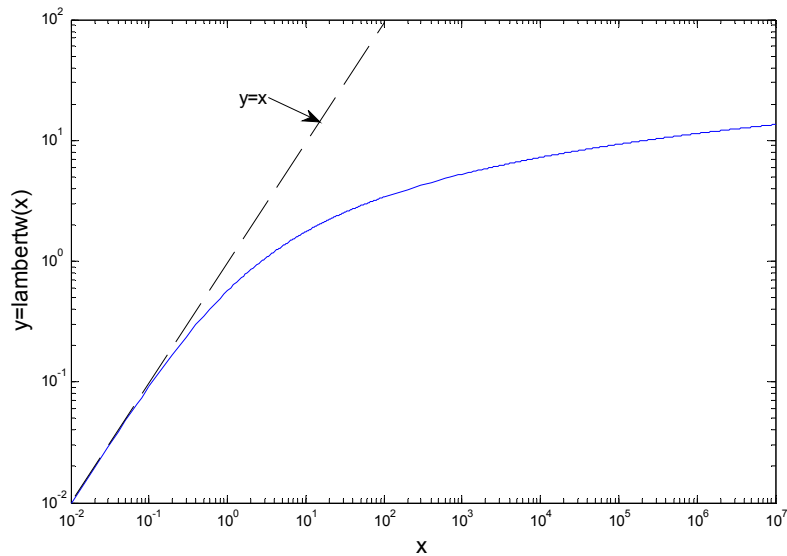
$$x \approx \sigma / 2 \cdot \sqrt[4]{\text{Systemkonst} \cdot A_T / \theta^2} \quad (\text{punktmål}) \quad (6)$$

Från figur 37 ser vi att $y \approx x$ för $x < 1$ och $y \approx \text{konst}$ för $x \gg 1$. Detta medför intressanta iakttagelser vid systemoptimering och tillgänglighetsanalys. I klart väder ($\sigma \ll 1$) och upplösta mål gäller för $x \ll 1$ att räckvidden $R_v \approx \sqrt{\text{Systemkonst}}$, d.v.s. en ändring i systemkonstanten (lasereffekt, aperturstorlek etc.) slår direkt mot räckvidden. För punktmål gäller motsvarande att $R_v \approx 0,5 \cdot (\text{Systemkonst} \cdot A_T / \theta^2)^{1/4}$. För sämre väder ($\sigma > 1$) och stora x finner man att $R_v \approx C/\sigma$ där C är relativt oberoende av x och ligger mellan 100-200.

Tabell 5. Fysikaliska begränsningar för prestandan hos 3D-laserradarsystem

Parameter/ funktion	Fysikalisk begränsning	Parametrar	Kommentar
Vinkel- upplösning	$\delta\theta = \max\left(\frac{\lambda}{D}, \frac{d_{pix}}{F}\right)$	L våglängd, D aperturdiameter, d_{pix} pixelstorlek, F fokallängd	För $\lambda=1,5 \mu\text{m}$ och $D=15 \text{ cm}$ ger detta en diffraktionsgräns på $10\mu\text{rad}$. För att matcha detta krävs $F=1 \text{ m}$ och $d_{pix}=10 \mu\text{m}$ pixelstorlek
	$\delta\theta = \frac{\lambda}{\min(r_0, D)}$	r_0 är Fried's parameter $r_{0,svag} = 2,1\sqrt{\lambda L}$ (svag turbulens, $\sigma_{inl}^2 < 2$); $r_{0,stark} = \frac{0,76\sqrt{\lambda L}}{(\sigma_{Rytov}^2)^{3/5}}$ (stark turbulens, $\sigma_{inl}^2 > 2$)	Inverkar speciellt vid horisontella marknära banor.
Avstånds- upplösning	$\delta R = \frac{c}{2B} \approx \frac{c\tau}{2}$	c är ljushastigheten, B vägformens bandbredd och τ pulsbredden.	Ex. för $\delta=1 \text{ cm}$, behövs $\tau < 63 \text{ ps}$ eller $B > 15 \text{ GHz}$
	$\delta R \approx \frac{c\sqrt{T_{step}\sigma}}{2}$	T_{step} är grindluckans steglängd och σ^2 variansen i tidsfluktuationerna hos laserpuls och grindlucka ($\sigma^2 = \sigma_{gate}^2 + \sigma_{puls}^2$).	Med grindsteg och fluktuationer i storleksordn. 0,1 ns blir upplösningen enligt 1,5 cm
Avstånds- noggrannhet	$\sigma_R \propto \frac{\delta R}{\sqrt{N_{avg} SNR_1}}$	SNR_1 är signalbrusförhållandet vid en mätning och N_{avg} är antalet mätningar över vilken medelvärdesbildning sker.	mm-precision har demonstrerats i många system
Räckvidd	Ges ur ladarekvationen: Lösningen är av typen $y = \text{lambertw}(x_1)$ där $y = \sigma R$ och	Lambertw är Lambert's W funktion (finns i Matlab). Ladarekvationen återges i formel (1) och LambertW-funktionen återges i figur 37.	Figur 37 är generell och ger skalningsmöjlighet för olika parametrar.
	$x_1 = \sigma \sqrt{\frac{\eta \cdot P_L \cdot \rho \cdot A_m}{\pi \cdot NEP \cdot SNR_T}}$	För ett vinkelupplöst mål	Exempel: $\eta=0.1$; $P_L=10 \text{ kW}$, $NEP=1 \text{ nW}$, $\rho=0.1$, $A_m=0.01 \text{ m}^2$, $SNR_T=10$ ger för: $\sigma=0.1/\text{km}$; $R_{max}=3.8 \text{ km}$ och för $\sigma=1/\text{km}$; $R_{max}=1.4 \text{ km}$
	$y = 2 \cdot \text{lambertw}(x_2)$ $x_2 = \frac{\sigma}{2} \cdot \sqrt[4]{\frac{\eta \cdot P_L \cdot \rho \cdot A_m \cdot A_T \cdot 4}{\pi \cdot NEP \cdot SNR_T \cdot \pi \theta^2}}$	För ett punktmål med area A_T	Exempel: $\eta=0.1$; $P_L=10 \text{ kW}$, $NEP=1 \text{ nW}$, $\rho=0.1$, $A_m=0.01 \text{ m}^2$, $A_T=0.01 \text{ m}^2$, $SNR_T=10$, $\theta=10^{-4} \text{ rad}$ ger för $\sigma=0.1/\text{km}$; $R_{max}=2.3 \text{ km}$ och för $\sigma=1/\text{km}$; $R_{max}=1.1 \text{ km}$

Ovanstående resonemang gäller för enkeldetektorsystem och gör matriser om man skalar laserefekten P_L till varje pixel ($P_L = P_{L0}/N^2$ för en kvadratisk $N \times N$ matris) samt beaktar eventuell ändring av NEP till följd av minskat synfält etc. Räckvidd kopplar till SWaP (Size, Weight and Power). En intressant utveckling är kombinationen av aktiva och passiva EO-system och här är det viktigt att räckvidder harmonierar med varandra för de passiva och aktiva sensorfunktionerna.



Figur 37. Lambert's W-funktion $y=lambertw(x)$ beräknad i Matlab.

3 Signalbehandling

Utveckling av signalbehandlingsmetoder för 3D-data har pågått under lång tid. Det militära behovet har till största delen varit riktat mot taktisk kartering och måligenkänning. Taktisk kartering för att lära känna sin omgivnings geometriska och geografiska utseende och måligenkänning för att verifiera vän eller fiende inför en eventuell vapeninsats. Sedan många år har databearbetning av 3D-laserdata varit ett viktigt område även civilt, exempelvis för skogskartering, avsyning och robotik. Algoritmer från civila sidan har därigenom kunnat utveckla även den militära förmågan.

Som ett första steg ser vi *registreringen* där det handlar om att sammanfoga flera datamängder till ett och att förstå var data befinner sig i ett världskoordinatsystem. Ett första bearbetning av data kan vara *markestimering* som ger en bra grund att stå på för fortsatt analys. Nästa steg är att hitta lokala egenskaper som avviker från bakgrunden, och kan vara intressanta *detektioner*. Segmentering och klassificering har som mål att ge en övergripande bild av vilka områden i data som hör ihop på olika sätt, exempelvis att hitta marken eller träden. Själva *måligenkänningsprocessen* kan ske på många olika sätt, och givetvis kan egenskaperna som användes vid detektionen även användas för måligenkänning.

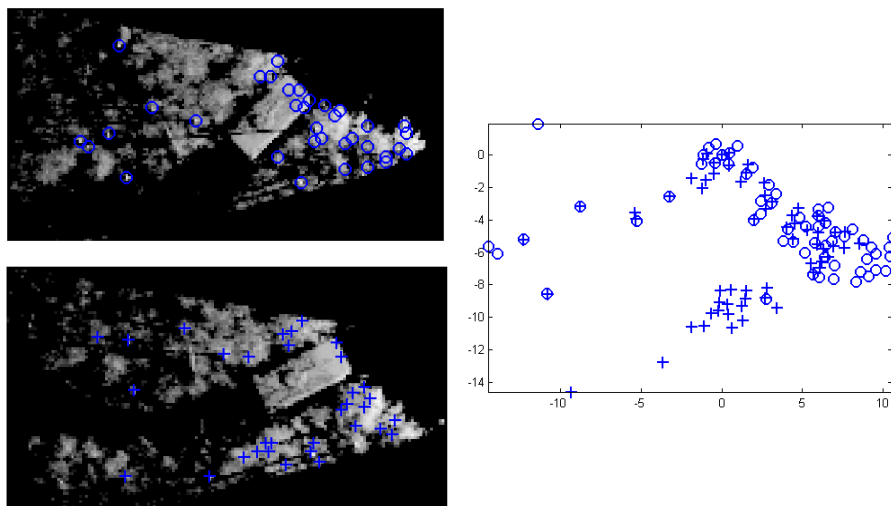
I urban miljö skiljer sig kraven från fallet vegetation eftersom de egenskaper som gör att fordon avviker från skogen (bakgrunden) inte är lämpliga att använda i bebyggelse, där exempelvis platta ytor och hörn är vanliga i bakgrunden. Andra egenskaper måste undersökas och man inser vikten av att ha en *a priori*-information vid bearbetningen av data, såsom hur miljön ser ut, eller en mycket noggrann invisning. Den största påverkan att förflytta sig från terräng till urban miljö sker på detektions-, segmenterings- och klassificeringsområdet, medan registreringen och själva måligenkänningen inte påverkas nämnvärt. Men för att få ett system att fungera praktiskt måste den ointressanta informationen rensas bort tidigt, så att måligenkänningen enbart utförs på relevant data. Detta är ett svårt problem p.g.a. svårigheterna att definiera vad som är ointressant. Viktigaste anledningen är att öka robustheten och i möjligaste mån undvika falsklarm. Måligenkänning är ofta en beräkningstung process som man bara vill göra på få, relevanta datamängder.

Tidigare har data varit insamlat av system som enbart har haft möjlighet att avbilda statiska scener, eller åtminstone inte förmått fånga förlopp eller förändringar under insamling. Däremot har möjligheter till förändringsdetektion funnits mellan två dataset över gemensamt område. De senaste åren har dock den tekniska utvecklingen gått mot system som kan samla in data under förflyttning såsom med Akbarzadeh [65], eller medan scenen förändras såsom med AFRLs Flash-sensor.

3.1 Registrering

Registreringen handlar om att globalt få en vetskap om vart data hör. Dels finns kopplingen till exempelvis RT90-systemet, men även kopplingen till andra datamängder insamlade på ungefär samma plats. Det förstnämnda löses till stor del genom ett GPS/INS-system, som idag är en given komponent i alla kvalificerade sensorsystem. Trots detta finns det fortfarande en så pass stor osäkerhet i position att två insamlade datamängder inte kommer att överlappa perfekt. Om man då direkt överlagrar dem, kommer den mätosäkerhet som redan fanns i respektive datamängd att öka drastiskt. Lösningen på detta är att man iterativt kan ”testa” att sätta samman två datamängder och beräkna hur mycket de avviker, följt av en mindre justering av deras relativa position, se

figur 38. Ifall man inte har en bra initial gissning kan man först använda sig av en grov injustering baserad på exempelvis träd, väggar, eller andra tydliga objekt.



Figur 38. Till vänster visas två vyer av samma område. Färgmarkeringarna visar identifierade nyckelpunkter (robusta punkter i scenen) med vars hjälp man kan justera bilderna så att de helt överlappar varandra. Efter registreringen överlappar nyckelpunkterna enligt bilden till höger. Axlarna är i meter. Bild FOI.

3.2 Detektion

I vissa fall pratar man om detektion som måldetektion d.v.s. endast detektion av mål. Detektion innebär i ett bredare perspektiv att enskilda datapunkter härrörs till en viss kategori såsom mark, träd, mål eller byggnad. Det finns alltså detektorer som hittar vilka datapunkter som härrör från träd och det finns detektorer som hittar vilka punkter som härrör från mark respektive mål etc. En kombination av detektorer kan med andra ord ge en fullständig segmentering.

Detektion av mål, delvis skylda av vegetation, träd och kamouflagenät, förenklas av att avståndsinformationen finns tillgänglig. DeVore and Zhou [66] hävdar att avståndssegmentering till och med är nödvändig när ett mål är delvis skyldt. Exempelvis Felip et al. [67] använder datatäthetshistogram med vyn uppifrån för att separera mål från skylande objekt. Ett annat sätt att hantera skylning är att använda data från fler vyer, vilket ökar chansen att data innehåller information från målet [68, 69].

Ett flertal angreppssätt för måldetektion har rapporterats över åren, där två huvudinriktningar kan ses. Den första frågan är huruvida marken är estimerad eller inte. Om markpunkter är borttagna har en stor datareduktion skett vilket ger särskilt stor effekt i skogsområden. Å andra sidan kan marksegmenteringen vara tidskrävande. Man kan också se en skillnad i angreppssätt i det publicerat arbete, när det gäller om det är en dedicerad måligenkänningsprocess eller om det är ett av flera steg i en scenanalyskedja. Med dessa observationer som grund, kan det granskade arbetet delas upp i tre huvudkategorier; de som estimerar markytan följt av en förenklad scenanalys där resterande data kategoriseras som träd, bakgrund, mål eller skyl etc. [67, 68, 70]. I den andra kategorin är markytan estimerad, men endast en dedicerad måldetektningsprocess presenteras [71-76]. I sista kategorin är marksegmenteringen inte explicit uttryckt [69], utan mål detekteras direkt m.h.a. spinnbildstekniken [77]. Som ett följande steg kan sedan detektionen förbättras genom användningen av exempelvis en ”3D connected components”-algoritm såsom i [75].

Flera av detekteringsprinciperna nämnda ovan ger olika former av segmentering som resultat, exempelvis i [68], där lokala ytegenskaper beräknas med principalkomponentanalys (PCA) och en träningsbaserad metod används för att detektera objekt och klassificera dem. Detta angreppssätt har vissa likheter med Spinnbildtekniken som används i [69].

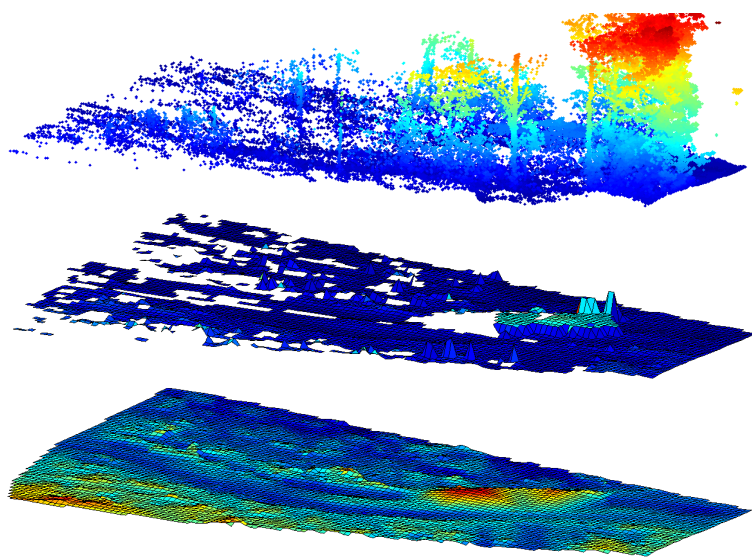
Egenskaper såsom kanter, vertikala ytor och intensitetsvariationer används också för att indikera möjliga mål [73, 74, 76]. Wellfare [76] använder kantdetektion och egenskapsdetektion i intensitetsbilderna, följt av att ytor från den inledande segmenteringen kombineras till större regioner med

hjälp av omgivningsberäkningar. Verly [74] använder egenskaper i såväl avstånds som intensitetsbilderna och grupperar dessa till objekt genom avståndshistogram. Palm et al. [73] använder detektion av kanter och vertikala strukturer för att lokalisera mål. Intressanta objekt väljs ut baserat på deras höjd och lokala ytegenskaper, följt av att detekterad data grupperas till mål genom växning.

Kuntimad and Delashmit [71] använder ett annat angreppssätt där de geometriska egenskaperna hos målets skuggor används snarare än själva målpunkterna. Författarna hävdar att målets skuggor är mer robusta än själva målet om skylning har förekommit.

3.2.1 Markestimering

Markestimering går ut på att härleda markytan i data genom att filtrera bort hus, vegetation och lyktstolpar etc. Detta är en variant av detektionsmetoderna ovan och utgår ofta från just en detektion av vilka punkter som tillhör markytan. Sedan sammanbinds dessa punkter av en heltäckande yta för att skapa en solid markyta, se exempel i figur 39. Området markestimering har redovisats många gånger tidigare och flera metoder har till och med jämförts och utvärderats, exempelvis 2003 i Sithole and Vosselman [78]. Sammanfattningsvis kan man säga att det idag finns bra metoder som är både robusta och beräkningseffektiva, när det gäller att estimerar markytan. Dessutom blir systemen som genererar data mer kapabla och noggranna vilket ger bättre förutsättningar till ett bra resultat. Ibland kan dock problemet vara det omvända d.v.s. att kvaliteten i data göra jobbet svårare. Detta problem uppstår när systemen i första hand är optimerade med avseende på ekonomi, och inte på datakvalitet.



Figur 39. Illustration av markskattning. Färgen illustrerar höjden över marken. Överst visas rådata, i mitten visas en gles markstruktur som ett delresultat, och nederst visas den slutliga täta markmodellen. Bild FOI.

3.3 Måligenkänning

Det slutgiltiga målet med signalbehandlingen av 3D-laserdata är ofta att kunna känna igen detekterade och i mätdata isolerade objekt. Man kan exempelvis använda en indelning i objektstyper såsom bil, lastbil, flygplan, båt eller mer detaljerat; bandfordon, hjulfordon, torn med eller utan eldrör. I bästa fall kan man även känna igen typen av mål, exempelvis skilja på stridsvagn T-72 och stridsvagn 122, eller till och med olika individer av samma typ av fordon.

Två grundprinciper för igenkänning är att dels jämföra detekterade mål mot en måldatabas (exempelvis CAD-modeller) och dels att endast kategorisera med avseende på olika egenskaper hos data.

För det förstnämnda fallet kan man råka ut för att det undersökta målet inte finns i databasen, exempelvis genom att fordonet är ombyggt eller har en ny sorts last, och identifieringen misslyckas. Om man istället endast försöker kategorisera objektet man hittat, så kan man få mer ospecifika svar, och man kanske upptäcker att objektet har hjul men inget eldrör, även om man inte är säker på vilket sorts fordon det är.

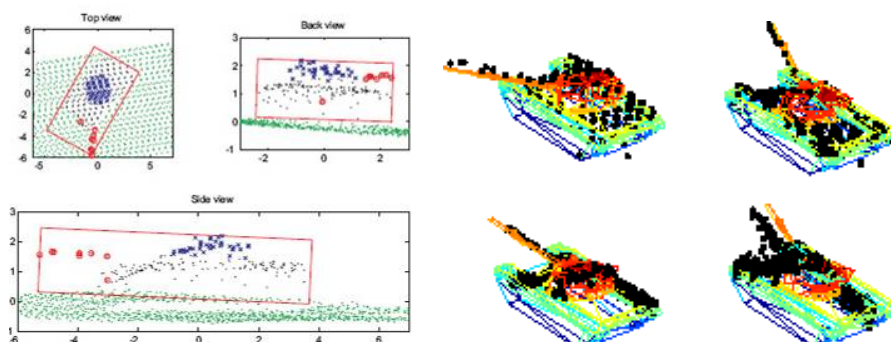
För militära 3D-lasersystem har markfordon varit det mest studerade målet för igenkänning. Under årens lopp har ett flertal ATR-metoder eller -system för igenkänning av dessa tagits fram [69, 76, 79-82]. Under de senaste åren har även ATR-metoder för civila fordon, mest avseende trafikövervakning utvecklats [83-85].

Metoderna appliceras på data i olika upplösningar och perspektiv på målet. I [76, 82, 84, 85], även data med låg upplösning betraktas. Ett typiskt dataset innehåller några hundra datapunkter på målet, medan [84] hanterar väldigt lågupplösta dataset (ungefär 1,5 punkter per m^2). I [69, 80, 81, 83], är det typiskt flera hundra punkter på målen.

Typiskt, samlas data in i framåttittande perspektiv, medan [79] och [84] betraktar lodrätt perspektiv. Ofta samlas data in genom ett skannande laserradarsystem, vilket resulterar i oregelbundet samplade data. I [76, 83], används både simulerade och uppmätta data. I [69, 81, 82], arbetar lasersensorn i stirrande mod vilket ger regelbundet samplade data. Vidare, i [69, 83], samlas data in från flera vyer, vilket resulterar i data med mindre problem av skylning.

I de flesta fall delas ATR-processen in i två steg. Vanligtvis består det första steget av siluettberäkningar [76, 80, 81, 85]. Egenskapsextraktionen kan erhålla geometriska egenskaper av målet [79], egenskaper med lägre dimensionalitet [82] eller mer abstrakta egenskaper såsom spinnbilsrepresentationen [69, 83, 86]. Första steget används för att reducera antalet tänkbara mål. Sedan undersöks kvarvarande mål med 3D-matchning med ett modellbibliotek, som representeras av CAD-modeller [79, 80], någon representation härledd från CAD-modeller [76, 81, 82] eller 3D-punktskuror [69, 80, 85]. ATR-metoden [82] beskrivs vidare i [87]. I [84] används träningsbaserade metoder för igenkänning. Metoderna i [69, 80, 83] kan hantera delvis skylda mål, och problemen med dessa situationer diskuteras även i [79].

En mer basal egenskap hos ett mål är dess geometriska mått, d.v.s. höjd, bredd respektive längd. Dessa går att beräkna med rektangelskattning, där en iterativ metod beskrivs i [88] och visas i figur 40. I [89-91], används icke-iterativa metoder för att finna bra initialvärden inför fortsatt bearbetning. Metoderna används för att mäta asteroider [91], byggnader [90] respektive fordon [89]. Med den metoden kan man beräkna mått på de olika delarna hos målen, exempelvis längden på stridsvagnens eldrör, bredden på dess kropp eller höjden på dess torn.



Figur 40. Matchningsresultat. Till vänster visas den minsta rektangel som omsluter en stridsvagn (T-72). Data är från TopEye. Till höger har fyra olika mätdata mängder (svarta punkterna) matchats mot artikulerade CAD-modeller av T-72. Bild FOI.

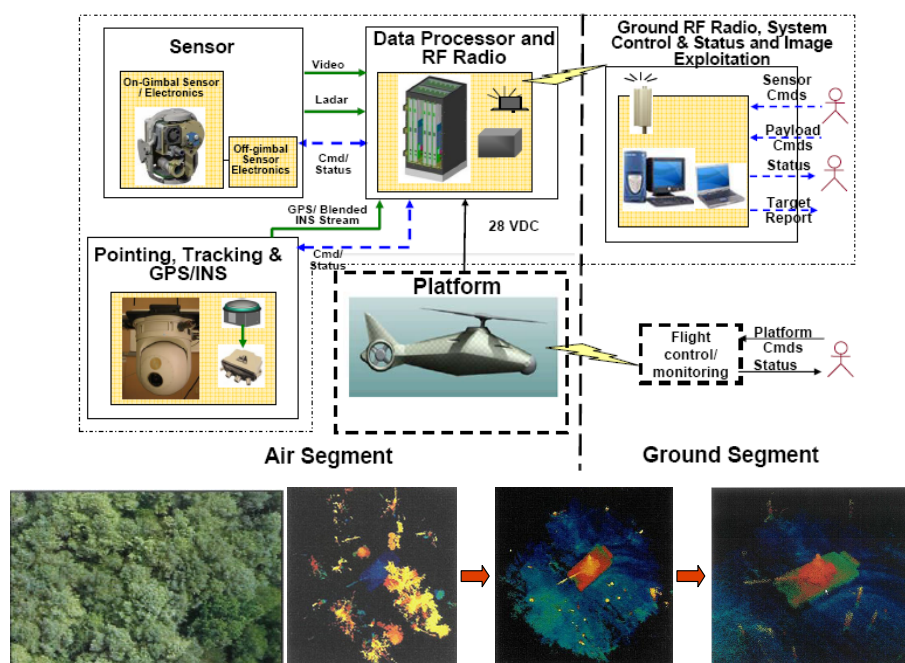
4 System och tillämpningar

Vi visar nedan ge några exempel på system som speglar utvecklingsläget inom spaning och kartering, måligenkänning, navigering och hinderdetektion (tabell 1). En översikt av laser för minspaning redovisas i en annan FOI-rapport [4].

4.1 Spaning och kartering

Inom spaningsområdet finns en stor och bara delvis utnyttjad potential. Den nya förmågan som 3D-laser erbjuder är främst att erbjuda ”optisk” 3D-avbildning av mål som är delvis dolda, i kamouflage, bakom eld, i moln eller i vegetation. Sedan länge har även förmågan att se bättre under vatten utnyttjats både för flygburna system samt system på AUV:er (obemannade undervattensfarkoster). Inom spaningsområdet är det naturligtvis önskvärt att kombinera laser med passiva elektrooptiska system t.ex. inom våglängdsområdena 3-5 μm eller 8-12 μm alternativt hyper- eller multispektrala lösningar. En annan intressant kombination är radar och laserradar där lite har gjorts hittills. Det finns även en stor delvis outnyttjad potential att förena aktiv spektral avbildning, 3-D samt polarisation.

JIGSAW-systemet är avsett för en UAV för att detektera och känna igen mål i vegetation genom att sammanfoga flera 3D-punktmoln tagna från olika vyer. Utvecklingsläget har nyligen beskrivits av M. Vaidyanathan et al. [92], se figur 41. Hela systemet inklusive gimbal (12 tum) väger 45 kg. JIGSAW tillåter ett autonomt arbetssätt efter det att den invisats till ett intressant område (t.ex. via FOPEN SAR typ Carabas). Större delen av databehandlingen sker ombord och en länk sänder ned bearbetade bilder till operatören.



Figur 41. Överst JIGSAW arkitekturen som den titt sig under fas 3 av projektet. Under visas detektering och identifiering av en stridsvagn under tät vegetation.

Ett annat exempel på UAV-ladarsystem för spaning kommer från LiteCycles [93] i Tucson som utvecklar ROAR® (Rapid Overt Airborne Reconnaissance) systemet [94] för minsparing i strandzonen både på land och i vatten. Man kombinerar här 3D-ladar och passiv EO. 3D-sensorn består av en 512×512 ICMOS grindad FPA. Skannern erbjuder multipla vyer för att kunna reducera våginflytande och även en följefunktion för att studera detaljer närmare. Figur 42 illustrerar funktionen och figur 43 ger vissa data. Penetration i vatten kräver relativt hög laserpulsenergi varför utrustningen blir större och tyngre än vad som skulle vara fallet för ett system enbart avsedd för land.



Figur 42. ROAR systemet och dess mission som är minsparing i grunda vatten och på stranden. Volym, vikt och elektrisk effekt uppges vara 0,05 m³, 125 kg respektive 2,5 kW. Källa Lite Cycles.

<u>Day/Night VSW through SZ</u> • 3,000 foot Altitude • 45 knots (with multiple looks) • 200×20 m Scanned Swaths • 5.6 sq. nm/hr, at max 40 ft depth (2KD) • 3D images • 1-ns, 2-ns, and 3-ns programmable gates • Notional Serpentine Interrogation Tracks Flow Parallel to Beach • Programmable Multiple Looks • Track-and-Revisit Mode • Mine/Obstacle Detection, 3-D range Profiling, and Bathymetric Mapping.	<u>Day/Night BZ through BEZ</u> • 3,000 foot Altitude • 68 knots • 200×60 m Scanned Swaths • 8.6 sq. nm/hr • Multiplexed 3-Color Active MSI
---	---

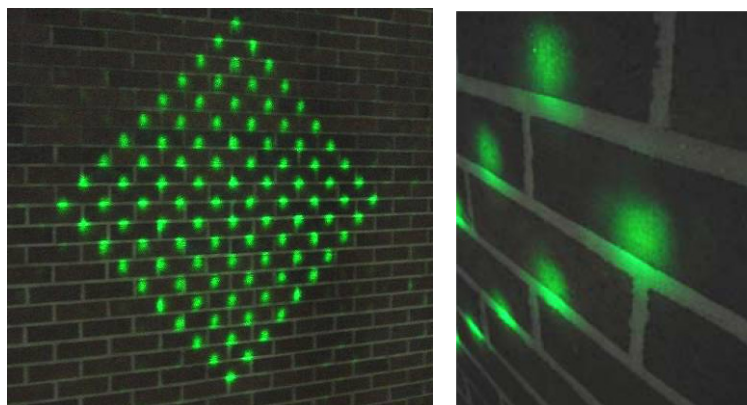
Figur 43. Exempel på systemparametrar för ROAR. (VSW: very shallow water, SZ: surf zone, BZ: beach zone, BEZ: beach exit zone). Källa: Lite Cycles.

Många lidarsystem kan kombinera spaning med kartering. Hit kan räknas de lidarsystem som utvecklas via AFRL (Pilar, Raider, ALIRT). Raider som är en efterföljare till Pilar är ett lidarsystem avsett för en UAV. Det sägs möta de krav som ställs på en *"for a combination attack and surveillance craft like the Predator"* [95]. Pilar och Raider, som kan operera på upp till 10 km höjd, baseras på LOCAAS-teknologin med en analogdetekterande detektormatris. AFRL har vidare utvecklat flera system för högupplöst terrängavbildning som opererar på låg höjd (100-tals meter). E BAIR är avsett för UAV och har mycket god avståndsnoggrannhet (sub-cm) och är baserat på en hög-prf-laser där pulsseparationen begränsar högsta höjd. Tabellen i figur 44 visar data för dessa multifunktionssystem med kapacitet för både terrängkartering samt se igenom vegetation och måligenkänning via multipla vyer.

Parameter	PILAR	RAIDER
Receiver Aperture (cm)	15	< 25,4
Power Required (kW)	1	2
Weight (lbs)	150	275
Slant Range (km/kft)	8 / 26	> 16 / 53
Spatial Resolution (μrad) – Spotlight	42	21
Spatial Resolution (μrad) – Terrain Mapping	84	42
Minimum Frame Size (m)	30×30	30×30
Frame Size (pixels)	90×90	180×180
Swath Width (meters)	<75 @ 12,500 ft	>400 @ 25,000 ft
Range Accuracy (cm)	9,375	7,5
Range Resolution (m)	4,0	1,0
Frame Rate (Hz)	4	> 8



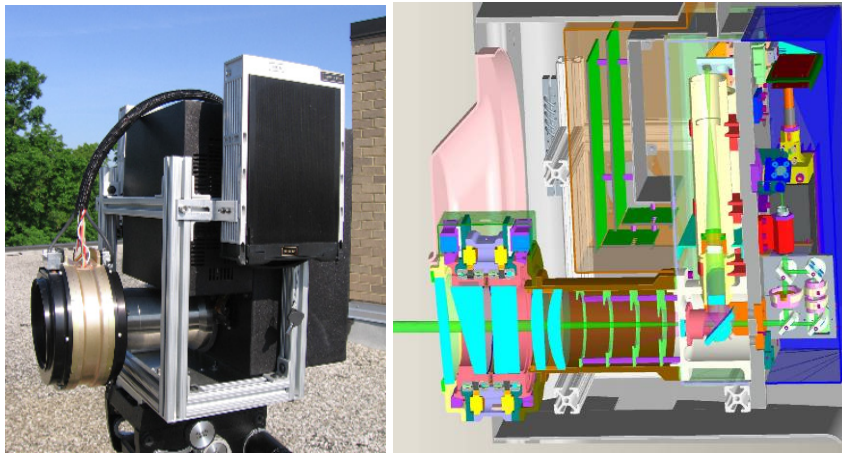
Figur 44. T.v. data för PILAR respektive det nya RAIDER (avbildas även överst t.h.). Underst till höger visas E BAIR för UAV baserad på enkel-detektor-skannande teknik [55].



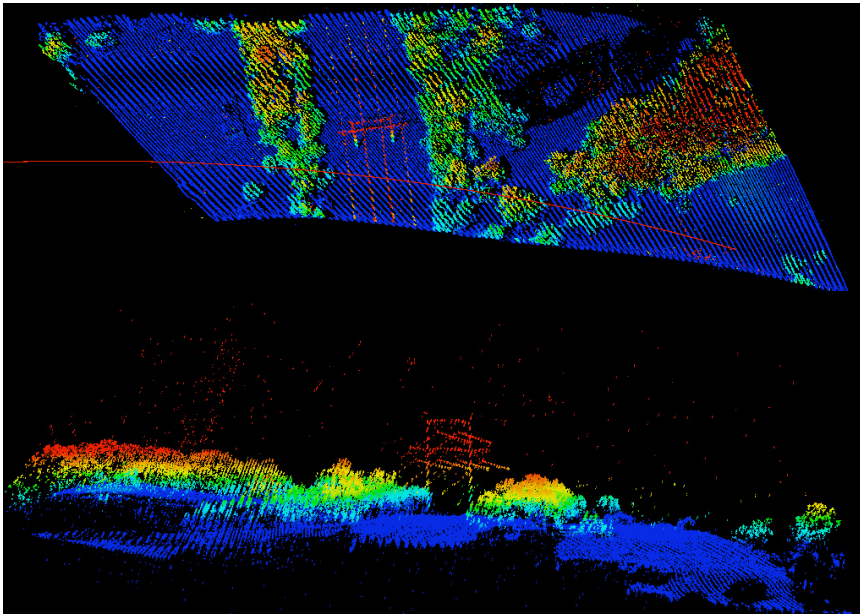
Figur 45. De utsända delstrålarna på 265 m avstånd från laserradarn i ett 10×10-mönster, format med ett diffraktivt optiskt element.

En intressant 3D-avbildande laserradar baserad på fotonräkning har utvecklats inom ett SBIR-projekt som genomförts av Sigma Space Corporation [18, 96]. Tillämpningen är avbildande laserradar monterad på en UAV med ~1 km flyghöjd. Projektet byggde vidare på en tidigare utveckling för NASA av *Microlaser altimeter* samt projektet *Coastal Area Tactical-mapping System* (CATS) vid University of Florida. Sändarlasern är en frekvensdubblad passivt Q-switchad mikrochiplaser med en pulsenergi på 6 μJ vid 20 kHz PRF. Med ett diffraktivt optiskt element (DOE) delas den utgående laserstrålen upp i 10×10 delstrålar, vardera med ~50 nJ pulsenergi, se figur 45. Mottagaren var en MCP(Micro-channel plate)-fotomultiplikator med segmenterad anod (10×10 segment) från Hamamatsu (typ R4110U-74-M100B[97]. Fotokatoden i GaAsP har 32-40 % kvantverkningsgrad. Tidsupplösningen är ±92 ps (stigtid 170 ps), vilket motsvarar en avståndsnoggrannhet på ±1,4 cm. Dessutom har PMT:n ingen dödtid, vilket gör att hög avståndsupplösning kan uppnås, ca 30 cm (beroende på dödtid i förstärkare och komparator).

Bildfältet (10×10 pixlar) kan dessutom skannas med en Risleyskanner (kilskanner). Pixeltakten är 2 Mpixel/s. Systemet väger ca 25 kg, se figur 46. Första flygningen genomfördes i augusti 2007. Ett bildexempel visas i figur 47. Med Risleyskannern erhålls ett linjärt skann 45° mot flygriktningen, d.v.s. diagonala stråk ”målas” upp på marken.



Figur 46. 3D-avbildande fotonräknande laserradar från Sigma Space Corporation, här på ett markstativ.



Figur 47. Bildexempel från en testflygning med den fotonräknande laserradarn från Sigma Space Corp [96].

Bushboom et al. [98] visade på en intressant tillämpning där lasertriangulering används för att verifiera att ingen öppnat eller tagit sig in i containrar. En skannande laser kan mäta in en yta med sub-mm-noggrannhet över stora ytor och det torde vara mycket svårt att dölja små förändringar om någon försökt rubba eller ta sig in i en container.

Wang [99] beskrev ett intressant koncept för volymövervakning i en 3D-struktur med 3D-ladar. Genom att bilda ett nätverk med ett fåtal lasersändare och många billiga mottagare samt utnyttja gångvägsskillnader mellan de olika mottagarna och målet kunde målet positioneras med stor noggrannhet. Genom att nyttja CDMA-teknik erhöles en flexibel arkitektur som kan användas för ett godtyckligt övervakningsområde med tillhörande topologi. Genom att bilda nätverk mellan sändare och mottagare skalar informationen från systemet som $N \times M$ där N antalet sändare och M antalet mottagare; att jämföra med ett icke nätverksbaserat system som skalar som N . Vidare ger nätverket mycket större positioneringsnoggrannhet.

4.2 Måligenkänning

Inom området måligenkänning har laserradarar en styrka som dokumenterats bl.a. för målsökartillämpningar. Styrkan ligger bl.a. i att 3D-data kan vridas och matchas mot ett antal målmodeller i givna men inte alltför många vinklar. Detta blir uppenbart även för en operatör, se Figur 47 Om upplösningen är hög kan måligenkänning ske på basis av en del av målet, t.ex. en motorhuv.

4.2.1 Upplösning för olika tillämpningar

Det är viktigt att analysera vilken upplösning som krävs för olika tillämpningar inte bara för att kunna bedöma prestanda utan även för att optimera ett system visavi kostnad, storlek och vikt. State of the art för 3 år sedan var att sannolikheten för korrekt identifiering var $P_{id}=80\%$ med en falsklarmssannolikhet $P_{fa}=20\%$. Man bedömer läget idag som $P_{id}=90\%$ och $P_{fa}=10\%$. Tabellen i figur 48 ger status för 3-4 år sedan beträffande uppnådda resultat med 3D-ladar.

Harney [100] har via en informationsteoretisk ansats visat att ladar med samma optiska apertur och våglängdsområde samt 5 avståndsceller över målet ger en räckviddsökning för måligenkänning med en faktor 2,7 jämfört med termisk IR.

Stationary Mobile Targets In-The-Clear with no Obscuration

POT	Detection	Recognition	ID
50			No Capability
100			No Capability
200			Uncertain Capability
400			Uncertain Capability
600			Demonstrated Capability
800			Demonstrated Capability
1000			Demonstrated Capability

Meaning of Demonstrated ■ Demonstrated in 6.3 ■ 80% Correct Identification Rate ■ Acceptable FAR	■ Detection => Vehicle ■ Recognition => Tank ■ Identification => T-72 Tank ■ POT => Pixels-on-Target
---	---

Figur 48. State-of-the-art för 3D-ladarns förmåga till automatisk detektion, klassificering samt identifiering av fordonsmål. POT= Antal pixlar på målet. Källa: NTO ATR working group.

4.2.2 Parametrar förutom 3-D

Den parameter som är enklast att utnyttja är intensitet som motsvarar reflektions-egenskaperna i mål och bakgrund. Laserreflektion kan utgöra en stark invisande parameter för t.ex. optiska sensorer, billyktor, vajrar, stolpar som alla uppvisar stark reflektion vid våglängden 1,5 μm eller därunder. Med multivåglängdslaser eller ”vitljuslaser” kan man göra aktiv spektral avbildning och således få ”färg på natten”. Detta bör vara en attraktiv möjlighet för spaningssystem som kan detektera anomalier vilka därefter sonderas med högupplöst 3D-ladar. Samma resonemang kan gälla för polarisation. Liten depolarisation kan ofta vara en indikation på människotillverkade föremål.

4.2.3 Systemexempel måligenkänning och målsökning

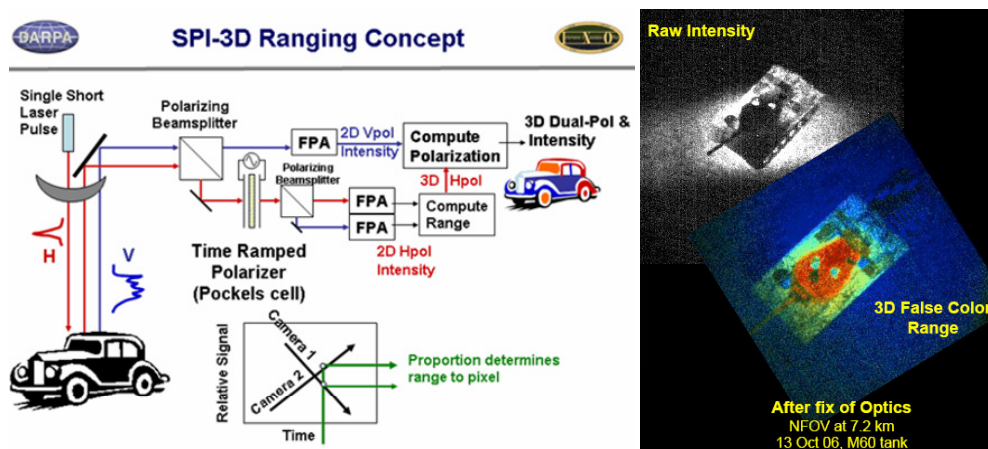
Airborne MX-20LDI Example Imagery, 5Km Range



Simultaneous nighttime co-boresighted FLIR image (Left) and Laser SWIR photo (Right). Note reading signs, bar targets, ladder, Positive ID of Nissan with Campershell from laser

Figur 49. Jämförelse mellan högupplöst IR och ladar. Avstånd 5 km (AFRL) [55].

En jämförelse mellan högupplöst aktiv avbildning med ladar och högupplöst IR visas i figur 49. I figur 50 som visar principen från programmet *Standoff Precision ID in 3-D* (SPI-3D) [55]. Genom att snabbt ändra polarisationen (inom en tidsram motsvarande pulslängden) hos en av de inkommande polarisationskomponenterna kan man genom kvotbildning mellan bestämma avståndet till varje pixel med en enda puls. Notera den goda avstånds- och vinkelupplösningen i figur 50 (t.h.) för en stridsvagn på 7 km avstånd, avstånd, reflektion och polarisation erhålles. Man skulle även kunna tillämpa t.ex. amplitud- eller faskodning under laserpulsen för att bestämma avståndet.

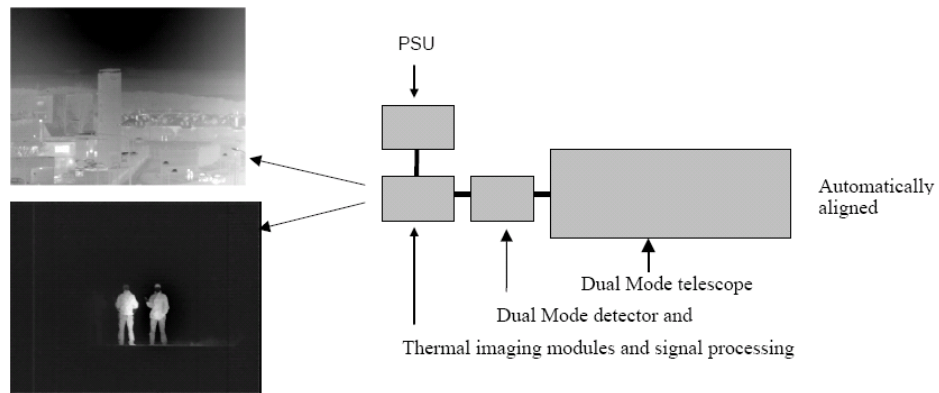


Figur 50. T.v. principen för avståndsmätning genom polarisationsvridning (bild DARPA) och t.h. ett exempel på en stridsvagn på 7 km avstånd [55].

Selex [101] presenterar bl.a. en kortpuls laser ($\ll 1$ ns) som ger ett brett spektrum och reducerar speckelproblemet vid aktiv avbildning. Selex arbetar även med en kombinerad IR/GV eller 3D-kamera som kombinerar fördelarna med passiv och aktiv avbildning, se figur 51. System för grindad avbildning har nu nått ett stadium där operativ prövning har påbörjats. Figur 52 ger exempel på pågående systemutvecklingar.

På 3D-sidan är utvecklingen till system inte riktigt lika fullgången som för grindad avbildning. Exempel på en kommersiell 3D-lasersensor är Advanced Scientific Concepts 3D-ladar (figur 53) som planeras att utvärderas vid FOI hösten 2008. Flera andra firmor har nu börjat saluföra 3D-kameror, t.ex. Ball Aerospace (figur 54) och Lite Cycles (figur 55). Systemen har främst utvecklats

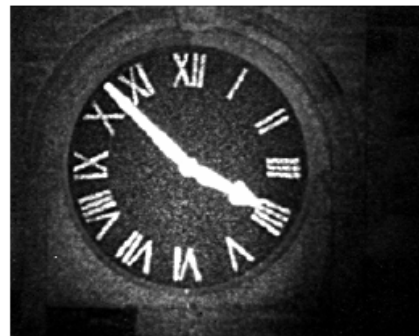
för målsökar- och UAV-tillämpningar. Figur 56 illustrerar några av dessa som varit teknikdrivande. Dock har flera av projekten avbrutits.



Simplified BIL system with combined thermal imager and laser gated imager



Narrow FOV thermal image



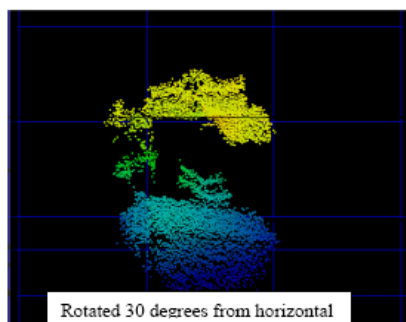
F10 active image



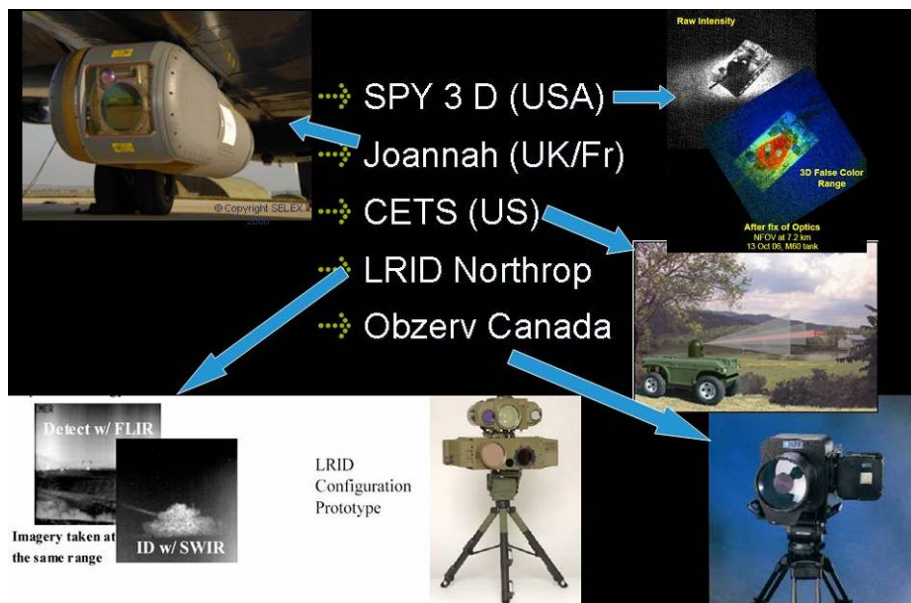
Narrow FOV thermal image



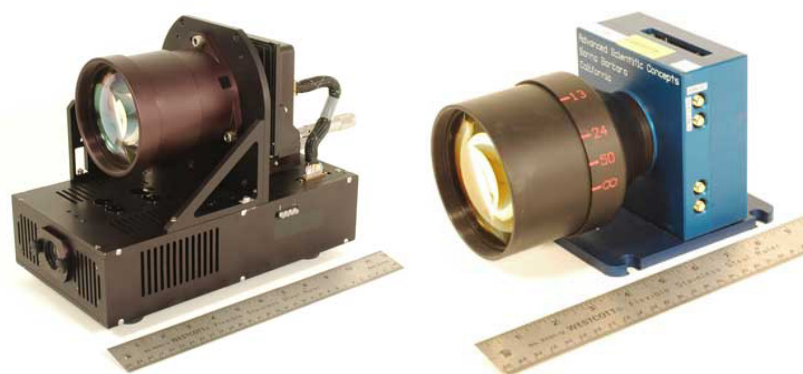
F10 active image



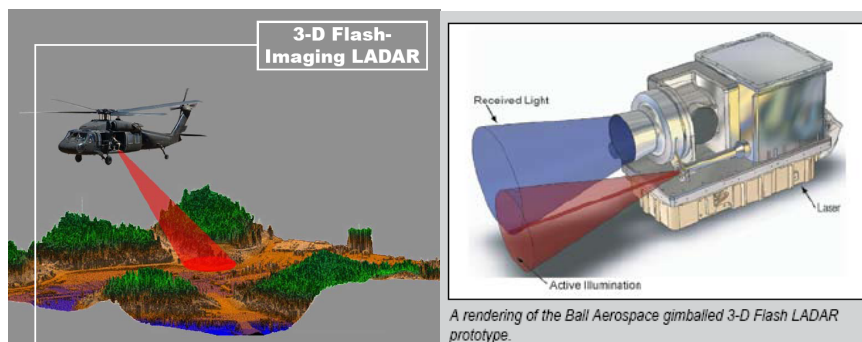
Figur 51. Exempel på kombinerade användning av IR och GV eller 3D-avbildning . Bilder Selex [6].



Figur 52. Exempel på pågående systemutvecklingar för grindad avbildning.



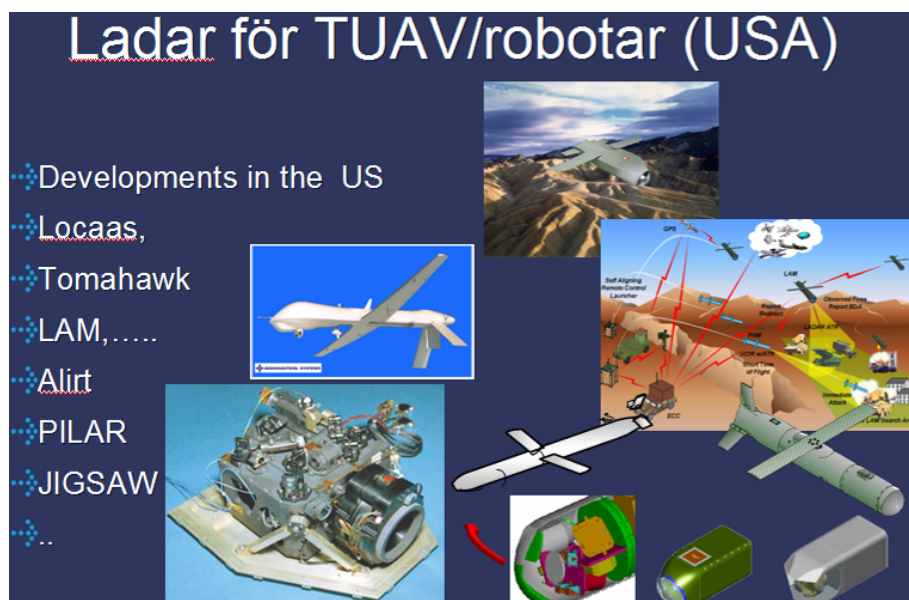
Figur 53. T.v. 3D-ladar vid $1,5 \mu\text{m}$ från Advanced Scientific Concepts, ASC[102]. Matrisstorlek 128×128 element, bildhastighet 30 Hz, vikt 6 kg, elektrisk effekt 400 W. Lasern är luftkyld. Trolig pulsenergi 10-20 mJ/puls. T.h. kameramodul utan laser.



Figur 54. 3D-Flash imaging ladar system från Ball Aerospace.



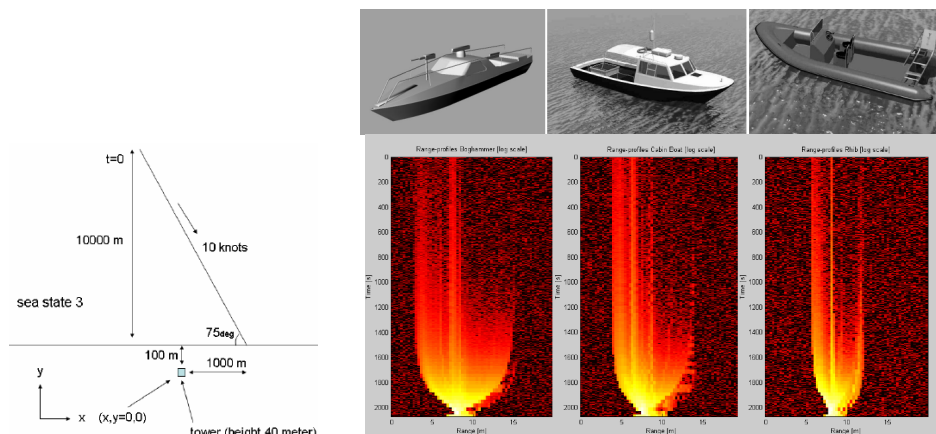
Figur 55. 3D-kamera från Lite Cycles-kameran ingår troligen i ROAR systemet (se ovan).



Figur 56. Exempel på ladarutveckling för UAV och robotar (USA).

Högupplöst avståndsprofilering kan även vara ett starkt stöd för måligenkänning speciellt för långa avstånd med få pixlar på målet. Van den Heuvel [103, 104] från TNO, Holland, arbetar med måligenkänning av marina mål, främst mindre fartyg med laseravståndsprofilering. Ämnet är bekant eftersom vi samarbetar inom detta område i det trilateral samarbetet med Kanada och Holland. Avståndsprofilering erhålles genom att analysera den mottagna vågformen och är intressant för att extrahera reflektions och 3D-struktur inom varje "pixel". På långt håll kanske målet inte är vinkelupplöst och då ger avståndsprofilering en första måligenkänning/klassificering innan full bildinformation (2D eller 3D) blir tillgänglig när målet närmast sig. Van den Heuvel et al. visar att Bayesiansk klassificering ger goda resultat. Metoden har stor relevans för skydd av fartyg och lasersystemet arbetar med fördel ihop med radar och/eller IRST. Det trilateral samarbetet har även påvisat nyttan av 1D-profilering av flygburna mål.

För små mål kan en söklidar t.o.m. vara bättre än radar och IRST på grund av det låga sjöklottret för laser, speciellt vid $1,5 \mu\text{m}$ våglängd. Som små mål kan nämnas periskop, folk i vattnet, jet skies och små snabba båtar. Detta visas och diskuterades i ett annat konferensbidrag av van den Heuvel [105, 106] se figur 57. Även FOI har erfarenhet av detta genom mätningar med ett grindat $1,5 \mu\text{m}$ system.



Figur 57. Simulerade 1D-avståndsp profiler för närmande båt med kurs och fart enligt diagrammet längst upp. Lasersystemet är placerat vid tornet, markerat med en turkos fyrkant. Avståndsupplösningen antas vara 30 cm (state-of-the-art). God klassificeringsförmåga redovisades baserat på dessa vågformer.

4.3 Navigering och hinderindikering

Navigering och hinderindikering är tillämpningar som lämpar sig väl för 3D-ladar. För helikopter har flera system byggts och testas genom åren och många system är nu i operativ drift. Bland de tidigare systemen märks OASYS som utvecklats av, Northrop Grumman. Selex saluför LOAM (laser obstacle avoidance system) med data enligt figur 58 nedan.

Det system som verkar ha haft störst kommersiell framgång är det tyska Hellas[107], som finns beskrivet i flera publikationer. Nyligen har man utvecklat en version 2 av denna med en rad förbättringar enligt figur 59. Tekniska data framgår av figur 60.



TECHNICAL CHARACTERISTICS

CONTROL PANEL

General characteristics	
Horizontal FOV	40°
Vertical FOV	30°
FOV Steering	± 20° both in horizontal and in vertical
Max. Detection Range	2000 m
Min. Detection Range	50 m
Obstacle Detection Probability	> 99.5 %
False Alarm Rate	< 1 per 2 hours
Qualified according to MIL STD 810E and MIL STD 461C	
Electrical Interface	EIA RS422, MIL-STD-1553B and analogue video input/output according to STANAG 3350B
Power Supply	+28 VDC, < 300 W (MIL STD 704E)
Eye-safe laser according to STANAG 3606 LAS class I	
Sensor head unit	
Dimension	320 x 239 x 419 mm
Weight	24 kg
Control panel unit	
Dimension	146 x 38,1 x 100 mm
Weight	0.5 kg
Warning unit	
Dimension	110,2 x 25,4 x 75 mm
Weight	0.35 kg

Figur 58. Hinderindikeringssystem enligt Selex.

HELLAS-A from Warning to Awareness

Enhanced Capabilities

- Increased Field of View
- Increased Detection Range
- Look into Turn Capability
- Detection of thinner Wires
- **Classification: WIRE, POLE, TREE Objects**
- **Prioritization of Objects**
- **Presentation of Object Situation incl. History function**
- Integral Part of the Aircraft Avionics with Map and FLIR Overlay of Objects
- Reduced Size and Weight



Figur 59. Förbättringar av HELLAS, ett hinderindikeringsystem från EADS visavi generation 1.

HELLAS-A Technical Data



Detection Range	max. 1200m, > 700 m for wires of 5 mm diameter
Detection Probability	> 99.5% within 1 second
False Alarm Rate	< 1 per 2 Flight Hours
Laser Power:	15 kW Pulsed Fibre Laser
Laser Wave Length:	1.5 µm, NIR (eye safe)
Field of View:	H x V 36° x 42°
Field of Regard	H x V 60° x 42°
Scan Frequency:	3 Hz
Weight:	< 24 kg (SHU), 0,5 kg (CP)
Power consumption:	< 330 VA @ 28 VDC (incl. 50VA de-icing)
Temperature:	-40°C to +50°C
Dimension:	W 320 mm, H 300 mm, L 320 mm (W 13.0 inch, H 12.6 inch, L 13.0 inch)



Figur 60. Tekniska data för HELLAS 2.

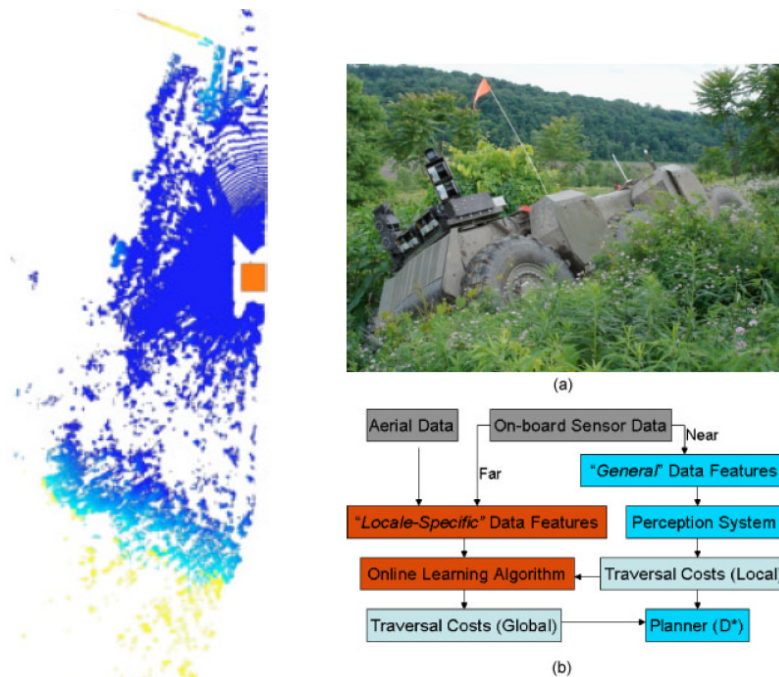
Ladar har även studeras intensivt för navigering och hinderindikering. Man studerade tidigt och fann att ladar var en mycket värdefull sensor för autonoma landfordon. Det avspeglar sig tydligt i DARPA:s tävlingar Grand Challenge och Urban Challenge [108] där majoriteten av fordonen har haft en avståndssensor i form av en ladar. Den lasertyp som verkar vara vanligast är en skannande SICK-laser [109].

Ett exempel på området där ladar visat sig värdefull relativt passiva sensor är detektion och följning av vägkanter [110]. Ofta är dessa förknippade med en plötslig ändring av höjd eller reflektion. Detta lämpas sig väl för en ladar att detektera och man blir härmed mer robust mot ändring av belysning (sol, skugga, mörker) och väder jämfört med passiva EO-sensorer. 3D-data är även lämpligare för snabba och robusta följealgoritmer.

Man kan med fördel utnyttja data från satelliter eller flygburna sensorer för att ”guida” UGV:er på marken. En kombination av passiva sensorer och ladar kan här vara till stor hjälp för scentolkning. Möjlighet till effektiv scentolkning kan även innefatta att man kombinerar de tillgängliga data från flygburna sensorer med de som erhålles från fordonets egna sensorer. Detta blir mer uppenbart när

man betraktar vad ett laserskann från fordonet ger. I figur 61 illustrerar hur terrängen maskerar lasersonderingar som ligger en bit från fordonets närmaste omgivning. Om man fyller ut dessa ”luckor” med data från en flygburen sensor eller satellit så kan man ge en bättre scentolkning som lämpas sig för snabbare framfart av fordonet. En självlärande algoritmer som beräknar kostnadsfunktionen i realtid för en robot presenteras av Sofman et al. [111]. Figur 61 höger del indikerar hur denna algoritmer arbetar. I ett annat paper från samma grupp från Carnegie Mellon [112] diskuteras ytterligare fusion av flygburna och fordonsbundna 3D-lasermätningar.

På senare tid har man börjat studera 3D-Flash-sensorer för navigering och hinderindikering. Ett exempel på detta diskuteras av Navarro-Serment et al.[113] där man från 3D-data först estimerar markplanet och sedan gör detektion och igenkänning av fotgängare baserat på höjd över marken. Figur 62 visar hur man kombinerar linjeskanner på sidan med en 3D-flash sensor monterat på ett pan-tilt huvud.



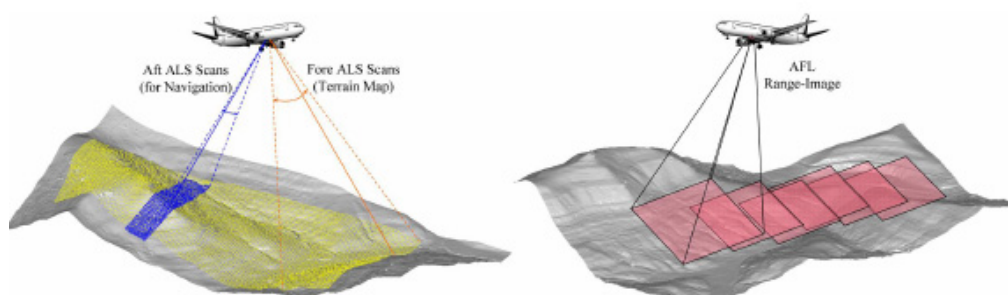
Figur 61. Exempel på laserskann nära ett fordon (orange box). Blått indikerar låga träff och gult högre. Vi ser hur terrängen maskerar stora områden relativt nära fordonet. Till höger illustreras hur den självlärande algoritmer för kostnadsberäkningar tar hänsyn till både fordons data och andra data t.ex. från flygburna sensorer. Från ref. [110].



Figur 62. Tv. En tecknad bild och t.h. ett foto av fordonet med installerade laserlinjeskanners på sidorna och bakåt och en 3D-flash sensor på ett pan-tilt huvud. Från ref. [113].

Exempel på användande av 3D-flash-sensorer för navigering inomhus och i urban miljö ges av de Haag et al. [114] I dessa miljöer kan man inte lita på tillgång av GPS hela tiden. Med 3D-sensorn kan man uppskatta plan och deras skärning (hörn) samt hur sensorn eller UGVn är orienterad relativt dessa plan. I ett senare papper [115] visas hur man kan extrahera alla plan runt en UGV på mindre än en halv sekund. Metoden lämpar sig alltså väl för realtidsstyrning.

Både radar och passiv EO har använts för terrängnavigering. Laser har genom sin höga noggrannhet blivit alltmer intressant för denna uppgift. En annan trend är att utnyttja flera sensorer för navigering så att de stöttar varandra. Genom att integrera en 3D-lasersensor med en tröghetsnavigeringsenhet (IMU) får man ett system som kan fungera trots GPS-bortfall p.g.a. interferenser eller avsiktlig störning. Man kan även utnyttja 3D-sensorn t.ex. för autonom landning mm. En analys av Vadlami et al. [116], se figur 63, jämför navigering med hjälp av en 3-D FPA och en laserlinjeskanner som tittar framåt respektive bakåt. Båda metoderna var kapabla att nå meterprecision med en drift av storleksordningen 100 m/h.



Figur 63. Två olika laserbaserade metoder för terrängnavigering. Från Vadlami et al. [116]. 3D-sensorer för förändringsdetektion och i nätverk

5 Sammanfattning av system- och tekniktrender

Laserradarområdet utvecklas för närvarande snabbt. Vi har här inte tagit upp lidarsystem (Light Detection And Ranging), som är i princip samma sak som ladar. Beteckningen lidar avser oftast system i vissa tillämpningar såsom atmosfärssondering, vindmätning och mätning av föroreningar, här märks en tydlig kommersialisering av system för rutinmätningar på flygplatser och i industri-miljö.

Utvecklingen inom området 3D-ladarsystem sammanfattas enligt nedanstående lista.

Teknologi:

- Nya laserkällor utvecklas ständigt, speciellt intressant är utvecklingen av
 - Fiberlaser
 - Vitljuslasrar med bred spektral emission (vis/NIR)
 - Ultrakorta pulser (ps-fs)
 - Frekvenskamteknik (fs-laser)
 - Diodpumpade fasta-tillståndslasrar (mikrochip, avstämbara lasrar)
- Nya detektormatriser
 - Större Geigermod APD (128×64) matriser
 - Koherent detektion och fotonräkning
 - CMT APD matriser för passiv (MWIR) och aktiv 3D-avbildning
 - Fortsatt utveckling av matriser med analog detektion (Advanced Scientific Concepts)
- Stark utveckling på processorchip och snabba AD omvandlare
 - Alltmer kan göras med digital signalbehandling i stället för i den optisk analoga domänen.

Systemutveckling:

- Utveckling mot kompakta tripoder och handhållna ladarsystem samt system för UAV
- Fortsatt utveckling av JIGSAW-konceptet (se genom vegetation från UAV)
- Fortsatt stark utveckling av lidarsystem för fjärranalys (vind, CO₂, farliga ämnen etc.)
- Nya koncept utnyttjande
 - Direkt/koherent detektion med fotonräkning
 - Multiapertursystem/3D-avbildning med multivåglängd och fasinformation
 - Syntetisk aperturladar (SAL), två olika systemkoncept demonstrerade från flygplan
 - Ladar med extrem precision i avstånd och Doppler (fs-frekvenskamteknik mm.)

6 Nyttan av 3D-laser för försvar och säkerhet

3D-laser ger nya förmågor som svårigen kan uppnås på andra sätt. I tabell 6 nedan sammanfattar vi några sådana tillämpningar och fysikaliska begränsningar sätter press på teknologi och metodutveckling.

Tabell 6. Sammanfattande tabell över förmågor och tillämpningar för 3D-laser.

Förmåga	Tekniska utmaningar	Exempel på lösning	Taktiska behov	Exempel på internationell utveckling
Se igenom moln och dimma, grumligt vatten etc.	Klara täta medier med mycket multiplaspredning.	Utnyttja "ballistiska fotoner", hög tidsupplösning, hög känslighet (ned till enkel-fotondetektion). Bistatiska system.	Flyga ovanför moln och se markmål, se i extremt dåligt väder, se i grumligt vatten.	DARPA program, UAV system (SPI 3-D), kunna landa helikopter och följa fordon med reducerat inflytande av uppvirvlande stoft ("brown-out").
Se igenom vegetation, kamouflage-nät, etc.	Att se igenom tät skyl (ned till djungel) och kamouflagernät med så få vyer och på så kort tid som möjligt.	Hög tidsupplösning, tät sampling, flera vyer som sätts samman. Ev. penetration genom blad med ballistiska fotoner.	Se igenom skog från flyg och markburna plattformar.	JIGSAW, SPI 3D och flera andra 3D-ladar-system.
Känna igen mål långa håll (>10 km fordon, fartyg, flygplan, etc.). Alt. soldater, vapen, missiler, små UAV under 10 km.	Små och många pixlar samt stor mottagarapertur. Relativt hög lasereffekt. Alternativt multiaperturer eller syntetiska aperturer.	Pixelmatriser med pixelavstånd kring 10-15 µm. Syntetisk aperturlidar (SAL) samt multiapertur-system utnyttjande koherent mätteknik. TCSPC-teknik (time correlated single photon counting). Grindade system med kort (10 ps) grindförmåga.	Markmål från flygburna plattformar, luftmål, mål på havet. Alternativt små mål (soldater, missiler, vapen på mellanavstånd 5-10 km). Detaljer som antenner och andra del av mål. Optikklassificering.	UK Selex system, GV system baserade på Intevac eller gen 3 bildförstärkare (Obzerv). SALT syntetisk aperturlidar (DARPA).
Hög yttäckningshastighet.	Stora detektormatriser, fåfotonskänslighet per pixel.	3D-FPA baserad på konventionell analog detektion alternativt Geigermod.	Kartering, spaning.	Olika lidarstern (Sigma Space corporation, ALIRT, RAIDER).
Multifunktionssystem. Spaning, kartering, igenkänning, inmätning mm.	Flexibla kompakta lösningar, programmerbara vågformer, strålkontroll.	I dag gimbalbaserade lösningar, i morgon lösningar baserade på icke mekanisk strålstyrning och strålformning.	UAV eller fordonsbaserade system, "persistent surveillance", kartering och eldledning i samma system för att korta ledtider.	RAIDER.
Integrerade aktiva/ passiva system	Full integration med samma detektor och optik för passiva och aktiva funktioner. Spaning och igenkänning, samt bekämpning med hjälp av samma typ av sensor.	APD matriser baserad på CMT. Effektiva optiklösningar för olika våglängdsband, zoomfunktion. Utnyttja passiv 3D-avbildning där detta passar o kombinera med laser för att uppnå absolut och hög noggrannhet, klara fall där passiv teknik har svårigheter (skuggor, lågkontrastytor etc.).	Passiv icke röjande spaning, aktiv igenkänningsinmättnings- och målutpekningssfas.	Selex dual mode CMT detektor. För passiv avståndsmätning baserad på motion stereo se t.ex. [2].

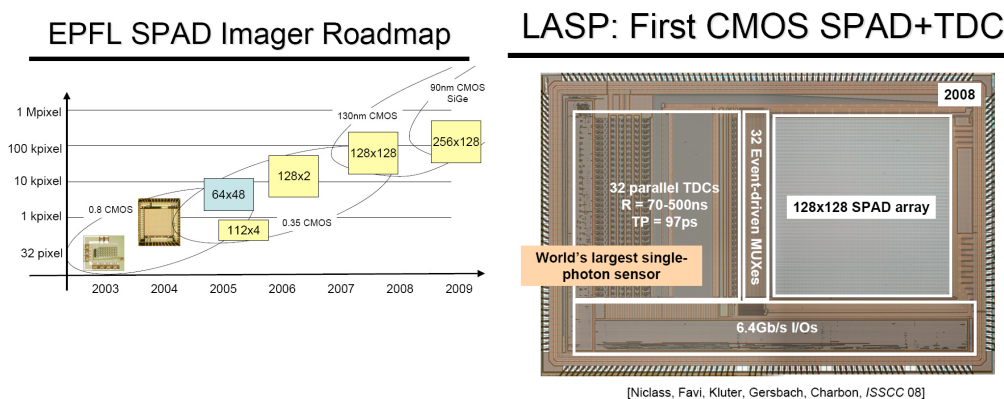
6.1 Se igenom moln, vatten, dimma

Ny forskning med ultrakorta laserpulser (femtosekundspulser, $1 \text{ fs} = 10^{-15}$ sekunder vilket motsvarar $0,15 \mu\text{m}$ i avstånd) har gett upphov till intressanta fenomen som att vatten kan uppvisa två storleksordningar lägre absorption vid pulslängder kring 60 fs jämfört med längre laserpulser. Mätningarna tyder på att irradiansen följer en dämpning som en funktion av utbredningsavståndet z enligt $\sim 1/z$ jämfört med den förväntade exponentiella dämpningen enligt Beers klassiska lag (dämpning $\sim \exp(-\alpha z)$) [117]. Effekten kan förklaras med att vattenmolekylerna ”inte hinner reagera” vid växelverkan med så korta pulser att dessa understiger tidskonstanten för själva absorptionsprocessen i vattenmolekylen (absorption via vibrationsövergångar i OH-bandet).

Om resultatet håller skulle absorptionen i vatten för grönt laserljus (532 nm) motsvara en dämpningslängd på hela 5 km, d.v.s. det skulle göra oceanerna transparenta för laserbaserad avbildning liksom även ge möjlighet till kommunikation ned till stora djup med extremt höga bandbredder. I oceanvatten domineras dämpningen emellertid av klorofyll. Effekten av vattenlöst klorofyll bör emellertid studeras för att undersöka om den låga dämpningen som observerats för femtosekundspulser även kan observeras i närvaro av klorofyll. Spridning i små vattenpartiklar utgör i kustvatten den dominerade dämpningsfunktionen. Spridningsförluster har hitintills emellertid bara behandlats under antagandet om att laserpulsen är längre relativt det spridande mediets tidskonstant. För femtosekundspulser bör spridningsförlusten beräknas och valideras genom experiment innan närmare slutsatser kan dras. En preliminär analys [118] indikerar att lägre dämpning troligtvis kan observeras även i detta fall.

Eftersom vatten är den huvudsakliga komponenten i dimma och moln så är det möjligt att väsentligt öka räckvidden även här. Detta skulle få mycket stor betydelse för möjligheterna att nyttja högupplöst optisk avbildning eller tyst, säker och optisk kommunikation med hög bandbredd till marken från en position ovan molnen eller vice versa. Femtosekund-tekniken torde dock vara osäker ur tillämpningssystempunkt och behöver studeras mer på grundforskningsnivån.

Lasrar inom ps- och ns-området har dock fortfarande goda möjligheter att se igenom täta medier med tillgång till hög puls eller medelenergi och mottagare med stor apertur och känsliga snabba detektorer. Tidsupplösningen för dagens Geigermodmatriser understiger 100 ps, de har enkelfotonkänslighet, och de tillverkas nu i med många pixlar (figur 64). Dessa borde vara av intresse för denna typ av tillämpningar.



Figur 64. Utvecklingen av SPAD matriser (single photon avalanche detectors) vid EFPL i Lausanne. Källa prof. Charbon.

6.2 Se igenom vegetation och andra skyl

Här krävs inte så extremt korta pulser och tidsupplösning som i det övre fallet. Vad som är viktigt är i stället att eventuellt kunna ta multipla vyer över samma scen för att öka genomträngningsförmågan. En annan viktig parameter är hög samplingstäthet så att man kan få så många punkter på målet som möjligt. JIGSAW m.fl. system har denna förmåga. Frågan har studerats vid FOI och grundläggande mätningar av vegetationspenetration har utförts både från mark- och flygburna utrustningar. Se vidare Chevalier[1] et al och referenser i denna rapport.

6.3 Känna igen mål på långa avstånd

För flygburna tillämpningar kan detta innebära ett krav på igenkänning av fordon och fartyg på 10-30 km avstånd. Dagens GV-system vid 1,5 μm med kanske 20-25 cm optik klarar detta eftersom turbulens inte utgör någon nämnvärd begränsning i detta fall. Den nominella upplösningen bör även räcka för igenkänning av ett hot från manburna luftvärnssystem (MANPADS) inom skotträckvidd (< 6 km) om skytten står öppet. Om man tillåter kortare våglängd, t.ex. 0,8 μm som fallet är för det kanadensiska Obzerv-systemet, så kan man erhålla än bättre vinkelupplösning. Dagens bästa bildförstärkarrör kanske har en upplösning kring 60 lp/mm eller bättre motsvarande ca 8 μm pixelavstånd. Dagens bästa 3D-FPA ligger kring 25 μm i pixelavstånd men det är inget som motsäger att denna siffra kan bli avsevärt lägre. För de bästa digitalkamerorna ligger man i idag på ca 3 μm . Riktigt långa igenkänningsavstånd (10-tals mil) kräver någon form av multiapertur eller syntetisk aperturteknik.

Om man inte upplöser målet helt i vinkelled kan ändå en hög upplösning i avstånd stödja igenkänning genom att på långa håll genom matchning av lasersvaret mot avståndsprofiler och retroreflexsignaturer i tidsplanet mm. Det föreligger ett forskningsbehov avseende 3D-igenkänning så att man eventuellt kan komma fram till en liknande typ av metrik som tillämpas för vanliga bilder (antal linjepar över den största måldimensionen).

6.4 Hög yttäckningshastighet

Dagens kommersiella karteringssystem har vanligtvis en detektor och en maximal avsökningshastighet på 100-200 kHz (= lasersns prf). Men en pulsenergi på 10 $\mu\text{J}/\text{pixel}$ hamnar vi på en lasereffekt på 1-2 W. För högre avsökningshastigheter krävs matriser och höga lasereffekter. Ladar systemet från Sigma Corporation med en 10×10 matris som citerades tidigare har t.ex. en dataakt på 2,2 Mpixel/s. Eftersom det i princip inte finns några hinder från att utveckla Mpixel-matriser åtminstone i form av SPAD så kan vi se fram emot lasersystem med 100 tals km^2/h i avverkningshastighet med samplingstätheter mellan 10-100 $/\text{m}^2$. Det är sammanhanget intressant att se på utvecklingen inom 3D-kartering med hjälp av digitala kamerabilder. Denna utveckling har accentuerats på senaste tid bl.a. via Saab och det nyligen bildade bolaget C3 Technologies [2, 119]. Det finns även internationella aktörer som använder digitalfoton för 3D-kartering, så har t.ex. forskning från DLR omsatts i produkter från företaget 3-D RealityMaps [120]. Tekniken bygger på högupplöst flygfotografering med noggrant kalibrerade kameror. Kamerans position och vinklar för varje bild är uppmätta med väldigt hög precision med hjälp av ett mycket avancerat navigationssystem. Detta gör att man med decimeternoggrannhet kan beräkna var varje pixel i bilden träffar jordklotet. Med teknik för stereo-seende används två bilder i följd för att beräkna höjdprofilen över området. Resultatet blir ett flygfoto där varje pixel är positionsbestämd i tre dimensioner. Eftersom avståndsberäkningen kräver en kontrast mellan en pixel och den närmaste omgivningen så kommer noggrannheten av variera över scenen. Saab anger ca 0,2 m avståndsnoggrannhet över städer från 600 m höjd och ca 100-150 km^2/h i effektiv avsökningshastighet. För 2000 m höjd anges en upplösning av 0,4-0,5 meter och en

avsökningshastighet på 400-600 km²/h. Figur 65 illustrerar 3D-avbildning över Stockholm baserat på digitalfoto.

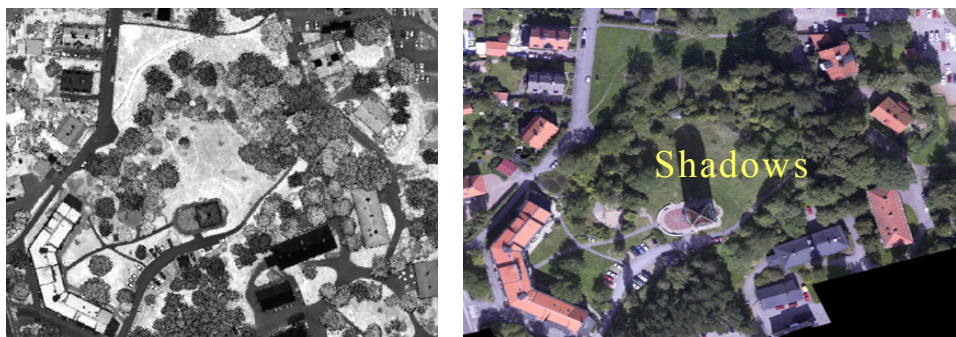


Figur 65. 3D-avbildning över Stockholm, från ref. [119].

En uppenbar tanke vore att förena laser och digitalfototekniken av flera skäl:

- Lasertekniken har större avståndsnoggrannhet (ned till cm eller sub-cm-nivå)
- Lasertekniken klarar områden där digitalfotot har svårt exempelvis kontrastlösa ytor (blanka vattenytor, svarta tak etc.)
- Lasertekniken klarar att se ned genom vegetation, i skuggpartier etc.
- Laser klarar mörker och sämre väder
- Digitalfototekniken ger å andra sidan god återgivning direkt i färg och har stor avverkningshastighet med litet fotavtryck

Det finns en fundamental skillnad mellan en aktiv teknik och en passiv i form av digitalfoto. Detta illustreras i figur 66 där en direkt jämförelse mellan detaljåtergivning från en laserreflektionsbild och ett färgfoto görs.



Figur 66. T.v. en laserreflektionsbild och till höger en färgbild från ett område i Linköping. Notera skillnad i återgivning från skuggpartier mm. Dessa fundamentala skillnader kommer att avspeglas i skillnader när det gäller noggrannhet i 3D-kartering.

6.5 Multifunktionssystem

Ett kombinerat system för kartering nyttjande både laser och digitalfoto eller högupplöst IR skulle kunna förena den passiva teknikens stora detaljåtergivning och avsökningshastighet med laserteknikens större precision och möjlighet att "se igenom". Om man t.ex. har glesare lasersondering jämfört med den passiva sensorn kan man bibehålla den höga avsökningskapaciteten. Skillnadsdetektion är en teknik som väl lämpar sig för 3D-ladar eftersom 3D-signatur är robust mot omgivningens skiftningar.

Multifunktionssystem för spaning kan kombinera hyper- eller multispektral teknik med 3D-laser. Härigenom kan man öka både detektions- och klassificeringsförmågan. Olika moder kan användas för de ingående sensorerna beroende på tillämpningen och scenens utseende. Sålunda kan man tänka

sig att en hyperspektral sensor detekterar anomalier som sedan analysers med en högupplöst 3D-sensor eventuellt utnyttjande multipla vyer.

Andra uppenbara multifunktionsmöjligheter ges genom kombination av IR för detektion med 3D-laser för klassificering eller identifiering, följning och målutpekning för semiaktiva eller laser-målsökande missiler utnyttjande korrelation med 3D-data från inmätningssensorn. Den termiska funktionen och ladarfunktionen kan kombineras i samma FPA-detektor (jfr Selex sensor). Denna detektor kan även användas som punktföljare och även erhålla sina 3D-data från en annan belysningslaser (bistatiska system).

En annan möjlighet till multifunktion är IRST med ladar. Den stora avspanningsrummet för IRST kan kombineras med ladar för måligenkänning, klotterundertryckning, precisionsföljning mm. Det senare lämpas sig mycket väl för 3D-ladar eftersom en ”3D-box” runt målet reducerar beräkningsbördan jämfört med passiva system p.g.a. den goda segmenteringen mellan mål och bakgrund.

6.6 Systemexempel: Lynx

Förra året avrapporterades laserradar på den kommersiella marknaden. Mycket hade då hänt på sensorsidan sedan det senast gjordes en undersökning 2005. De sensorerna för mätningar av statiska scener hade blivit både snabbare, noggrannare och mer kompakta. Sensorerna för mätningar av dynamiska förlopp, med plattform infäst på bil, båt eller tåg, hade börjat sitt intåg på den civila marknaden. Förra året gjorde ett par system insamlingen i några kilometer i timman. Nu kan vissa fabriker leverera utrustningar med en insamlingshastighet på fordonet uppemot 100 km/h. Till exempel har Kanadensiska Optech kommit med systemet Lynx, figur 67, se tabell 7 för prestanda. Lynx består av en till fyra ladar-sensorer som var och en ser 360° vertikalt. Systemet innehåller även ett tröghetsnavigeringssystem, GPS, enhet för distansmätning vilket gör att uppmätt punktmoln blir georefererat i rikets nät. Exempeldata visas i figur 68.

Svenska Visimind [121] har utvecklat ett system innehållande en ladar från Leica (Modell HDS med pulsfrekvens 150 kHz). Även denna utrustning innehåller tröghetsnavigering (Imar) samt GPS. Utrustningen innehåller även en kamera (11 Mpixels). Engelska Streetmapper [122] utnyttjar samma teknik men med en ladar från Riegl.

Användningsområden för denna dynamiska lidar monterad på markgående fordon kan till exempel vara:

- Militärt
 - Kartering (Urbana miljöer, vägar, vegetation)
 - Mätning av förändringsdetektion
- Motorvägar
 - Struktur, körbana och mätning av vägbeläggning
- Stadsmodellering
 - Mätning av byggnader och dess omgivningar (figur 68)
 - Fasadmodellering
- Säkerhet
 - Planering och kontroll
- Miljö
 - Översvämningsskydd, land- och kusterosion, stenbrytning
- Övrigt
 - Frigång för kablar, mätning av sättningar, avrinning (för beräkning av översvämningar).



Figur 67. Lynx (2 mät huvuden) monterad på en bil.

Tabell 7. Prestanda för Optech Lynx.

Mätavstånd	100 m vid 20% reflektion
Pulsrepetitionsfrekvens	100kHz
Laserklass	IEC Class 1
Synfält	1 till 4 oberoende 360° skannrar
Multipla ekon	Upp till 4 stycken
Positioneringssystem	POS/LV V420 eller ekvivalent
Spatiell noggrannhet	±5cm
Avståndsupplösning	±8mm
Spatiell upplösning (10 m avstånd och hastighet 50 km/h)	Bättre än 10 cm



Figur 68. Punktmoln insamlade med Lynx i urbana miljöer. Dataexempel från InfoTerra.

7 Diskussion

En avgörande fråga när det gäller inriktningen av framtida forskning är vilka förmågor som ska förbättras eller i vissa fall ens erhållas. Som nämndes i förra kapitlet kan en 3D-laser leverera följande förmågor:

- Se igenom moln, vatten, dimma
- Se igenom vegetation, kamouflagenät och andra skyl
- Känna igen mål på långa håll
- Hög yttäckningshastighet
- Multifunktionssystem

Beroende på den plattform som valts för att uppnå ovanstående förmågor kommer tänkbara lösningar kunna se väldigt olika ut. Ska det vara ett person- eller vapenburet system behöver lösningen vara mycket kompaktare än om det ska vara fordons-, fartygs- eller flygplansburet. Detta styrs givetvis av tillämpningen som i en uppräkningslista kan se ut liknande indelningen i kapitel 4:

- Spaning
- Kartering
- Måligenkänning
- Navigering och hinderindikering
- Förändringsdetektion

I denna rapport har en uppsjö av olika tekniska lösningar visats. Vid en första anblicka liknar de varandra, men vid närmare granskning har de sina egna finesser. Grovt kan man dela in de olika teknikerna i kategorier enligt tabell 8.

Tabell 8. Tabellen visar grovt var olika laserbaserade har sina styrkor, och hur de kan komplettera varandra. Fler plus indikerar en bättre förmåga.

	Räckvidd / Nattseende / Skyhning	Avstånds- upplösning	Avstånds- noggrannhet	Spatieil upp- lösning	Temporal upplösning (bildtakt)	Kontrast / Spektral upp- lösning
1D-profilering	++	++	++	-	++	-
Skannande ladar	++	+	++	+	-	+
GV (konstant grindlucka)	++	-	-	++	++	+
GV (stegande grindlucka)	++	++	+	++	-	+
2,5D-sensor	++	+	++	++	+	+
3D-Flash	++	++	+	+	+	+
Passiv sensor	-	-	-	++	+	++

Först de *1D-profilerande systemen*, som endast är försedda med en detektor, men med hög prf och med hög upplösning kan samla in vågformsekon från något fjärran mål. Sedan kommer de *skannande ladarsystemen* som med mekanisk avlänkning kan sprida enskilda mätpulser i en kontrollerad mängd riktningar. Upplösningen är hög, men förmågan att fånga förändringar under mätning finns inte. Den tredje kategorin, grindad avbildning (*GV*), har delats in i två grupper på grund av sina olika arbetsmoder. Ifall grindluckan hålls stillastående kan en hög bildtakt uppnås samtidigt som man har viss avståndsinformation, nattkapacitet och möjlighet till långa mätavstånd. Om man istället låter luckan glida över scenen får man bättre avståndsupplösning, men man tappar möjligheten till höga bildtakter. Kategorin *2,5D-sensor* avser sensorer som består av en detektormatris som läser av en avståndsbild med ett avstånd i varje pixel, med hög bildtakt. Näst sista kategorin, *3D-Flash*, avser detektormatriser som i varje pixel samlar in vågformen, d.v.s. den fullständiga avståndsinformationen i scenen. Tyvärr är dessa sensorer idag lite långsamma och kan inte ge så hög upplösning, men data innehåller maximalt med information. Kategorin *passiva sensorer*, är med som referens och för att visa att kombinationer av aktiva och passiva sensorer kan ge stora vinster.

7.1 Spaning och måligenkänning

I tabellen kan man se att om vi vill samla in dynamiska scener (hög temporal och spatiell upplösning) borde vi hålla oss till ett GV-system, medan om vi dessutom vill ha fullgod 3D-information (hög avståndsupplösning), så får vi istället hålla oss till 2,5D-sensorer eller till och med 3D-Flash.

En fullständigt 3D-avbildande sensor såsom AFRLs 3D-Flash, som lite för lätt ses som lösningen på alla problem, är i alla avseenden är mycket dyr lösning, varför det finns åtminstone ekonomisk anledning att kompromissa. Istället för att samla in en hel volym av data kanske det kan räcka med att samla in en eller ett par avståndsskivor med information och kombinera detta med en avståndssprofil. Denna kombination planeras att undersökas inom det trilateral samarbete med Kanada och Holland som FOI deltar i.

Kombinationen av aktiv och passiv avbildning är ett annat hett ämne. 3D-avbildning har ibland svårighet med invisning och detektion, på grund av sin smala lob. Med rätt passiv sensor fås en mycket slagkraftig kombination, och på många håll undersöks möjligheterna att få till sådana lösningar på ett och samma chip. FOI ägnar sig än så länge endast åt bistatiska kombinationer, med separata fixturmonterade sensorer vars data fusioneras.

Ska man från svenskt perspektiv diskutera produktifiering av 3D-laserbaserade sensorer ligger grindad avbildning (GV) närmast till hands på grund av teknikens mogenhet. FOI har tillsammans med FMV och Saab Microwave Systems tagit fram ett försökssystem som visar funktionerna spaning, måldetektion och -följning. Systemet består av en GV-kamera och en långvågs-IR och kan operera på både korta (några km) och långa avstånd (flera km). Försökssystemet planeras att utvecklas vidare i ett FM-lätt demonstratorprojekt, förstudien startar 2009. FOI och Sverige har inte ekonomiska resurser att själva driva utvecklingen av hårdvara inom detta område. Dock är det rimligt att tänka sig ett nästa steg, i samarbete med rätt internationell partner, där GV-systemet som redan demonstrerats uppgraderas till ett 2,5D-system, och högre prestanda på alla fronter uppnås.

7.2 Kartering

Strävan vid kartering är i första hand yttäckning och noggrannhet i data. Att avbilda dynamik i scenen är underordnat. Detta förändrar prioriteringarna och skannande 3D-laserradar står sig väl i konkurrens med andra tekniker. Däremot kan man fortfarande höja systemprestandan om man kombinerar aktiv och passiv avbildning, eftersom en viktig del i karteringen är just klassificeringen, där passiv EO är fördelaktig. Med stöd av 3D-ladarmatriser, exempelvis 3D-Flash-tekniken, kan karteringen även snabbas upp, men det är en dyr uppgradering.

8 Referenser

- [1] T. Chevalier et al., "3D-avbildande laserradar i statiska miljöer. Slutrapport 2005-2007", FOI. Linköping, User Report, FOI-R--2364--SE, Dec 2007.
- [2] Webplats: *C3 Technologies*, "<http://www.c3technologies.com/>" 2008.
- [3] W. C. Stone et al., "Performance Analysis of Next-Generation LADAR for Manufacturing, Construction, and Mobility", National Institute of Standards and Technology. Gaithersburg, MD, USA, NISTIR 7117, May 2004.
- [4] O. Steinvall, "Laser systems and technology for surface mine detection and classification - A literature update and performance discussion." FOI. Linköping, Base report, FOI-R--2269--SE, 2007.
- [5] O. Steinvall et al., "Laser Based 3-D Imaging. New Capabilities for Optical Sensing", FOI, Sensor Technology, FOI-R--0856--SE, April 2003.
- [6] I. Baker et al., "Advanced infrared detectors for multimode active and passive imaging applications", Vol. 6940-83, presenterad vid *SPIE D&S*, Orlando, FL, USA, April, 2008.
- [7] J. Beck et al., "Gated IR Imaging with 128x128 HgCdTe Electron Avalanche Photodiode FPA", Vol. 6542, pp. 6542-17, presenterad vid *SPIE D&S*, Orlando, FL, USA, April, 2007.
- [8] F. Guellec et al., "Advanced pixel design for infrared 3D LADAR imaging", Vol. 6940, pp. 6940-84, presenterad vid *SPIE*, Orlando, FL, USA, April, 2008.
- [9] M. J. Halmos et al., "3-D flash lidar at raytheon", Vol. 4377, presenterad vid *SPIE D&S, Laser Radar Technology and Applications VI*, Orlando, FL, USA, April, 2001.
- [10] M. Jack et al., "MBE Based HgCdTe APDs and 3D LADAR Sensors", Vol. 6542, pp. 65421A, presenterad vid *SPIE D&S*, Orlando, FL, USA, April, 2007.
- [11] M. D. Jack och S. L. Bailey, "Ultra-high sensitivity APD-based 3D lidar sensors", Vol. 6940, paper 86, 2008., pp. 6940-86, presenterad vid *SPIE D&S*, Orlando, FL, USA, April, 2008.
- [12] G. M. Williams et al., "Single-photon-sensitive linear-mode APD lidar receiver developments", Vol. 6950, pp. 6950-25, presenterad vid *SPIE D&S*, Orlando, FL, USA, April, 2008.
- [13] R. Stettner et al., "Eye-safe laser radar 3-D imaging", Vol. 5412, presenterad vid *SPIE, Laser Radar and Applications IX*, Orlando, April, 2004.
- [14] R. M. Heinrichs et al., "Three-Dimensional Laser Radar with APD Arrays", Vol. 4377, presenterad vid *SPIE D&S Laser Radar Technology and Applications VI*, Orlando, FL, USA, 2001.
- [15] J. P. Donnelly et al., "1- μ m Geiger-Mode Detector Development", Vol. 5791, presenterad vid *SPIE D&S*, 2005.
- [16] M. Henriksson, "Detection probabilities for photon-counting avalanche photodiodes applied to a laser radar system", *Applied optics*, 44(24):5140-5147, 2005.
- [17] P. Gatt et al., "Dead-Time Effects on Geiger-Mode APD Performance", Vol. 6550, pp. 65500I, presenterad vid *Orlando D&S*, Orlando, FL, USA, April, 2007.
- [18] J. Degnan et al., "Inflight performance of a second generation, photon counting, 3D imaging lidar", Vol. 6950, pp. 6950-06, presenterad vid *SPIE D&S*, Orlando, FL, USA, April, 2008.
- [19] B. Aull et al., "Laser Radar Imager Based on Three-Dimensional Integration of Geiger-Mode Avalanche Photodiodes With Two SOI Timing-Circuit Layers", pp. 304, presenterad vid *Dig. Tech. IEEE Int. Solid-State Circuits Conf.*, 2006.
- [20] R. Sudharsanan et al., "Single Photon Counting Geiger Mode InGaAs(P)/InP Avalanche Photodiode Arrays For 3D Imaging", Vol. 6950, pp. 6950-22, presenterad vid *SPIE D&S*, Orlando, FL, USA, 2008.
- [21] A. B. Milstein et al., "Acquisition algorithm for direct-detection ladars with Geiger-mode avalanche photodiode", *Applied Optics*, 47(2), 2008.
- [22] C. Niclass et al., "A 128x128 Single-Photon Imager with on-Chip Column-Level 97ps 10bit Time-to-Digital-Converter Array", presenterad vid *Intl. Solid-State Circuits Conference (ISSCC)*, , Feb, 2008.
- [23] L. J. Sjöqvist et al., "Time of flight range profiling using time-correlated single photon counting", Vol. 6738, pp. 6738-23, presenterad vid *SPIE Europe Remote Sensing*, Florence, Italy, Sept, 2007.

- [24] O. K. Steinvall et al., "High resolution lidar using time-correlated single-photon counting", Vol. 6950, pp. 6950-01, presenterad vid *SPIE D&S*, Orlando, FL, USA, April, 2008.
- [25] R. Lange, "3D Time-of-Flight Distance Measurement with Custom Solid-State Image Sensors in CMOS/CCD-Technology", Dept. of Electrical Engineering and Computer Science at vol. Doctoral Dissertation. Siegen, Germany: University of Siegen, 2000.
- [26] B. Buxbaum och T. Gollewski, "Feasibility Study for the Next-Generation Laser Radar Range Imaging Based on CMOS PMD Technology", National Institute of Standards and Technology, NIST. Gaithersburg, MD 20899, Special Contract Report October 30 2002.
- [27] B. L. Stann et al., "Intensity-modulated diode laser radar using frequency modulation/continuous wave ranging techniques", *Optical Engineering*, 35(11):3270-3278, 1996.
- [28] C. J. Karlsson et al., "All-fiber multifunction continuous-wave coherent laser radar at 1.55 μ m for range, speed, vibration, and wind measurements", *Applied Optics*, 39(21):3716-3726, 2000.
- [29] Webplats: Canesta Inc.: *Canesta main page*, "<http://www.canesta.com/>". Kontrollerad: 20 Nov 2007.
- [30] Webplats: Mesa Imaging AG: *Mesa Imaging products*, "<http://www.mesa-imaging.ch/prodviews.php>". Kontrollerad: 20 Nov 2007.
- [31] Webplats: PMDTechnologies GmbH: *PMDTec main page*, "http://www.pmdtec.com/e_index.htm". Kontrollerad: 20 Nov 2007.
- [32] C. Smithpeter et al., "Miniature high-resolution laser radar operating at video rates", Vol. 4035, pp. 4035-33, presenterad vid *SPIE Aerosense Laser Radar Technologies and applications*, Orlando, FL, USA, 2000.
- [33] H. M. Tulldahl et al., "Experimental evaluation of underwater range-gated viewing in natural waters", Proc. SPIE ", Vol. 6395, pp. 639506 presenterad vid *SPIE D&S*, 2006.
- [34] O. K. Steinvall och K. R. Koppari, "Depth sounding lidar: an overview of Swedish activities and future prospects", Vol. 2964, pp. 2964-2, 1996.
- [35] H. M. Tulldahl och M. Pettersson, "Lidar for shallow underwater target detection" ", Vol. 6739, pp. 673906, presenterad vid *SPIE D&S*, April, 2007.
- [36] F. R. Dalgleish och F. M. Caimi, "Advanced Underwater Imaging Phase III Annual Report FY07", Annual Report 2007.
- [37] F. R. Dalgleish et al., "Extended range underwater optical imaging architecture", presenterad vid *IEEE Oceans 2006*, 2006.
- [38] J. J. Shirron och T. E. Giddings, "A model for the simulation of a pulsed laser line scan system", presenterad vid *IEEE Oceans 2006*, 2006.
- [39] L. Mullen et al., "Demodulation techniques for the amplitude modulated laser imager", *Applied Optics*, 46(30), 2007.
- [40] L. Klasén et al., "Gated Viewing in the Atmosphere – A Study of Performance Limits", presenterad vid *SPIE D&S, Laser Radar Technology and Applications VII*, Orlando, FL, USA, 2002.
- [41] P. Andersson, "Automatic Target Recognition From Laser Radar Data – Applications to Gated Viewing and Airborne 3D Laser Radar", Swedish Defence Research Agency, FOI. Linköping, Scientific Report, FOI-R--0829--SE, 2003.
- [42] O. Steinvall et al., "Overview of range gated imaging at FOI", Vol. 6542, pp. 6542-16, presenterad vid *SPIE Defense and Security 2007, Infrared Technology and Applications XXXIII*, Orlando, FL, USA, April 9-13, 2007.
- [43] O. K. Steinvall et al., "Image quality for range gated systems during different ranges atmospheric conditions", Vol. 6396, pp. 6396-7, presenterad vid *SPIE Europe Remote Sensing*, Stockholm, Sept, 2006.
- [44] O. Steinvall et al., "Grindad Avbildning - fördjupad studie", FOI, Sensor Technology. Linköping, Scientific Report, FOI-R--0991--SE, Nov 2003.
- [45] P. Andersson, "Long range 3D imaging using range gated laser radar images." *Optical Engineering*, 45(3), 2006.
- [46] Z. Xiuda et al., "Pulse-shape-free method for long-range threedimensional active imaging with high linear accuracy", *Optics Letters*, 33(11), 2008.
- [47] Webplats: Intevac Inc. - *LIVAR4000*, "<http://www.intevac.com/imaging/products/livar4000>". Kontrollerad: 21 Apr 2008.
- [48] Webplats: *Stanford Computer Optics*, "<http://www.stanfordcomputeroptics.com/>". Kontrollerad: 8 Sept 2008.

- [49] J. Busck, "Optical identification of sea-mines using Gated viewing three-dimensional laser radar", DTU, vol. Ph.D. Thesis. Ørsted: Technical University of Denmark, 2005.
- [50] W. P. Elkins et al., "A 3D Lidar Sensor for Volumetric Imaging in Highly Backscattering Media", Vol. 5791, presenterad vid *SPIE D&S*, 2005.
- [51] Webplats: *Fianium*, "http://www.fianium.com/company_news.htm".2008.
- [52] Webplats: *Coded Aperture Imaging*, "<http://www.paulcarlisle.net/old/codedaperture.html>".2008.
- [53] Webplats: *Coded aperture camera imaging concept*, "http://astrophysics.gsfc.nasa.gov/cai/coded_intr.html".2008.
- [54] C. Slinger et al., "Coded aperture systems as nonconventional, lensless imagers for the visible and infrared", Vol. 6737, pp. 67370D, presenterad vid *SPIE D&S*, Orlando, FL, USA, 2007.
- [55] Webplats: *CLR-conference program*, "<http://space.hsv.usra.edu/CLRC/presentations.html>". Snowmass, CO, USA, Kontrollerad: Sept 9 2008.
- [56] Webplats: *The Nobel Prize in Physics 2005, The Royal Swedish Academy of Sciences*, "http://www.kva.se/KVA_Root/swe/awards/nobel/nobelprizes/press/phyread05.asp". Stockholm, Sweden, Kontrollerad: Nov 15 2007.
- [57] A. Eriksson et al., "Ultrakorta laserpulser i verkanslaser och sensortillämpningar", FOI. Linköping, FOI-R--2071--SE, Dec 2006.
- [58] M. Wilcox, "Scalable analog wavefront sensor with subpixel resolution", Vol. 6272, pp. 62723G, presenterad vid *SPIE D&S*, 2006.
- [59] J. J. Zayhowski och A. L. Wilson Jr, "Miniature eye-safe laser system for high-resolution three-dimensional lidar", *Applied Optics*, 46(23), 2007.
- [60] E. Hällstig, "Nematic Liquid Crystal Spatial Light Modulators for Laser Beam Steering", vol. Ph.D Thesis. Uppsala: Acta Universitatis Upsaliensis, 2004.
- [61] L. Sjöqvist och O. Steinvall, "Laser Beam Steering System study", FOI. Linköping, FOI-R—1235—SE, 2004.
- [62] H. D. Tholl, "Novel Laser Beam Steering Techniques", Vol. 6397, pp. 639708, presenterad vid *SPIE D&S*, 2006.
- [63] P. Macmanamon och W. Thompson, "New Technologies and Architectures for Laser Systems-Revolutionary Beam Control", Vol. 5413, presenterad vid *SPIE D&S*, 2004.
- [64] R. M. Corless et al., "On the Lambert W function", *Adv. Comput. Math*, 5(329–359), 1996.
- [65] A. Akbarzadeh et al., "Towards Urban 3D Reconstruction From Video", pp. 1-8, presenterad vid *Third International Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission*, Chapel Hill, NC, USA, June, 2006.
- [66] M. D. DeVore och X. Zhou, "Minimum probability of error recognition of three-dimensional laser-scanned targets", Vol. 6234, pp. 623407-1 – 623407-11, presenterad vid *SPIE D&S*, Orlando, FL, USA, 2006.
- [67] R. L. Felip et al., "Target Detection in LADAR Data Using Robust Statistics", Vol. 5988, pp. 167-170, presenterad vid *SPIE D&S*, Orlando, FL, USA, April, 2005.
- [68] D. Anguelov et al., "Discriminative learning of Markov random fields for segmentation of 3D scan data", Vol. 2, pp. 169-176, presenterad vid *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, San Diego, CA, USA, June, 2005.
- [69] A. N. Vasile och R. M. Marino, "Pose-Independent Automatic Target Detection and Recognition using 3-D Ladar Data", Vol. 5426, pp. 67-83, presenterad vid *SPIE D&S*, Orlando, FL, USA, 2004.
- [70] J. Neulist och W. Armbruster, "Segmentation, classification and pose estimation of military vehicles in low resolution laser radar images", Vol. 5791, pp. 218-225, presenterad vid *SPIE D&S*, Orlando, FL, USA, April, 2005.
- [71] G. Kuntimad och W. Delashmit, "Target detection in LADAR range images using shadow analysis", Vol. 6214, pp. 621405, presenterad vid *SPIE D&S*, 2006.
- [72] D. Letalick et al., "Terrain segmentation using laser radar range data", *Applied Optics*, 31(15):2883-1890, 1992.
- [73] H. C. Palm et al., "Detection of military objects in LADAR-images", Forsvarets forskningsinstitut. Kjeller, Norway, Technical Report, FFI/RAPPORT-2007/02472, 2007.
- [74] J. G. Verly och R. L. Delanoy, "Model-based automatic target recognition (ATR) system for forwardlooking groundbased and airborne imaging laser radars (LADAR)", *IEEE*, 84(2):126-163, 1996.

- [75] D. W. Webster et al., "Target acquisition in three-dimensional data", Vol. 5094, pp. 50-58, presenterad vid *SPIE Aerosense*, Orlando, FL, USA, 2003.
- [76] M. R. Wellfare och K. Norris-Zachery, "Characterization of articulated vehicles using ladar seekers", Vol. 3065, pp. 244-254, presenterad vid *SPIE Aerosense*, Orlando, FL, USA, 1997.
- [77] A. E. Johnson, "Spin-Images: A Representation for 3-D Surface Matching", PhD Thesis, Robotics Institute. Pittsburgh, Pennsylvania: Carnegie Mellon University, 1998. (robotics.jpl.nasa.gov/people/johnson/thesis/thesis.html)
- [78] G. Sithole och G. Vosselman, "Comparison of filtering algorithms", presenterad vid Workshop on 3D Reconstruction from Airborne Laserscanner and InSAR Data, ISPRS, Dresden, Germany, 2003.
- [79] J. Ahlberg et al., "Ground Target Recognition in a Query-Based Multi-Sensor Information System", To be submitted 2006.
- [80] C. English et al., "Development of a practical 3D automatic target recognition and pose estimation algorithm", Vol. 5426, pp. 112-123, presenterad vid *SPIE D&S*, Orlando, FL, USA, April, 2004.
- [81] J. G. Verly et al., "Model-based system for automatic target recognition from forward-looking laser-radar imagery. " *Optical Engineering*, 31(12):2540-2552, 1992.
- [82] Q. Zheng et al., "Model-based Target Recognition in Pulsed Ladar Imagery", *IEEE Trans. Image Processing*, 10(4):565-572, 2001.
- [83] D. Huber et al., "Parts-based 3D object classification", Vol. II, pp. II-82 - II-89, presenterad vid *CVPR 2004*, Washington, DC, USA, June, 2004.
- [84] C. K. Toth et al., "Vehicle recognition from lidar data", pp. 162-166, presenterad vid *ISPRS working group III/3 workshop*, Dresden, Germany, October, 2003.
- [85] T. Yano et al., "Vehicle identification technique using active laser radar system", pp. 275-280, presenterad vid *MFI*, 2003.
- [86] A. E. Johnson och M. Hebert, "Using spin images for efficient object recognition in cluttered 3d scenes. " *IEEE Transactions on Pattern Analysis Machine Intelligence, PAMI*, 21(5):433-449, 1999.
- [87] B. A. Hutchinson et al., "Simulation based analysis of range and cross-range resolution requirements for the identification of vehicles in ladar imagery", *Opt. Eng.*, 42(9):2734-2745, 2003.
- [88] J. De Geeter et al., "A smoothly constrained kalman filter. " *IEEE PAMI*, 19(10):1171-1177, 1997.
- [89] C. Carlsson (later Grönwall) och M. Millnert, "Vehicle size and orientation estimation using geometric fitting", Vol. 4379, pp. 412-423, presenterad vid *SPIE*, Orlando, FL, USA, April, 2001.
- [90] S. Vinson och L. D. Cohen, "Multiple rectangle model for buildings segmentation and 3d scene reconstruction", pp. 623-626, presenterad vid *CVPR*, 2002.
- [91] D. Q. Zhu och C.-C. Chu, "Characterization of irregularly shaped bodies", Vol. 2466, pp. 17-22, presenterad vid *SPIE*, 1995.
- [92] M. Vaidyanathan et al., "Jigsaw Phase III: A Minutuarized Airborne 3-D Imaging Laser Radar with Photon-Counting Sensitivity for Foliage Penetration", Vol. 6550, pp. 65500N, presenterad vid *SPIE Defense & Security Symposium, Laser Radar Technology and Applications XII*, Orlando, FL, USA, April, 2007.
- [93] Webplats: *LiteCycles*, "<http://www.litecycles.com/roar.htm>". 2008.
- [94] S. E. Moran et al., "Rapid overt airborne reconnaissance (ROAR™) for mines and obstacles in very shallow water, surf zone and beach", Vol. 5089, presenterad vid *SPIE D&S*, Orlando, FL, USA, 2003.
- [95] Webplats: Defence Industry Daily: *\$7.8M for Predator LADAR R&D Morphs Into RAIDER Turret (updated)*, "<http://www.defenseindustrydaily.com/78m-for-predator-ladar-rd-morphs-into-raider-turret-updated-02293/>". 2008.
- [96] Webplats: Sigma Space Corporation: *Sigma main page*, "<http://www.sigmaspace.com/sigma/>". Kontrollerad: 22 Nov 2007.
- [97] X. Michalet et al., "Detectors for single-molecule fluorescence imaging and spectroscopy", *Journal of Modern Optics*, 54(2-3):239-281, 2007.

- [98] A. Bushboom och V. Sequeira, "Container Integrity Verification using Laser Triangulation", Vol. 6550, pp. 65500T, presenterad vid *SPIE Defence & Security Symposium*, Orlando, FL, USA, April, 2007.
- [99] Y. Wang et al., "Multi-Static Networked 3D Ladar for Surveillance and Access Control", Vol. 6550, pp. 65500U, presenterad vid *SPIE D&S*, Orlando, FL, USA, April, 2007.
- [100] R. C. Harney, "Information-based approach to performance estimation and requirements allocation in multisensor fusion for target recognition", *Optical Engineering*, 36(3):789-798, 1997.
- [101] I. Clark, "Exploitation of EO Technologies from the EMRS DTC", Vol. 6739, pp. 6739-24, presenterad vid *SPIE Europe Remote Sensing*, Florence, Italy, September 17 - 20, 2007.
- [102] Webplats: Advanced Scientific Concepts: *Portable 3D Camera* "<http://www.advancedscientificconcepts.com/camera1.html>". Kontrollerad: Nov 16 2007.
- [103] J. C. van den Heuvel et al., "Identification of Littoral Targets with a Laser Range Profiler", Vol. 6550, pp. 65500R, presenterad vid *SPIE D&S*, Orlando, FL, USA, April, 2007.
- [104] J. C. van den Heuvel et al., "Experimental validation of ship identification with a laser range profiler", Vol. 6950, pp. 69500V, presenterad vid *SPIE D&S, Laser Radar Technology and Applications XIII*, Orlando, FL, USA, April, 2008.
- [105] J. C. van den Heuvel et al., "Detection of Small Sea-Surface Targets with a Search Lidar", Vol. 6550, pp. 65500V, presenterad vid *SPIE D&S*, Orlando, FL, USA, April, 2007.
- [106] J. C. van den Heuvel et al., "Search-lidar demonstrator for detection of small sea-surface targets", Vol. 6950, pp. 69500W, presenterad vid *SPIE D&S, Laser Radar Technology and Applications XIII*, Orlando, FL, USA, April, 2008.
- [107] Webplats: Defence Update: *Helicopter Laser Radar - HELLAS*, "<http://www.defense-update.com/products/h/hellas.htm>". 2008.
- [108] Webplats: EDA Geek: *Ibeo Laser Sensors Power DARPA Urban Challenge Winners*, "<http://edageek.com/2007/11/05/ibeo-darpa/>". Kontrollerad: Nov 15 2007.
- [109] Webplats: SICK AG: *S300 Safety Laser Scanner*, "<http://www.sick.com/gus/products/new/s300/en.html.html>". 2008.
- [110] W. S. Wijesoma et al., "Road-Boundary Detection and Tracking Using Ladar Sensing", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 20(3), 2004.
- [111] B. Sofman et al., "Improving Robot Navigation through Self-Supervised Online Learning", *Journal of Field Robotics* 23(11/12):1059-1075, 2006.
- [112] N. Vandapel et al., "Unmanned Ground Vehicle Navigation Using Aerial Ladar Data", *The International Journal of Robotics Research*, 25(1):31-51, 2006.
- [113] L. E. Navarro-Serment et al., "LADAR-based Pedestrian Detection and Tracking", presenterad vid *1st. Workshop on Human Detection from Mobile Robot Platforms, IEEE ICRA 2008*, May, 2008.
- [114] M. Uijt de Haag et al., "Use of 3D laser radar for navigation of unmanned aerial and ground vehicles in urban and indoor environments", Vol. 6550, pp. 65500C, presenterad vid *SPIE D&S*, Orlando, FL, USA, April, 2007.
- [115] D. Venable och M. Uijt de Haag, "Near real-time extraction of planar features from 3D flash-ladar video frames", Vol. 6977, pp. 69770N, presenterad vid *SPIE D&S*, Orlando, FL, USA, 2008.
- [116] A. K. Vadlamani och M. Uijt de Haag, "Aerial Vehicle Navigation over Unknown Terrain Environments using Inertial Measurements and Dual Airborne Laser Scanners or Flash LADAR", Vol. 6550, pp. 65500B, presenterad vid *SPIE D&S*, Orlando, FL, USA, April, 2007.
- [117] A. E. Fox och U. Österberg, "Observation of non-exponential absorption of ultra-fast pulses in water", *Optics Express*, vol. 14(8), p. , 14(8):3688-3693, 2006.
- [118] Personlig kommunikation med G. Fournier, 2008.
- [119] F. Isaksson et al., "3D rapid mapping", presenterad vid *SPIE D&S*, Orlando, FL, USA, 2008.
- [120] Webplats: RSS Remote Sensing Solutions GmbH: *Reality Maps*, "http://www.realitymaps.de/e_index.html". Kontrollerad: 8 Sept 2008.
- [121] Webplats: Visimind AB: *Visimind Main Page*, "<http://www.visimind.se/>". Kontrollerad: 8 Sept 2008.
- [122] Webplats: Streetmapper: *Mobile Mapping Using LiDAR Technology*, "<http://www.streetmapper.net/>". Kontrollerad: 8 Sept 2008.