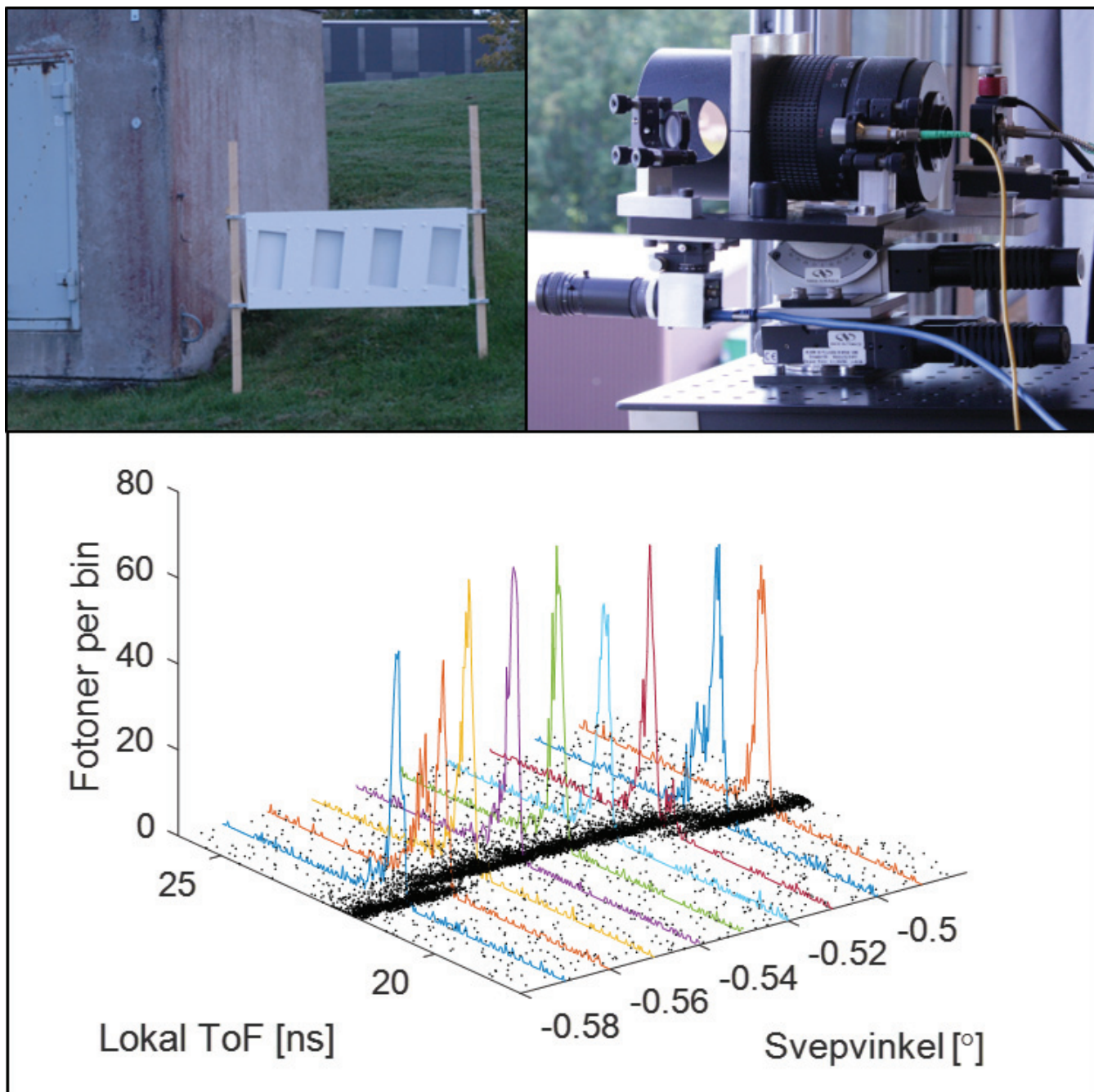


MARKUS HENRIKSSON, MICHAEL TULLDAHL, HÅKAN LARSSON



Markus Henriksson, Michael Tulldahl, Håkan
Larsson

Hård- och mjukvarusimulering av fotonräknande 3D-lidar

(AF.9220412 Sensorer och signaturanpassning 15)

Titel	Hård- och mjukvarusimulering av fotonräknande 3D-lidar
Title	Hardware and software simulation of photon counting 3D lidar
Rapportnr/Report no	FOI-R--4158--SE
Månad/Month	December
Utgivningsår/Year	2015
Antal sidor/Pages	33 p
ISSN	1650-1942
Kund/Customer	Försvarsmakten
Forskningsområde	7. Sensorer och signaturanpassning
FoT-område	Sensorer och signaturanpassning
Projektnr/Project no	E54563
Godkänd av/Approved by	Martin Rantzer
Ansvarig avdelning	Sensor- och TK-system

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk, vilket bl.a. innebär att citering är tillåten i enlighet med vad som anges i 22 § i nämnd lag. För att använda verket på ett sätt som inte medges direkt av svensk lag krävs särskild överenskommelse.

This work is protected by the Swedish Act on Copyright in Literary and Artistic Works (1960:729). Citation is permitted in accordance with article 22 in said act. Any form of use that goes beyond what is permitted by Swedish copyright law, requires the written permission of FOI.

Sammanfattning

I svåra miljöer med mycket klotter och dålig kontrast är upptäckt och identifiering av mål svårt i 2D-bilder. Möjligheterna till automatisk upptäckt av mål ökar betydligt om 3D-information mäts, genom att plana ytor kan detekteras och storleken på objekt mätas. Förmågan att separera objekt på olika avstånd kan även ge möjlighet till tydligare presentation för en operatör.

3D-mätning med stereobilder fungerar bra i öppna eller urbana miljöer, men är mycket begränsade avseende att se bakom skyl som vegetation och kamouflagenät. Lasersystem baserade på att mäta tiden det tar för en laserpuls att studsas mot målet och komma tillbaka till detektorn (ToF, "Time-of-Flight") kan däremot detektera en yta under lövverk eller kamouflage om bara en liten del av laserpulsen letar sig igenom en lucka i förtäckningen. Laserbaserade system ger också bättre prestanda i mörker, i skuggade områden och för att se in genom fönsterrutor. För mätavstånd över några hundratal meter bedöms en teknik baserad på fotonräknande Geigermod-fotolavindioder (GmAPD, "Geiger mode Avalanche Photo Diode") vara bäst lämpad. Denna detektortyp ger den högsta avståndsupplösningen, vilket är viktigt för att kunna separera olika ytor inom synfältet för en pixel. En annan viktig fördel är att känsligheten är extremt hög genom att detektorn reagerar på en enda foton. Detta gör att lägre lasereffekt behövs för att nå samma räckvidd, något som är extra viktigt på flygande plattformar där vikt och storlek är starkt begränsade.

En fotonräknande matrisdetektor har simulerats genom att använda ett skannande sensorsystem baserad på fotonräkning med GmAPD. Mätningar mot ett karakteriseringsmål visar på exceptionell prestanda avseende avståndsnoggrannhet och avståndsupplösning. Mätningar mot en skogsdunge med utplacerade mål i form av kartonger och en person visar på god penetrationen genom skyl och potentialen för utveckling av metoder för automatisk måldetektion.

Mjukvarusimuleringar av fotonräknande 3D-lidarmätningar mot en CAD-modell av karakteriseringsmålet ger resultat som stämmer väl med mätningarna. Mjukvarusimuleringarna ger möjlighet att variera systemparametrar för att bättre kunna kravsätta ett framtida matrisdetektorsystem. Tankar om vidareutveckling för att simulera ett UAV-baserat system redovisas.

Simuleringen av ett fotonräknande 3D-lidarsystem visar den mycket höga prestanda som kan uppnås med tekniken. Hårdvarusimuleringen med ett skannande enpixelsystem har samlat in realistiska data för utprovning av signalbehandling. Mjukvarusimuleringen ger data som stämmer väl med mätningarna och kan användas för att studera påverkan av olika systemparametrar.

Nyckelord: Fotonräkning, hårdvarusimulering, mjukvarusimulering

Summary

In conditions with large amounts of clutter and low contrast target detection and identification is difficult using 2D images. The possibilities for automatic target detection increase drastically if 3D information is measured, through detection of planar surfaces and measurement of object dimensions. The ability to separate objects at different distances can also facilitate augmented presentation for operators.

3D measurement using stereo images perform well in open and urban areas, but has very limited capability to see behind obscurations as vegetation and camouflage netting. Laser systems based on time of flight (ToF) measurement for laser pulses from the laser to reflection at the target and back to the detector again are however able to detect a surface beneath foliage if only a small portion of the laser pulse penetrates the obscuration. Laser based systems also give better performance in darkness, in shadowed areas and for looking through windows. For distances longer than a few hundred meters a technology based on photon counting Geiger mode Avalanche Photo Diodes (GmAPD) is considered most suitable. This type of detector allows the highest range resolution, which is important to separate surfaces at different distances within the field of view for one pixel. Another important advantage is the extremely high sensitivity where the detector reacts to single photons. This allows lower laser pulse energy for the same maximum measurement range, extra important on flying platforms where weight and size are severely limited.

An array detector 3D-lidar system has been simulated by scanning a photon counting sensor system based on a single pixel GmAPD. Measurements on a characterization target show exceptional range accuracy and range resolution. Measurements against a copse with carton and human targets show good penetration through obscurations and high potential for development of automatic target detection.

Software simulations of photon counting 3D-lidar against a CAD-model of the characterization target give good correspondence with measurements. The software simulations allow parameter variations that can be used for better specifications of parameters for future array detector systems. Thoughts on how to develop the model to allow simulation of an UAV-mounted system are reported.

The photon counting 3D lidar simulation shows the high performance possible with this technology. Hardware simulation with a single pixel scanning system has collected realistic data for testing of signal processing algorithms. Software simulations give data with good correspondence to the measurements and can be used to study the effects of variations in system parameters.

Keywords: Photon counting, hardware simulations, software simulations

Innehållsförteckning

1	Inledning	7
2	Beskrivning av funktion hos ett fotonräknande 3D-lidarsystem	8
2.1	Nyttan för försvaret och militära tillämpningar	9
3	Beskrivning hårdvarusystem	10
4	Resultat av hårdvarusimulering	12
5	Beskrivning av mjukvarumodell	19
6	Resultat av mjukvarusimulering	24
7	Diskussion	31
8	Referenser	33

1 Inledning

För klassificering och identifiering av fordon och andra strukturer med tydliga former ger 3D-information oftast den bästa signaturen. Även för upptäckt av mål kan 3D-information tillföra mycket kapacitet, särskilt i svåra miljöer med mycket klotter och låg kontrast i 2D-bilder. I öppen terräng dagtid finns flera metoder för att samla in 3D-information, där stereobilder troligen ofta ger bäst prestanda per kostnad. Stereobilder är dock mycket begränsade avseende att se under träd. Här är istället lasersystem, baserade på att mäta tiden det tar för en laserpuls att studsas mot målet och komma tillbaka till detektorn (ToF, "Time-of-Flight"), överlägsna eftersom de kan detektera en yta under lövverk eller kamouflage om bara en lite del av laserpulsens letar sig igenom en lucka i förtäckningen. Laserbaserade system ger också bättre prestanda i mörker, i skuggade områden och för att se in genom fönsterrutor.

Olika koncept för laserbaserade 3D-sensorer diskuterades i en tidigare rapport [1], främst med tanke på placering på olika storlekar av UAVer. För mätavstånd över några hundratal meter bedöms en teknik baserad på fotonräknande Geigermod-fotolavindioder (GmAPD, "Geiger mode Avalanche Photo Diode") vara bäst lämpad. Denna detektortyp ger den högsta avståndsupplösningen, vilket är viktigt för att kunna separera olika ytor inom synfältet för en pixel. En annan viktig fördel är att känsligheten är extremt hög genom att detektorn reagerar på en enda foton. Detta gör att lägre lasereffekt behövs för att nå samma räckvidd, något som är extra viktigt på flygande plattformar där vikt och storlek är starkt begränsat.

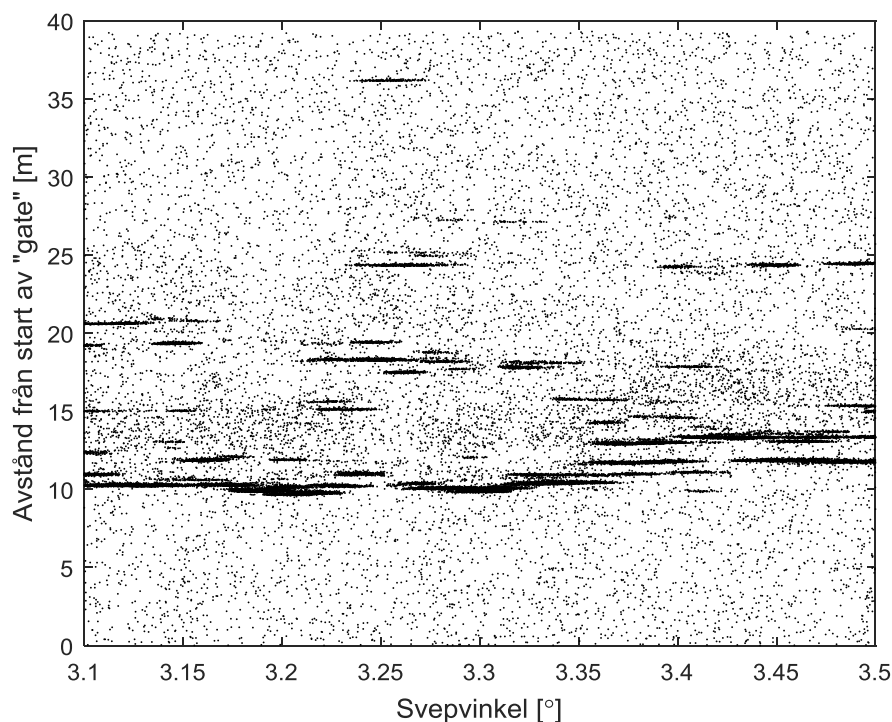
Långräckviddiga 3D-avbildande lidarsystem med fotonräknande teknik är idag endast operativa i USA, med system som ALIRT, HALOE och MACHETE. Dessa har till exempel använts för kartering i Afghanistan. Detektorer säljs kommersiellt av två företag i USA, Princeton Lightwave och Boeing Spectrolab, men utveckling pågår även i Europa [2,3]. Systeminriktade försök görs bland annat av Selex ES och ISL[4,5,6].

FOI har ännu inte kunnat bygga upp något försökssystem med en fotonräknande matrisdetektor, till stor del på grund av kostnaden för detektorn. För att kunna värdera tekniken och påbörja studier av nödvändig signalbehandling, som behöver vara ganska annorlunda jämfört med klassiska 3D-lidarsystem, har därför två metoder för att simulera ett system tagits fram. Den ena bygger på att anpassa simuleringsmodellen FOI Ladarsim [7][8] till fotonräknande teknik. Den andra använder ett fotonräknande lidarsystem med enpixeldetektor, framtaget för telekriksverksamhet [9], som skannas för att simulera en matrisdetektor.

Arbetet är genomfört i projektet 3D-avbildande lasersensorsystem inom FoT samlingsbeställning (AF.9220412 Sensorer och signaturanpassning 15).

2 Beskrivning av funktion hos ett fotonräknande 3D-lidarsystem

Ett fotonräknande system mäter tiden från att en laserpuls har sänts ut till den första händelse som triggar detektorn. Detta kan vara en enda foton som reflekterats mot målet, men kan också vara en bakgrundsfoton från till exempel solen eller termiskt brus i detektorn. När detektorn har triggats så är den inaktiv tills nästa laserpuls har skickats iväg. Resultatet blir alltså ett avstånd eller att ingen foton detekterades. Från en enda mätning finns det ingen möjlighet att skilja på en laserfoton som reflekterats av målet och något annat som triggar detektorn. För att skilja på brus och riktiga mål görs därför många mätningar mot samma position, och antalet fotoner som detekteras på olika avstånd räknas. För riktiga mål kommer då flera mätningar som ger samma resultat ansamlas, medan bruset är jämnt utspritt i tiden. För att minska risken att detektera brus så använder man en avståndsgrind som gör att detektorn aktiveras först på ett avstånd där man förväntar sig att målet finns. Trots detta kan en hög andel av detektionerna vara brus. Detta illustreras i Figur 1, som visar ofiltrerad data från ett fotonräknande lidarsystem med en pixel som svepts över en skog under kontinuerlig mätning. Figuren visar endast ett plan och identifiering av objekten är därför inte möjligt, utan dessa framträder först när mätningar på olika höjd läggs samman.



Figur 1. En del av en kontinuerligt svept mätning med enpixelsystemet som används för att simulera en fotonräknande matrisdetektor. Varje prick i bilden motsvarar en detektion. De sanna ytorna (trädstammar, grenar och löv) syns tydligt i form av ansamlingar av detektioner av fotoner, men utspritt finns glesa detektioner från bakgrundsljus och detektorbrus.

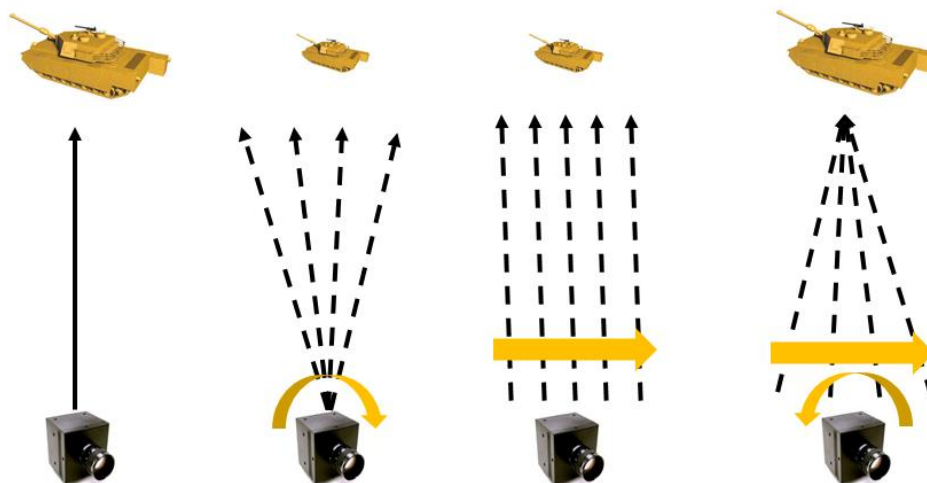
Vid en statisk mätning, som till exempel där sensorn finns på ett stillastående fordon, så kan enkelt ett histogram bildas för avstånden i mätningarna i en pixel. Detta liknar då signalen från en avståndsmätare och reflekterande ytor hittas enkelt genom filtrering och tröskling. När sensorn rör sig måste mätningar med olika pixlar och från olika positioner läggas ihop, vilket gör filtrering och tröskling mer besvärligt. Att ta fram data för att prova ut metoder för detta är ett viktigt syfte med simuleringarna.

Signal-brusförhållandet (SNR) sätts till största delen av hur många mätningar som görs mot en position. Ju fler mätningar ju tydligare framträder de äkta ytorna. Efter att denna filtrering gjorts för att skilja riktiga ytor från brus återstår ett högupplöst punktmoln. Hur objekt detekteras och mål klassificeras i punktmoln har diskuterats tidigare [10], även om mycket mer arbete återstår innan operativt användbara algoritmer finns.

Fotonkänsligheten ger förutom högre känslighet och avståndsupplösning en viktig skillnad mot klassisk lidar. I och med att bara den första fotonen som absorberas i detektorn kan detekteras så blir det inte alltid bättre av att öka pulsenergin. Istället är risken att för delvis skymda mål så kommer detektorn alltid triggas av fotoner reflekterade från skylet, och målet därbakom kommer aldrig att upptäckas. Därför behöver lasereffekten regleras beroende på mätavstånd och mål så att optimal detektionsfrekvens uppnås. Optimalt ligger oftast att 50-70 % av utskickade laserpulser ger någon detektion i varje pixel, eller ekvivalent att 50-70 % av pixlarna triggas för varje laserpuls.

2.1 Nyttan för försvaret och militära tillämpningar

Vi ser i princip fyra generaliserade användningsområden för en fotonräknande 3D-lidar: Identifiering från fast position, spaning från fast position, spaning från rörlig plattform och identifiering från rörlig plattform.



Figur 2. En illustration av fyra tänkbara mätmoder för ett fotonräknande 3D-lidarsystem. Från vänster: Identifiering från fast position, spaning från fast position, spaning från rörlig plattform och identifiering från rörlig plattform.

En fast position är främst aktuellt i mark-till-mark-tillämpningar. Här kan det handla om att söka av ett skogsbryn innan man åker ut på ett öppet område. Den stirrande identifieringsmoden bygger på invisning från en annan sensor, till exempel en IR-kamera, medan spaningsmoden är mer självständig. Spaningsmoden kan till exempel också användas för att återkommande söka av omgivningen runt en camp. Genom att i signalbehandlingen sortera fram förändringar är det möjligt att upptäcka även mycket välkamouflerade observatörer eller utplacerade föremål.

Rörliga plattformar kan vara alla typer av fordon, men fördelarna med fotonräknande system avseende vikt och volym är antagligen extra viktiga på flygande plattformar. På sikt är förhoppningen att system kan utvecklas som kan monteras i plattformar av storlek motsvarande UAV Örnen och större. Detta kan då användas för spaning eller kartering inför en insats för att skapa en lägesbild av terräng och installationer. Kontinuerlig följning av mål under en insats kan också vara tänkbart. Datainsamlingshastigheter i storleksordningen en hektar per sekund är inte orimliga för spaning och kartering.

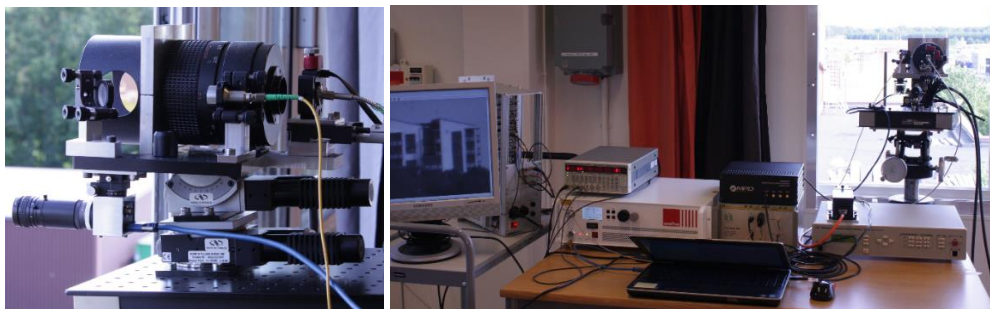
3 Beskrivning hårdvarusystem

Försökssystemet är framtaget för klassificering av retroreflexer genom mätning av avstånd och lasermålarea för olika ytor i sikten och andra objekt som ger reflexer och finns tidigare beskrivet bland annat i [9]. Efter den beskrivningen har en modifiering gjorts med en ny längre våglängd vid 1,55 μm , vilket innebär att detektor, laser och en del av optiken bytts ut. Fördelen med den längre våglängden är att eftersom strålningen inte når in till näthinnan så kan mycket högre lasereffekt användas utan risk för ögonskador. Detta gör att mätningar kan göras även mot diffust reflekterande mål på avstånd upp till några kilometer. Eftersom detektorn måste göras i InGaAs istället för kisel så är detektorprestanda, åtminstone än så länge, sämre. Ett matrisdetektorbaserat 3D-lidarsystem bör även det av ögonsäkerhetsskäl använda 1,55 μm , och därför passar modifieringen bra. Detektorprestanda med en singelpixeldetektor vid 1,55 μm är fortfarande något bättre än för matrisdetektorerna, och lasern som används har också kortare pulslängd än den lasertyp som är tänkbar för ett operativt 3D-lidarsystem. Försökssystemet har därför något (faktor 2) bättre avståndsupplösning än ett idag tänkbart matrisdetektorsystem.

Andra skillnader är tidssampling och maximal avståndsgrind. Vid insamling av data tidsstämplas varje mottagen foton med en viss noggrannhet, som talar om vad ett steg i avståndsskalan är. För att tidssamplingen inte ska försämra mätsystemets upplösning har tidsluckor för registrering av mottagna detektioner om 64 ps använts. I dagens matrisdetektorer så är de kortaste tidsluckor som kan användas 250 ps. I mätsystemet är dynamiken i avståndsskalan begränsad till 4096 steg, och därmed kan vi bara mäta ett djup på scenen om 39,3 m. Dagens matrisdetektorer klarar upp till 8192 tidssteg, och därmed ett mätdjup på strax över 300 m.

Eftersom laserns pulsenergi är kraftigt begränsad i mätsystemet används en relativt hög pulsrepetitionsfrekvens för att få tillräcklig signal. Fotoner detekteras dock inte för varje laserpuls, och detektionsfrekvens har en absolut övre gräns på 100 kHz eftersom detektorn har en återställningstid på 10 μs efter varje detektion. Detta stämmer väl med matrisdetektorer där bildtakter upp till 200 kHz förekommer. En nackdel med hög repetitionsfrekvens är att vi inte kan se skillnad på vilken laserpuls de detekterade fotonerna kommer ifrån. Därför mäts avståndet alltid som om det kom från den senast utsända pulsen så att man inte kan skilja på ytor som ligger $D = c/2F$ isär, där c är ljushastigheten och F repetitionsfrekvensen på lasern. I matrisdetektorerna är max repetitionsfrekvens under 200 kHz och entydighetsavståndet längre än 750 m. I mätsystemet kan frekvenser upp till 10 MHz, och därmed entydighetsavstånd 15 m, användas. Vid mätning mot en skogsdunge med större djup har vi sänkt till 1 MHz för att få 150 m entydighetsavstånd, men fortfarande haft kvar 64 ps avståndsluckor och därmed 39,3 m avståndsgrind. Fotoner som har reflekterats från avstånd utanför avståndsgrinden har kastats bort vid lagringen av data.

Trots de beskrivna skillnaderna bedöms mätsystemet ge data som ganska väl motsvarar vad som kommer fås med ett framtida matrisdetektorbaserat fotonräknande 3D-lidarsystem. Dock tar mätningen med dagens mätsystem mycket längre tid. Mottaget antal fotoner per sekund med mätsystemet är realistiskt för en enstaka pixel i en matrisdetektor. Mätningar i rapporten är gjorda med totala mättider om 10-30 minuter, och med 32×128 pixlar skulle detta då minska en faktor 4096 till långt under en sekund.



Figur 3 Fotografier på systemet. Bilden till vänster visar vridbordet med teleskop, laserkollimator och scenkamera. Till höger visas hela systemet under mätning.

Skanningen kan göras i två moder, antingen pixel för pixel där systemet flyttas i ett mönster om 32×32 punkter och data samlas in stillastående i varje punkt, eller med kontinuerliga svep där systemet roteras under mätning så att synfältet rör sig längs en linje. Den första metoden används för att simulera en statisk sensor med en matrisdetektor med storleken 32×32 punkter som stirrar mot en punkt. Den andra metoden försöker simulera ett lidarsystem som från en fix position sveps över en scen i en spaningsmod. Mätningen med svep av vinkeln har även viss relevans för stirrande mätning i fix vinkel från ett system som sitter i en flygande plattform, som i spanings- eller karteringstillämpningar. Den största skillnaden är att de välkontrollerade svepen motsvarar en perfekt stabiliserad plattform, vilket inte är realistiskt om en UAV är den tänkta plattformen. För att simulera en matrisdetektor görs flera svep i olika vertikala vinklar motsvarande raderna i matrisen. Pixlarna i varje rad antas kunna överlagras och då motsvara en pixel med högre mättakt och/eller längre mättid på det sätt som mätningen genomförs.

För varje detekterad foton sparas tidpunkten när den kom och tiden från den senast utskickade laserpuls. Samtidigt loggas även vinklarna på det vridbord som riktar in systemet. På det här sättet kan vi i efterhand variera integrationstiden vid stirrande mätning respektive antalet mätningar per vinkelintervall när vi sveper. Tidpunkten för mätningen används även för att räkna ut hur systemet var riktat vid varje mätning vid mätning med kontinuerliga svep.

Merparten av mätningarna är gjorda ut genom ett fönster mot mål på FOIs bakgård med mätavstånd på ca 150 m och mot en skogsdunge bakom FOI på ca 320 m avstånd. På det kortare avståndet var höjdskillnaden ca 12 m, på det längre något mindre eftersom marken sluttar. Vid mätningarna hade vi lateral upplösning på ca $0,0095^\circ$ eller 165 μrad (FWHM). Optimal upplösning för systemet är 130 μrad , men ingen ansträngning gjordes för att fokusera bättre då det något defokuserade systemet är bra för att fylla ut målet vid skanning med steg om $0,1^\circ$. Den temporala upplösningen var 390 ps (FWHM), vilket motsvarar att ytor separerade med 6 cm i avstånd bör vara upplösta när båda ytorna finns inom synfältet och integrationstiden är tillräckligt lång.

4 Resultat av hårdvarusimulering

På det kortare mätavståndet (ca 150 m) användes ett karakteriseringsmål med fyra olika avståndsstrukturer, infällda bakom fyra svagt lutande rektangulära hål, med djupen 33, 53, 73 och 93 mm. Samma mål har också använts som en CAD-modell vid mjukvarusimuleringarna beskrivna i kapitel 5 och 6. Mätningen gjordes med ca 7° infallsvinkel i horisontalplanet och ca 4° infallsvinkel vertikalt på grund av höjdskillnaden. Infallsvinkeln ändrar avstånden mindre än 1 mm. Ett foto av målet visas i Figur 4. Vid mätningarna samlades data in för en något större scen med delar av betongkassunen bredvid målet och grässlätten bakom med i data.

Mätningen gjordes med enbart målet och med ett kamouflagenät hängt framför tavlans tre vänstra öppningar enligt Figur 5. På kanten av hålen i plåten och vid mätning genom kamouflagenätet fås reflexer från två ytor på olika avstånd, något som kan användas för att under kontrollerade förhållanden prova algoritmer för att detektera multipla ytor inom systemets momentana synfält.

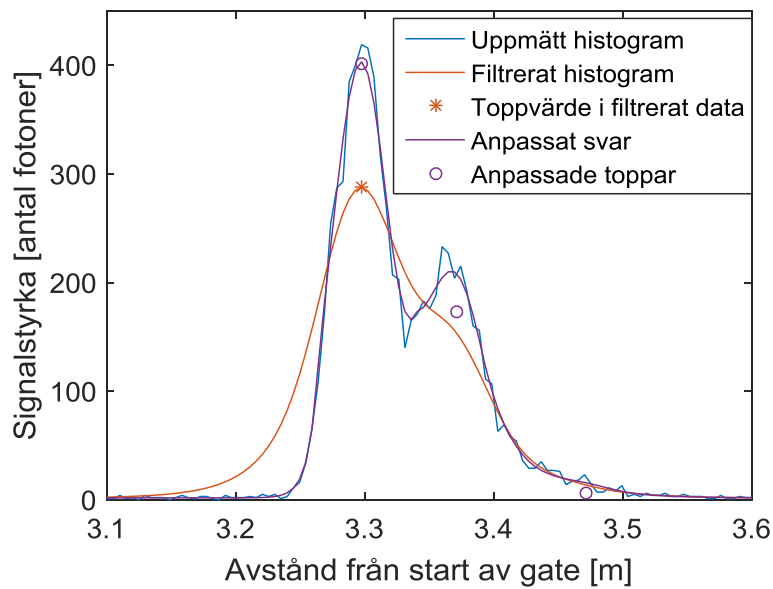


Figur 4. Referenstavlan med bakomliggande grässlätt och betongkassun. Avstånd ca 150 m.



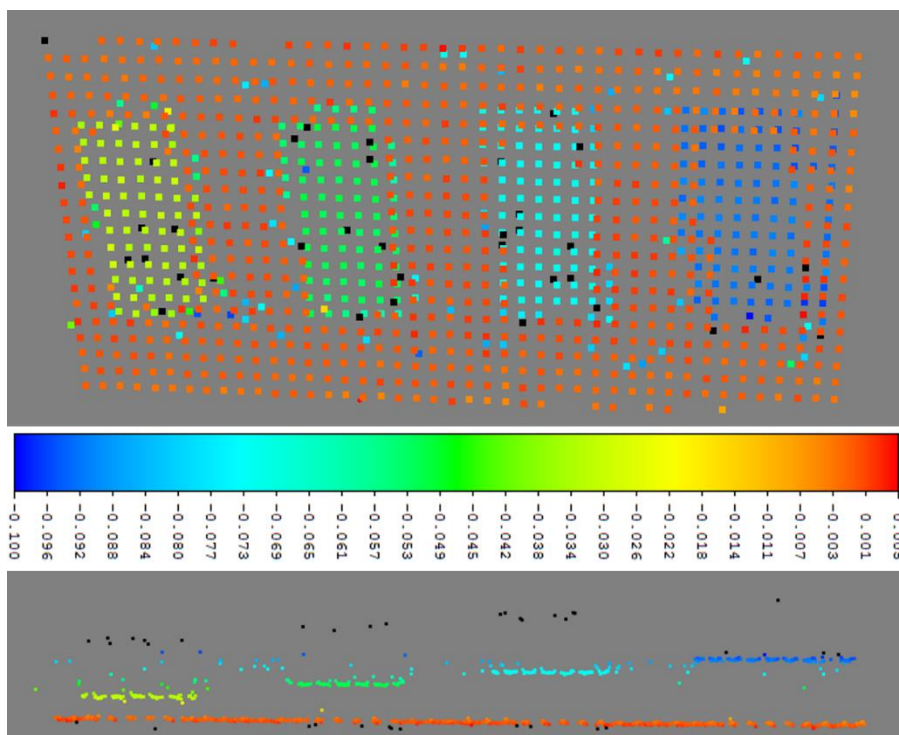
Figur 5. Referenstavlan med ett kamouflagenät hängt över det.

Vid stegade skann görs mätningar med stillastående mätsystem. Därmed kan detektionerna direkt samlas till histogram över avståndet. För att sedan identifiera ytor i den reflekterade scenen har två olika metoder provats. Den första som är relativt snabb gör en matchad filtrering i form av faltning med det tidsinverterade systemsvaret för att reducera brusvariationer så mycket som möjligt med så liten försämring av tidsupplösningen som möjligt. Sedan identifieras lokala maxima, och dessa antas överensstämma med reflekterande ytor. Den andra metoden, som är mycket långsammare, försöker optimera en linjärkombination av systemsvar vid olika avstånd till uppmätta data. Fördelarna är att den får bättre avståndsnoggrannhet, ner till delar av avståndsluckor, och kan identifiera flera ytor där svaren delvis överlappar. Ett exempel på skillnaden i resultat i ett par fall visas i Figur 6.



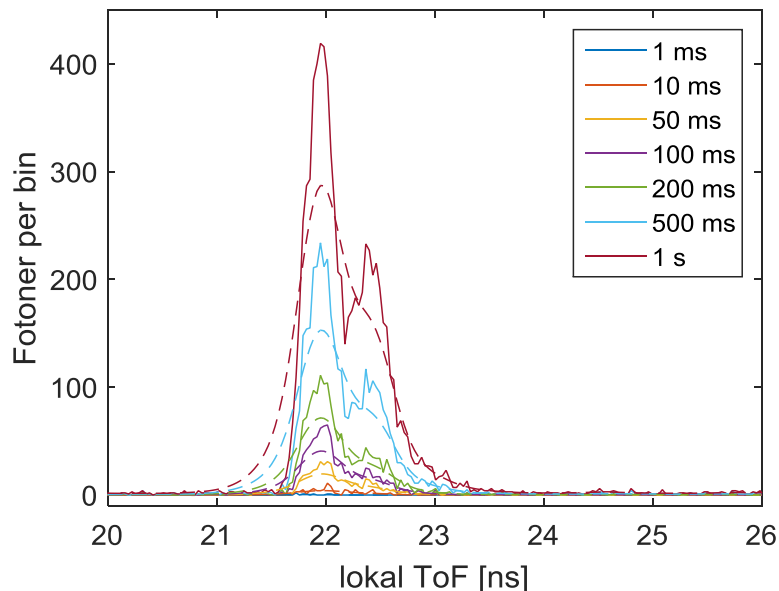
Figur 6. Exempel på data vid ett steg på 73 mm mellan två ytor inom synfältet. I de uppmätta data syns tydligt att det finns två ytor. Detta syns fortfarande i det filtrerade histogrammet, men upptäcks inte av en enkel algoritm som tar högsta värdet. Med en anpassning till en linjärkombination av systemsvar hittas båda ytorna, men även en tredje yta i bruset på bakflanken som egentligen inte finns.

När avstånden till ytor i en viss vinkel är identifierade ur mätdata kan vinklar och avstånd översättas till koordinater. På grund av det begränsade entydighetsavståndet måste en offset bestämmas på annat sätt och adderas till avståndet. Ett exempel på punktmoln visas i Figur 7.

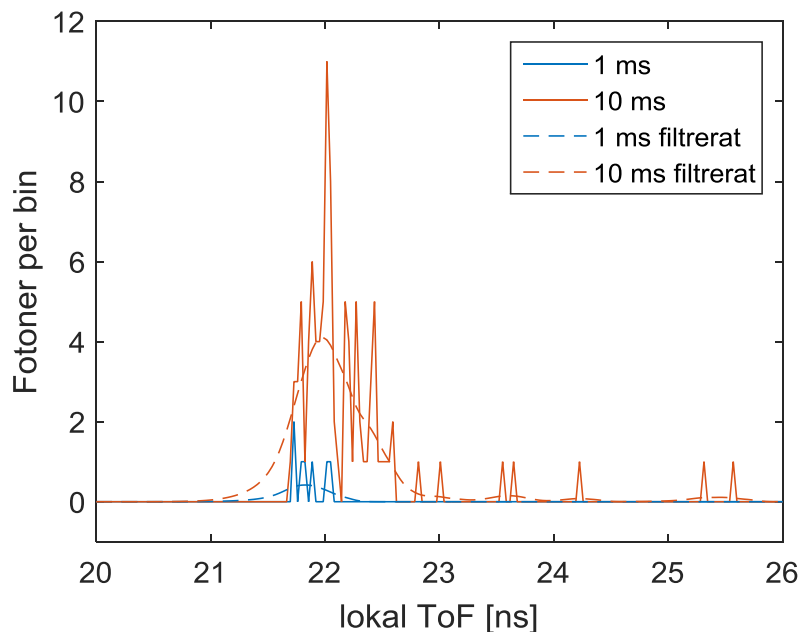


Figur 7. Exempel på punktmoln av karakteriseringsmålet. Data är insamlad med stegad mätning och analysen är gjord med anpassningsmetoden, vilket gör att kanterna på hålen blir väldigt skarpa i avståndsled. Skalan visar avstånd från karakteriseringsmålet främre ytplan.

En fördel med dataformatet som används för att lagra data är att vi vid utvärderingen kan variera integrationstiden. Eftersom de kortare tiderna är delmängder av de längre så återfinns en del brusvariationer i alla. I Figur 8 och Figur 9 visas histogrammen och de lågpasfiltrerade signalerna. För de längre integrationstiderna är det uppenbart att det är två ytor. För korta tider så kan man lätt missa den bakre, men även med 1 ms integrationstid så framträder toppen tydligt mot det bakgrundsgenererade bruset. Dock har vi då även tappat i avståndsnoggrannhet.



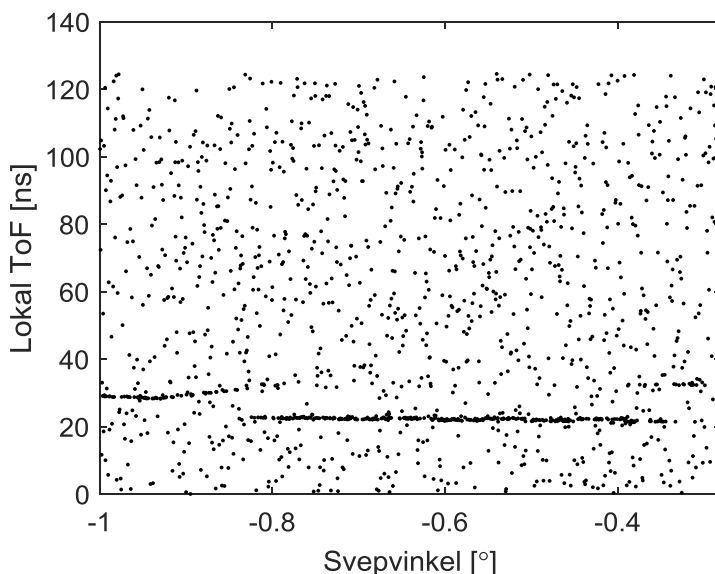
Figur 8. Exempel på mätning mot en position på kanten av hålet med 73 mm djup. Heldragna linjer är uppmätta histogram och streckade linjer samma signal efter lågpasfiltrering med matchat filter.



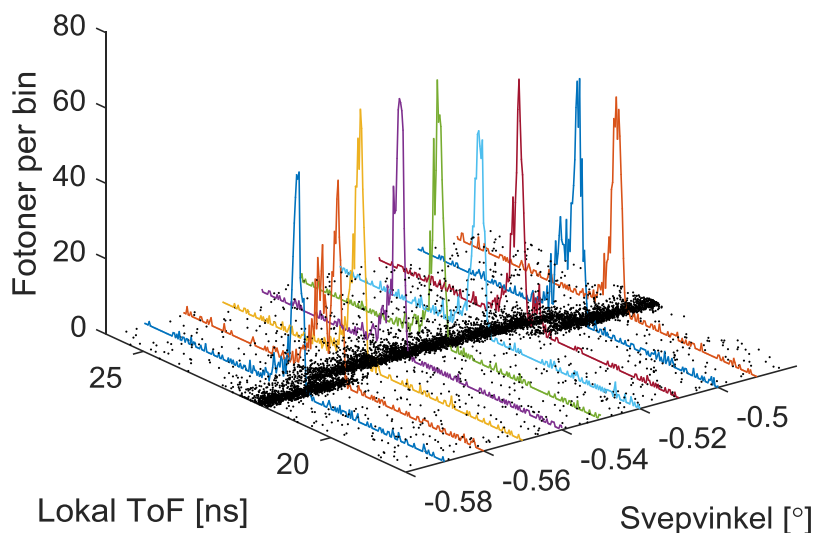
Figur 9. Samma data som i Figur 8, men med endast de två kortaste integrationstiderna visade. Med 10 ms integrationstid är det inte längre uppenbart att det finns två ytor. Med 1 ms integrationstid går det fortfarande att konstatera att det finns något där eftersom de tätt liggande detektionerna är mycket osannolika med så lågt brus, men noggrannheten i positionsbestämningen är inte längre lika god.

Vid mätning där systemet sveps kontinuerligt i vinkel kan histogram inte skapas direkt eftersom data är spridda i både vinkel och avstånd, som visas i Figur 10. Dock är det tydligt att det förekommer fler detektioner på avstånd där en reflekterande yta finns vid den vinkeln, än på andra avstånd där endast bakgrundsljus och detektorbrus orsakar detektioner.

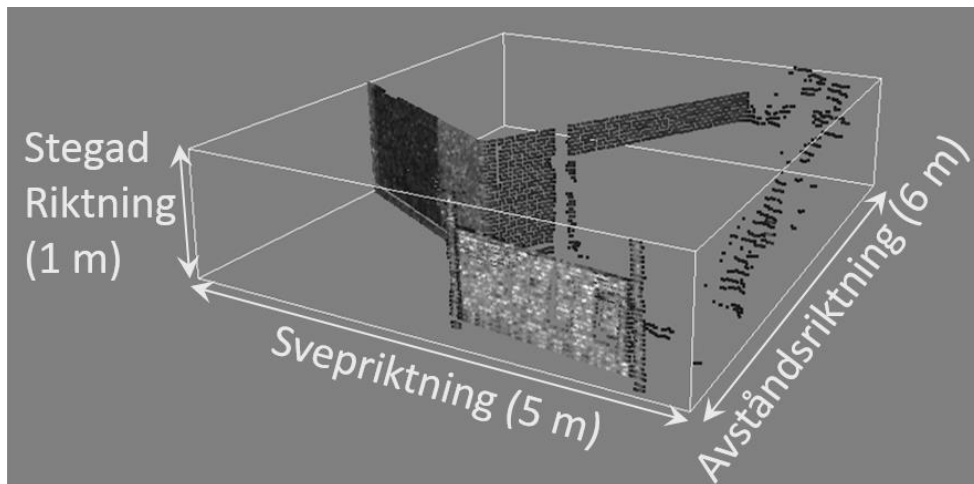
Som en första ansats till signalbehandling har alla detektioner inom vinkelintervall som stämmer med systemets synfält samlats till histogram, som illustrerat i Figur 11. Det är möjligt att en mer avancerad beräkning kan göras för att till exempel mäta bredd på ytor i scenen, detta är dock en senare uppgift som inte har studerats i denna projektfas. När histogrammen är framtagna kan identifiering av toppar göras på samma sätt som i fallet med stegade skann. Ett exempel på ett punktmoln framtaget på det enkla viset med bestämning av lokala maxima visas i Figur 12.



Figur 10 När alla detektioner ritas ut i avstånd och vinkel syns tydliga strukturer där ett större antal fotoner detekterats som sammanfaller med korrekt avstånd till reflekterande ytor vid den vinkeln.



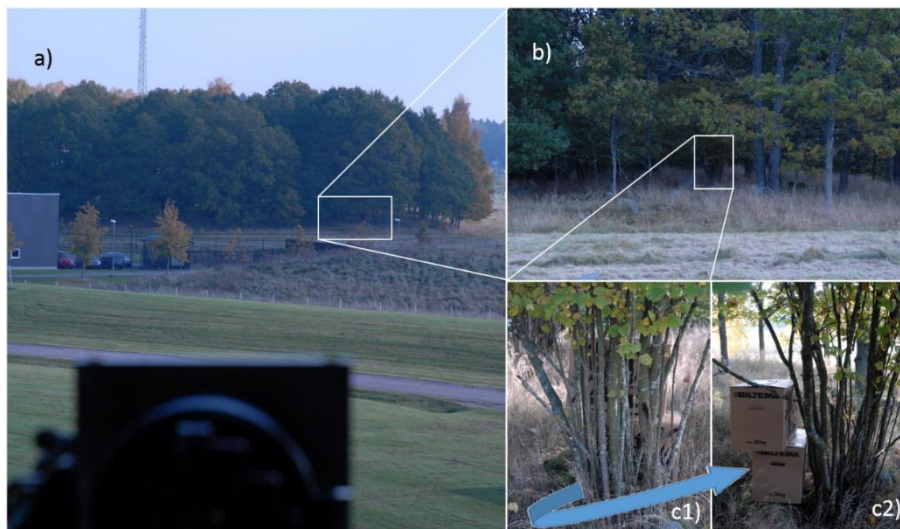
Figur 11 Detekterade fotoner förs samman till histogram inom vinkelintervall som motsvarar mätsystemets synfält för att sedan möjliggöra identifiering av reflexer.



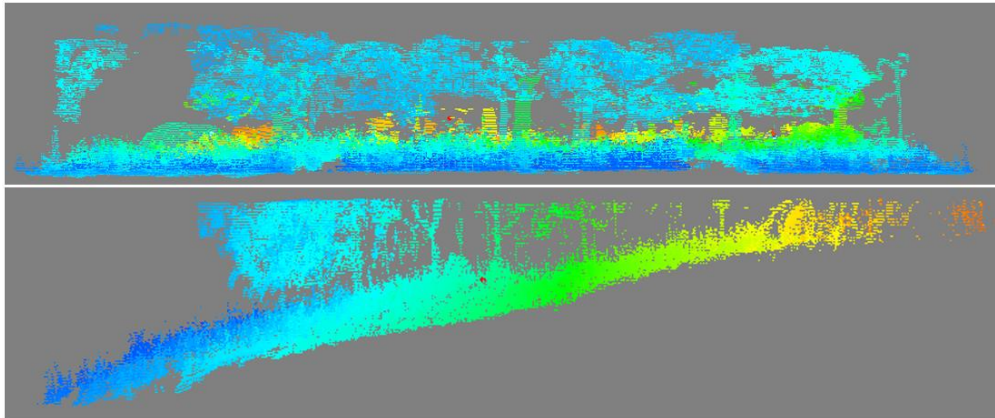
Figur 12. Punktmoln från mätning med kontinuerligt svepta rader. Punktmålsanalysen är gjord med den grova metoden.

För att studera en större och mer utmanande scen har svepta mätningar gjorts mot en skogsdunge på drygt 300 m avstånd. Dungen är lövskog dominerad av ek, och därmed inte extremt tät. Även med högförstorande kikare är det trots detta svårt att penetrera på djupet, vilket illustreras av foton a) och b) i Figur 13 där de utplacerade lådorna inte framträder.

I Figur 1 på sidan 8 visas en del av ett svep, alltså en ca 5 cm tjock skiva i höjddled. Det syns tydligt att det finns reflekterande objekt på olika djup och att vi penetrerar tiotals meter in i skogen. Vad som är trädstammar och vad som är grenar med löv är inte alltid uppenbart i en höjdskena, utan det syns först när man letar efter vertikala strukturer. För att något alls ska synas när alla höjdskenor överlagras så görs först en hopsamling till histogram och identifiering av toppar. På så sätt reduceras data till ett användbart punktmoln i princip utan brus, som visas i Figur 14.

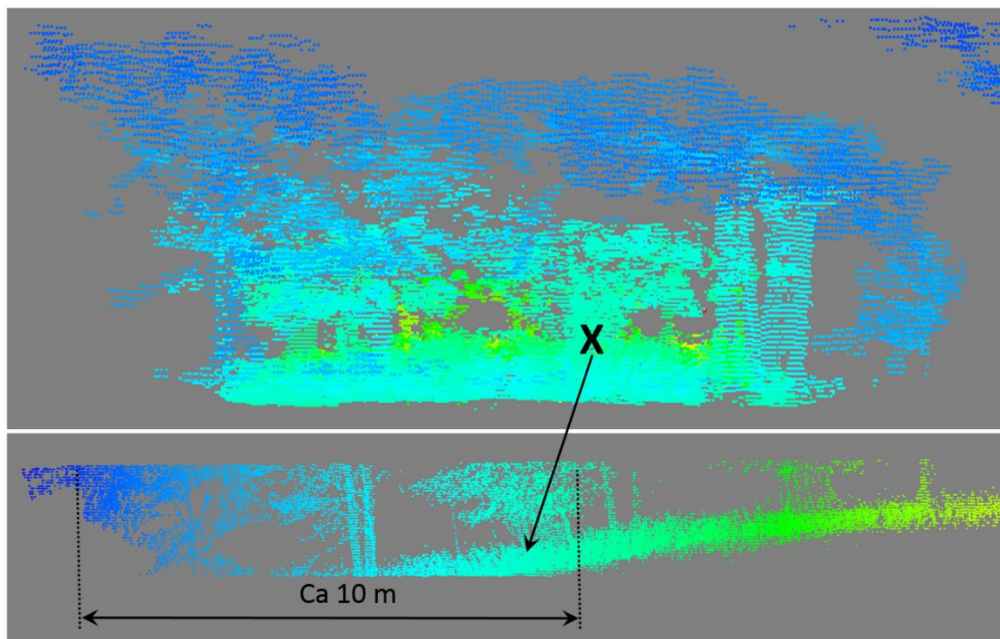


Figur 13. Kartongmål, bestående av två staplade kartonger, uppmätt på ca 350 meters avstånd. A) är scenen sedd från sensorns plats, medan b) är fotograferad i marknivå på närmare avstånd. Kartongerna placerades tätt bakom en hasselbuske, förskjutna ca 10 cm i avståndsled. c1) visar scenen sedd från sensorn och c2) ca 90 grader vriden. Personen stod likaledes bakom denna hasselbuske och vi använde även en kartongskiva som placerades mitt bland hasselbuskens stammar. Mått på en kartong är 576×346×407mm (B×H×D).

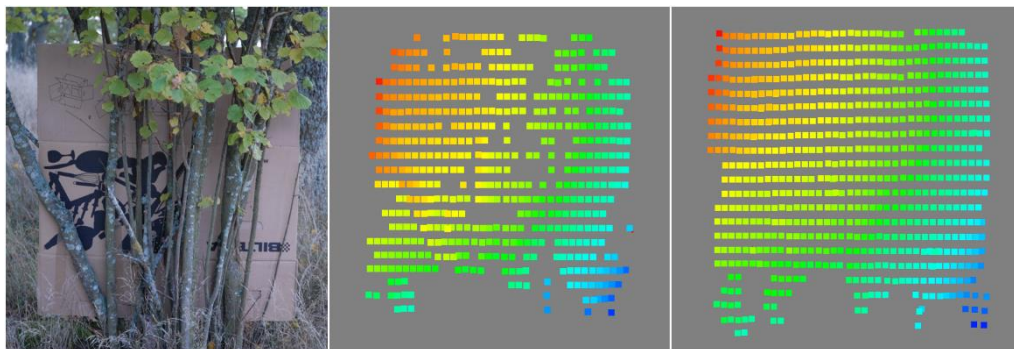


Figur 14. Det stora skogspartiet sett framifrån (övre bilden) samt från sidan (nedre bilden). Färgen visar avstånd, blå kulör närmast sensorn.

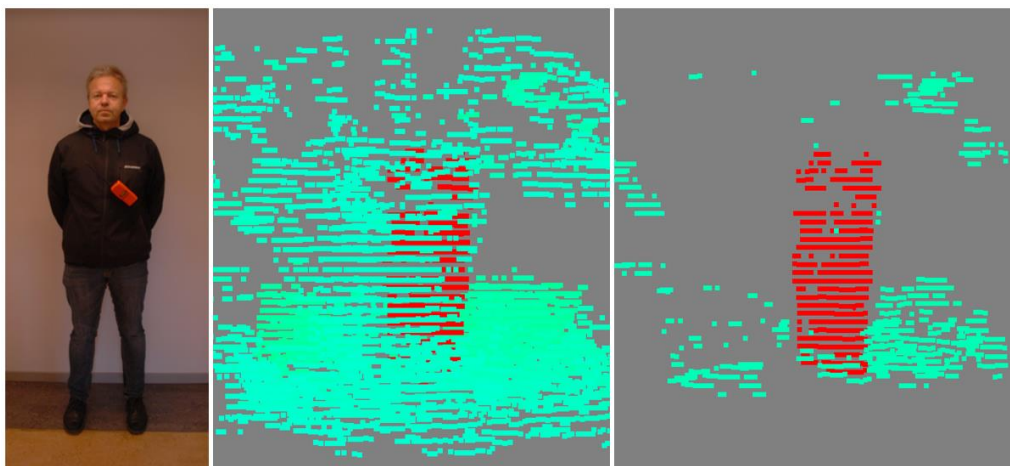
I vissa av mätningarna sattes mål i form av rätblock (papplådor) och personer in, delvis skydda av lövverk, för att generera dataset att testa detektionsalgoritmer mot. Området är ungefär jämförbart med Figur 13b). Figur 14 visar punktmolnsresultat utan några utplacerade mål. Mål placerades ut bakom hasselbusken i form av staplade kartonger, kartongskiva genom busken (Figur 15 och Figur 16), samt en person (Figur 17).



Figur 15. Det mindre skannet där mål placerades vid en hasselbuske, i det här fallet en kartongskiva instucken mellan stammarna.. Hasselbuskens främre kant är markerad med ett X i vyn framifrån och utmarkerad med en pil från sidan. Från bladverkets kant som låg i synfältet för målen fram till målen var avståndet ca 10 m. Blå kulör närmast sensorn.



Figur 16. Kartongskiva placerad genom hasselbusken. Den mitre och den högra bilden visar enbart punkter som detekterats på kartongskivan bakom hasselbuskens skyl. Den mitre bilden är resultatet av den snabbare matchade filtreringen och toppvärdesdetektionen, som resulterar i en del tomma bildpunkter på kartongen. Den högra bilden visar resultatet av den långsammare, men också noggrannare detektionsmetoden baserad på optimering av linjärkombinationer av systemsvar. Notera att kartongskivan i stort sett blir homogen med den noggrannare metoden, även bakom skyl, då grenarna i detta fall befinner sig några fåtal cm framför kartongskivan.



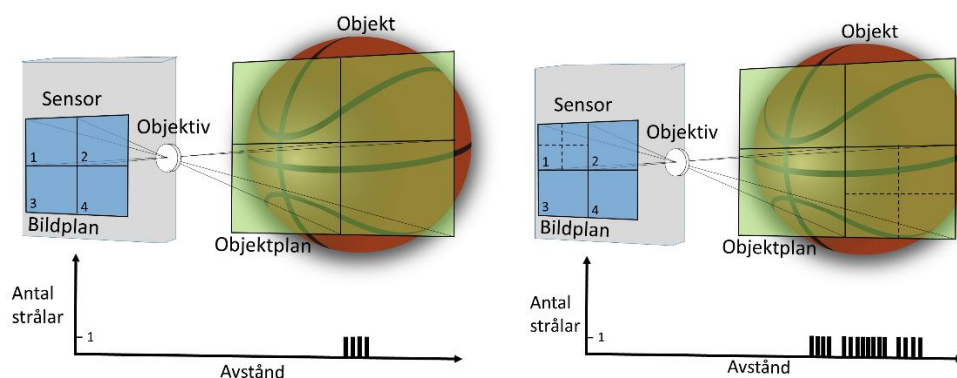
Figur 17. En person placerades som mål bakom hasselbusken. Bilderna är presenterade såsom sensorn såg scenen. Bilden i mitten inkluderar alla punkter med personens punkter rödmarkerade. Punkterna har framställt utifrån toppvärdesdetektion. Till höger visas personens punktmoln utskuret. Notera de många punkter som detekterats framför personen (ljusblå punkter framför de röda i den mitre bilden). Notera också de röda punkterna i höger bild som visar detektioner på kroppen. Optimal detektion av personen skulle innebära att inga pixlar skulle vara tomma på kroppen, nu saknas några fåtal pixlar samt att personen blir huvudlös. Detta är ett välkänt fenomen vid $1,5 \mu\text{m}$ då hud är mycket lågreflekterande vid denna våglängd.

5 Beskrivning av mjukvarumodell

Modellen för mjukvarusimulering är framtagen och vidareutvecklad i flera tidigare projekt [7]. Den senaste modellutvecklingen har fokuserat på simulering av ett fotonräknande lidarsystem [8], där en fotonräknande matrisdetektor inkluderats i modellen. Vi beskriver här kortfattat modellens ingående delar och funktionalitet. Utöver syftet att beskriva modellen så syftar denna beskrivning även till att ge ökad förståelse av principerna för fotonräknande lidar.

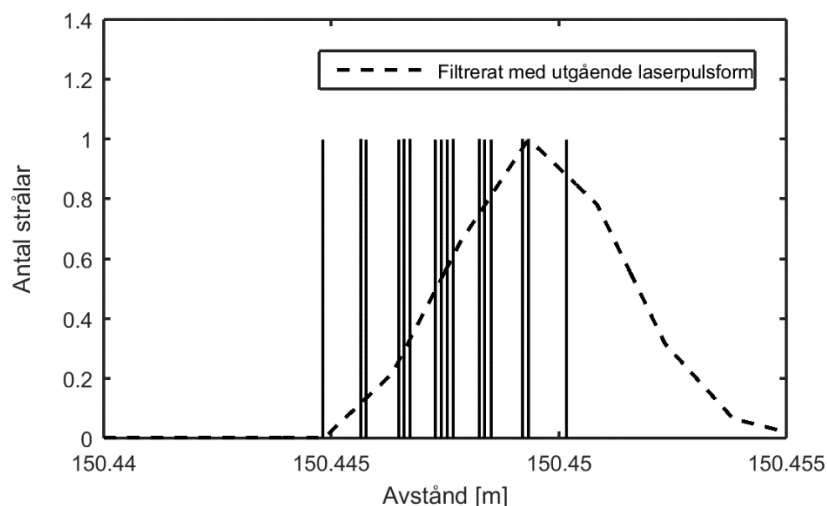
Modellen kan grovt indelas i fyra komponenter vilka beskrivs i fortsättningen av detta kapitel. Dessa fyra delarna är *strålgångssimulering* (eng. raytracing), *systemkomponent*, *fotonstatistik* och *signalbehandling*. Vid simulering kan dessa komponenter dock inte helt frikopplas från varandra.

Strålgångssimuleringen beräknar hur ljusstrålar utbredds mellan sensorn och scenen och hur de reflekteras mot målobjekten. För varje sensorpixel räknas avstånd fram och tillbaka mellan sensor och målobjekt. Figur 18 visar en schematisk illustration av strålgångssimulering för en sensor med fyra pixlar. Eftersom avståndet kan variera inom en pixels synfält behöver simuleringen ha en högre pixelupplösning än den fysiska sensorn. Nederkanten av Figur 18 illustrerar fördelningen av avståndsvärden för de fyra fysiska pixlarna (a) och fördelningen av avståndsvärden och för de simulerade 16 så kallade subpixlarna. Förutom att ge korrekt avståndsupplösning har även subpixlarna betydelse för att beräkna rätt signalstyrka. För de fall där ett målobjekt är smalare eller mindre (t ex trädgren eller löv) än en hel pixel kommer signalstyrkan att reduceras eftersom färre strålar returneras mot sensorpixeln. En annan uppgift för strålgångssimuleringen är att beräkna styrkan hos varje enskild reflekterad stråle genom att använda information om reflektans på målets olika delar. Detta visas inte i den förenklade Figur 18. Reflektansen kan även vara vinkelberoende (Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF) och då tas även hänsyn till strålens infallsvinkel mot målets yta. För strålgångssimuleringen används information om systemets och målens placering och hur varje sensorpixels synfält är riktat i förhållande till målobjekten. Information om sensorns synfält ingår i beskrivningen av systemkomponenten nedan och är en anledning till att simuleringskomponenterna inte kan frikopplas helt från varandra.



Figur 18. Schematisk illustration av strålgångssimulering för en sensor med fyra pixlar (markerade 1-4). Vänstra figuren visar simulering av fyra pixlar. Den högra figuren visar motsvarande simulering med skillnaden att varje fysisk sensorpixel delas upp i respektive fyra subpixlar. I den högra figuren är de fyra subpixlarna för fysisk sensorpixel "1" markerade med streckade linjer i sensorns bildplan och i objektplanet där målet befinner sig. Nederkanten av figurerna illustrerar fördelningen av avståndsvärden för varje stråle mellan respektive pixel och mål.

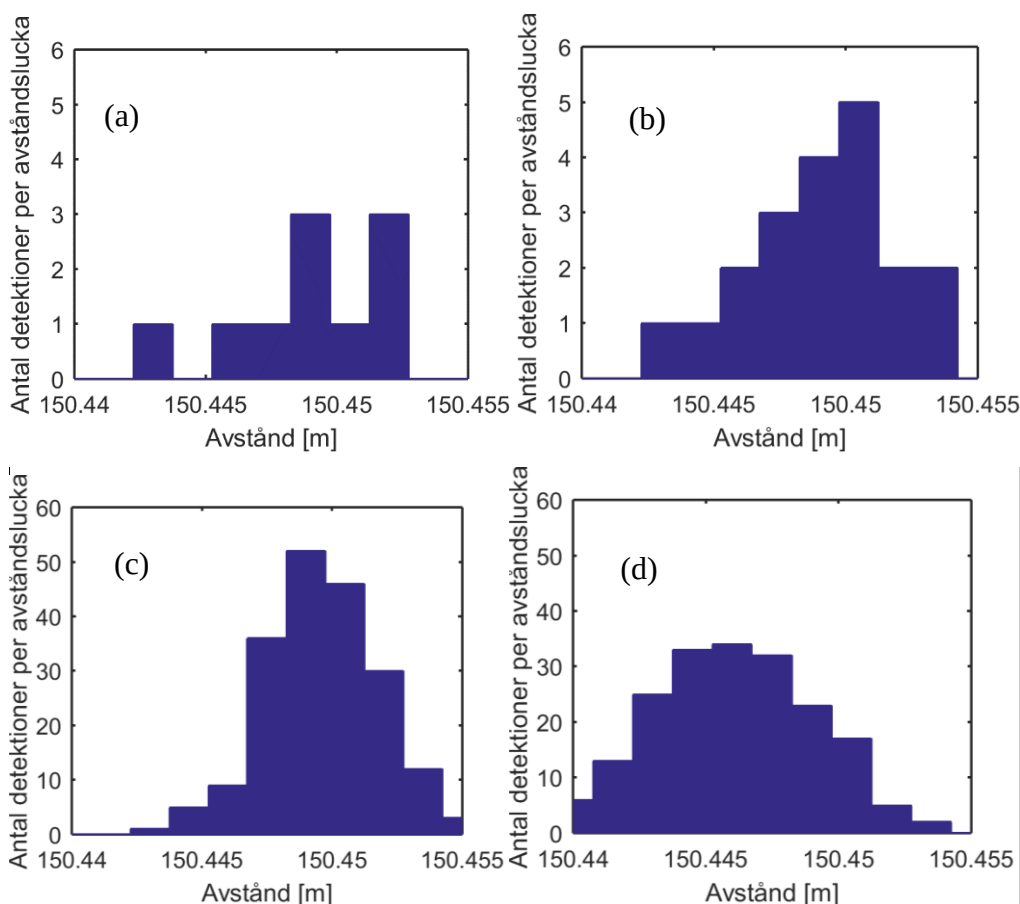
Systemkomponenter innehåller beräkningar av signalstyrka och känslighet för sensorsystemet lateralt (i sida) och i avstånd (vilket har sin motsvarighet i systemets tidssignal). Systemkomponenter beskriver de fysiska delarna laser, detektor, sändar- och mottagaroptik. Som ett exempel anges mottagaroptikens öppningsdiameter (apertur eller iris), där en stor öppning ger fler mottagna fotoner per tidsenhet än en liten. Ett annat exempel på parametrar är systemets fokallängd i kombination med detektorns pixelstorlek som ger varje pixels synfält (IFOV, Instantaneous Field-Of-View) vilken används i strålgångssimuleringen. Ett tredje exempel är laserns sändaroptik som definierar stråldivergensen (bredden på strålen) vilket i sin tur bestämmer hur mycket laserenergi per ytenhet som träffar målets olika delar. Ett fjärde exempel är laserns pulslängd och pulsform som används för att beskriva hur reflekterade och returnerade fotoner är fördelade över tiden för varje enskild pixel. En illustration visas i Figur 19 där avståndsvärden för varje subpixel (från strålgångssimulering) filterats med utgående laserpuls. Den streckade kurvan i figuren visar den beräknade fördelningen över tid för de återvändande fotonerna mot pixeln efter att subpixlarna träffats av laserpuls.



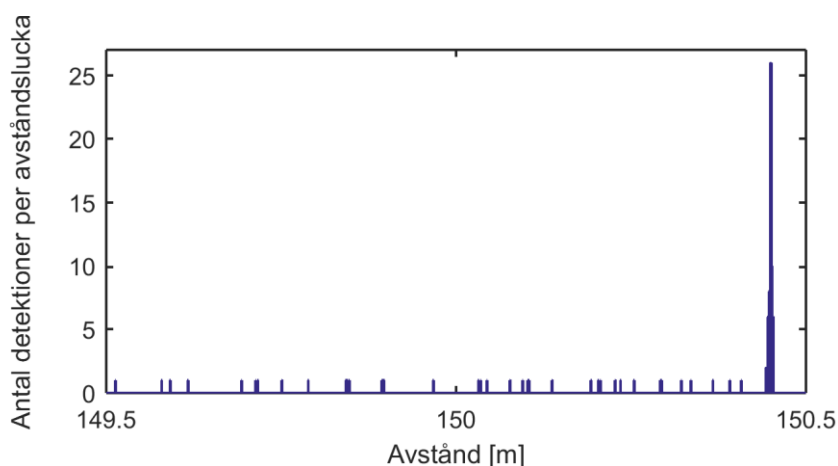
Figur 19. Resultatet från strålgångssimulering för en sensorpixel med $4 \times 4 = 16$ subpixlar. Vertikala linjer visar avstånd för respektive subpixel enligt principen som illustreras i Figur 18. Målet, som är en plan svagt lutande yta, befinner sig på ca 150 m från sensorn. Den streckade kurvan visar resultatet då avståndsvärdena lagts i avståndsluckor och filterats med pulsformen för systemets utgående laserpuls. Den filterade kurvan har normaliserats till toppvärde lika med ett.

Fotonstatistik tas fram för varje pixel baserat på beräkningsresultat från strålgångsgenerering och systemkomponent. För varje utsänd laserpuls beräknas ett detektionsavstånd ur en slumpmässig sannolikhetsfördelning. Sannolikhetsfördelningen är en sammanvägd fördelning baserad på fördelning av reflekterad laserpuls (streckade kurvan som visas i Figur 19), på sannolikhet för brusdetektioner (bakgrundsljus och detektorbrus), samt på detektorns och elektronikens tidsjitter. För varje utsänd laserpuls beräknas maximalt ett (1) detektionsavstånd. Därefter måste (den verkliga fysiska) pixeln återställas innan en ny detektion kan göras. Detektionsavstånden för flera simulerade utsända pulser lagras för vidare bearbetning. I Figur 20 visas exempel på simulerade detektionsavstånd i form av histogram för olika antal utsända laserpulser och systemsvar. Detektorns systemsvar får man fram ur mätkaraktärisering av detektorn eller från dess specifikation. Systemsvarets form och längd definierar hur detekterade fotoner sprids över tiden och bestämmer därmed vilken tidsupplösning (och motsvarande avståndsupplösning) systemet har. I Figur 20 visas resultatet av två olika breda systemsvar, 250 ps i figurerna (a)-(c) och 390 ps i (d), där effekterna räknats om till avståndsvärden. I ett utzoomat histogram för detektionen visas i Figur 21 även fördelning av brusdetektioner från simuleringen. Det finns en ansamling av detektioner från avståndet där målet befinner sig. Det är denna ansamling av fotoner på ett

begränsat avståndsintervall som signalbehandlingen utnyttjar för att bestämma om ett objekt har träffats och avståndet till det.

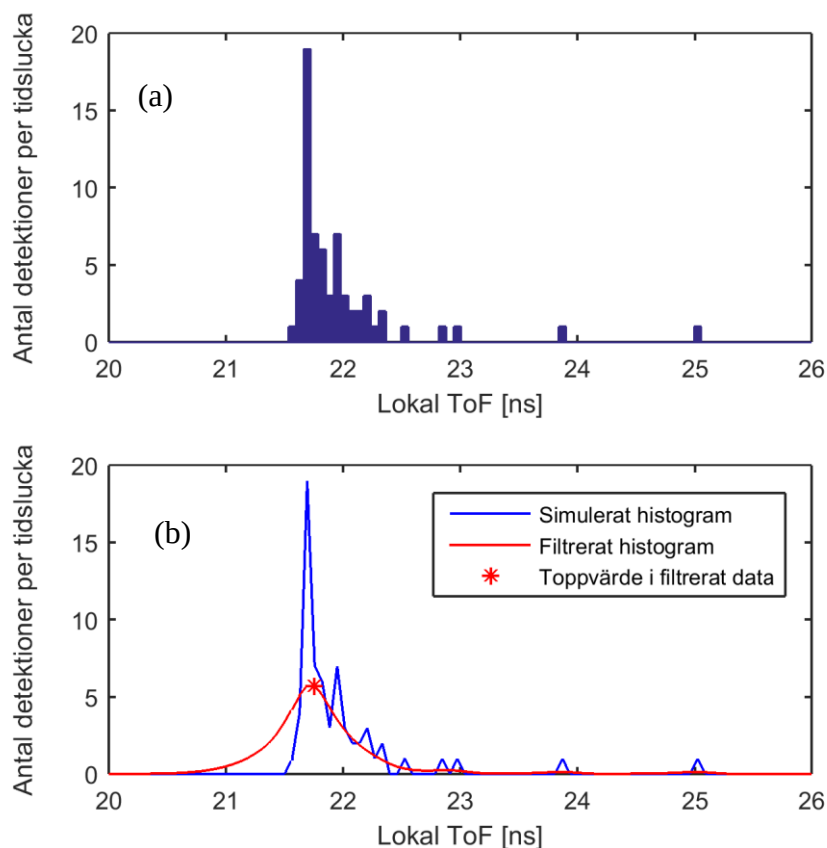


Figur 20. Simulering av fotondetektioner av den reflekterade laserpulsen från målet. Figur (a) visar resultatet från 10 st utsända pulser och med 250 ps bredd på detektorns systemsvar. I figurerna (b) och (c) har antalet pulser ökat till 20 respektive 200, fortfarande med 250 ps systemsvar för detektor. Figur (d) visar resultat med 200 pulser och systemsvarets bredd ökad till 390 ps.

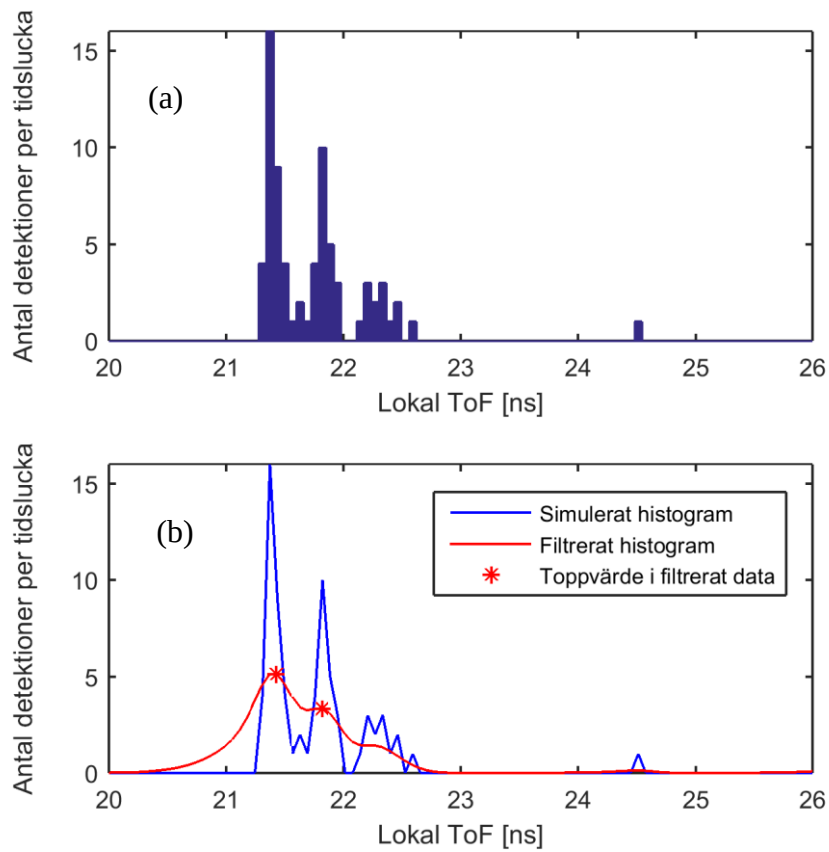


Figur 21. Simulering av fotondetektioner av 200 reflekterade laserpulser från målet på ca 150 m avstånd. I figuren visas även simulerade detektioner i mottagaren som uppstår även där det inte finns ett mål på aktuellt avstånd. Dessa detektioner kommer från bakgrundsljus och detektorbrus.

Signalbehandlingen är inte en del av simuleringen av den fotonräknande lidarn, men vi tar ändå upp den här eftersom den är nödvändig för att bestämma avstånd ur den simulerade fotonstatistiken. Signalbehandlingen av simulerade signaler har samma princip som för ett verkligt system och den är nödvändig eftersom vi vill ha ut ett avstånd per pixel (eller ett fåtal om det är flera ytor i pixelns synfält), inte ett avstånd per laserpuls. Signalbehandlingen kan göras på olika sätt. I Figur 22 visas resultat från en enkel signalbehandling. Denna signalbehandling tillämpas även på resultat från hårdvarusimuleringar i kapitel 4. Avståndsskalan har i denna figur räknats om till lokal ToF (Time-of-Flight) sedan aktivering av detektorn. Man utgår från den insamlade (simulerade) fotonstatistiken som placerats i ett histogram Figur 22 (a). Histogrammet kan även betraktas som en tidssignal som visas i figur Figur 22 (b). Denna tidssignal filtreras med ett matchat filter genom faltning med det tidsinverterade systemsvaret för att reducera brusvariationer så mycket som möjligt med så liten försämring av tidsupplösningen som möjligt. Sedan identifieras lokala maxima, och dessa antas överensstämma med reflekterande ytor. I Figur 23 visas motsvarande resultat från samma signalbehandling men där två ytor separerade med 73 mm i avstånd finns inom pixelns synfält. Filtringen och toppvärdesdetektionen lyckas här detektera dessa två ytor med relativt noggrant avstånd mellan ytorna, i detta fall ca 0,5 ns vilket motsvarar 75 mm i avståndsled. I kapitel 4 diskuteras även en något mer avancerad signalbehandling.



Figur 22. Exempel på simulerade data av 200 reflekterade laserpulser från en pixel med en plan yta inom synfältet. Figur (a) visar histogram över antal mottagna detektioner som funktion av tid sedan mottagarens mottagningslucka öppnats. Figur (b) visar motsvarande histogram presenterat som en tidslinje och ett filtrerat histogram där toppvärdet är detekterat med en toppvärdesdetektion.

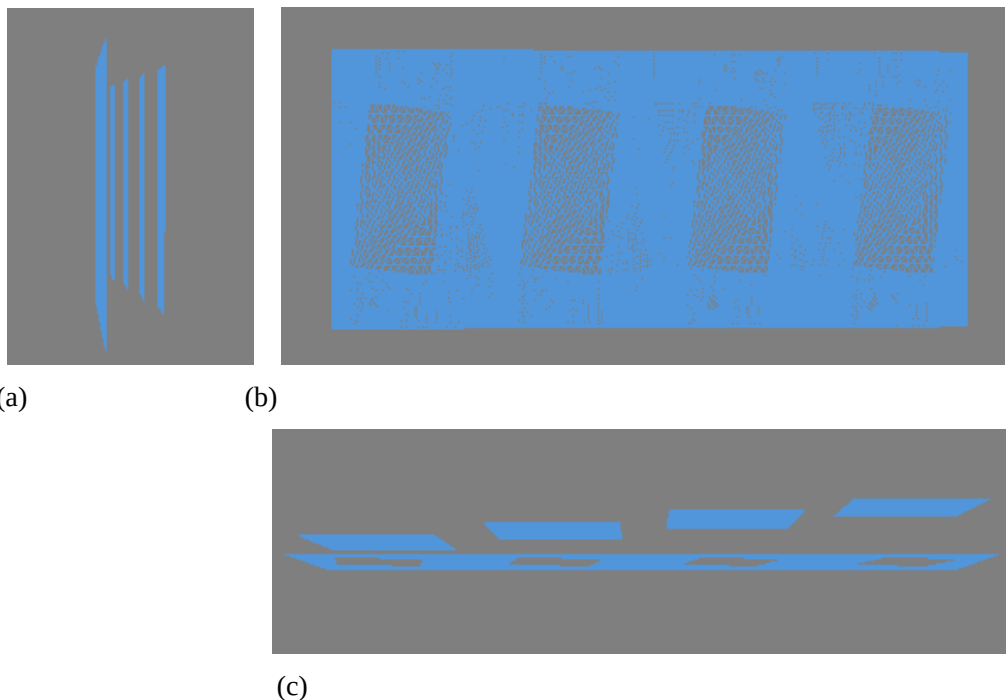


Figur 23. Exempel på simulerade data av 200 reflekterade laserpulser vid ett steg på 73 mm mellan två ytor inom synfältet. Figur (a) visar histogram över antal mottagna detektioner som funktion av tid sedan mottagarens mottagningslucka öppnats. Figur (b) visar motsvarande histogram presenterat som en tidslinje och ett filtrerat histogram där två toppvärden är detekterade med en enkel algoritm.

6 Resultat av mjukvarusimulering

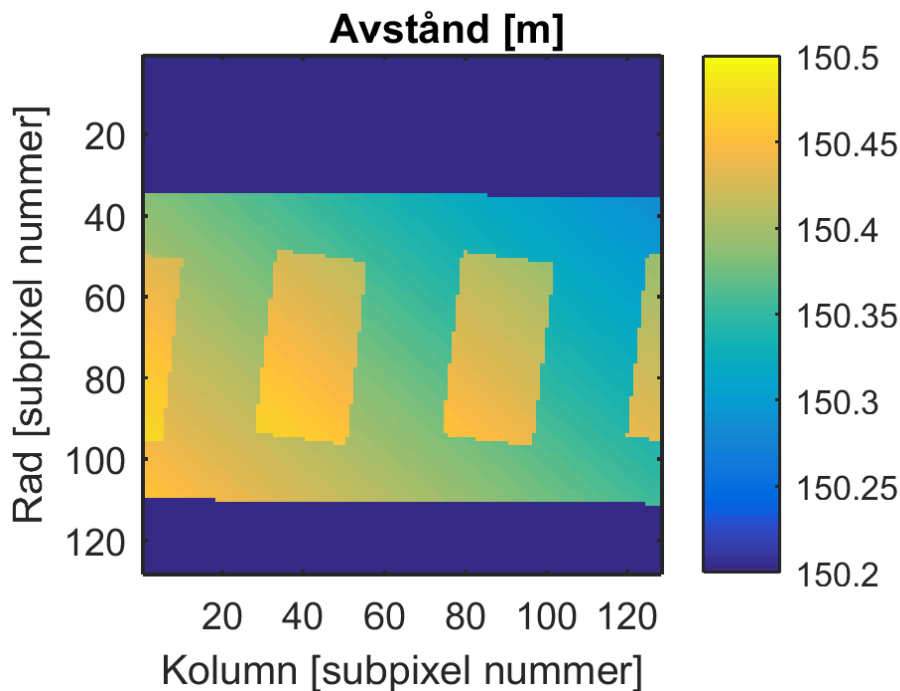
Ett antal mjukvarusimuleringar har genomförts med syfte varit att utvärdera modellens möjligheter och begränsningar för framtida användning som komplement till hårdvaruprov och utvärdering av signalbehandlingsmetoder. Ett annat syfte har varit att studera modellens egenskaper och jämföra dessa med resultat från hårdvarusimulering. Viktiga framtida användningar av mjukvarusimulering är dels simulering av hårdvara som inte finns tillgänglig för experimentella studier och dels mätsituationer som är svåra att realisera såsom mätning från rörlig flygande plattform.

För att utvärdera simuleringsmodellens egenskaper för prestanda i sido- och avståndsupplösning sattes en scen upp som motsvarar ett av mätfallen i rapportens hårdvarusimuleringar (kapitel 4). Den modell av målobjektet som använts vid simuleringarna visas i Figur 24. Målet är en modell av en referenstavla med fyra olika avståndsstrukturer med djupen 33, 53, 73 och 93 mm. Målet placerades på ca 150 m mätavstånd från sensorn. Sensorns höjd är ca 12 m högre än målet. Även målets orientering arrangerades så att det överensstämde med hårdvarusimuleringen med en orientering om ca 7° infallsvinkel i horisontalplanet och ca 4° infallsvinkel vertikalt på grund av höjdskillnaden.



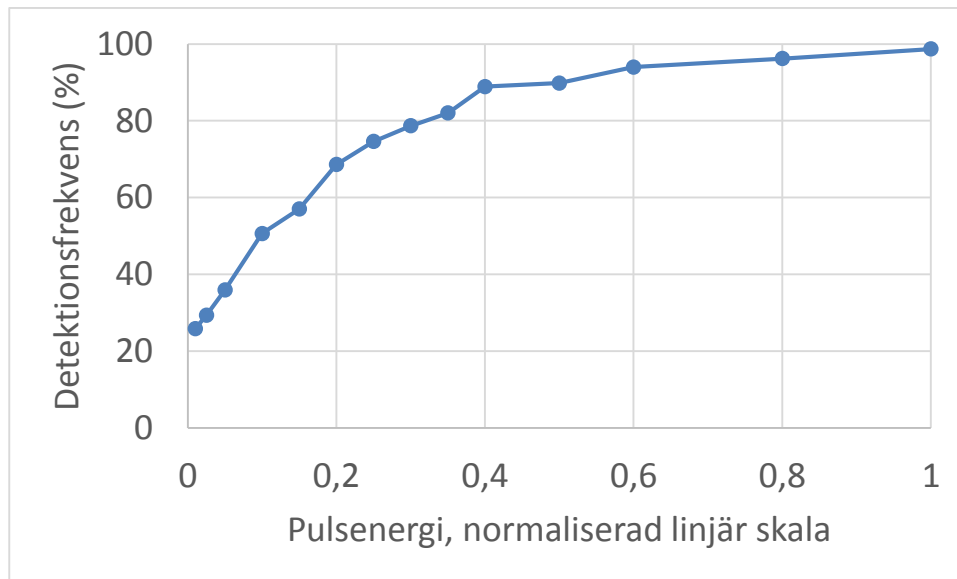
Figur 24. Illustration av 3D modell som använts som mål vid mjukvarusimuleringarna. Målet sett från sidan (a), framifrån (b) och ovanifrån (c).

Simuleringar genomfördes som en statisk scen med en 32×32 pixlars matrisdetektor och en subpixelupplösning på 4×4 per fysisk pixel. Totala antalet subpixlar var alltså 128×128 . Synfältet för matrisen ställdes in så att $0,01^\circ$ steg mellan varje kolumn och rad i (den fysiska) matrisen erhöles. Resultat från strålgångssimuleringen med denna uppställning visas i Figur 25. Även modellens ursprungsvärden för systemsvarets bredd och laserns pulslängd ställdes in så att de överensstämde med experimentella systemets 390 ps respektive 25 ps. Utöver detta genomfördes även simulering med 600 ps bredd på systemsvaret, vilket är mer realistiskt för en matrisdetektor. Tidsluckornas längd valdes till 64 ps, vilket också användes vid hårdvarusimuleringen. Tidsluckornas längd är den steglängd som används för registrering av detektioner i diskreta detektionsavstånd, d v s bredden på varje stapel i de histogram som visas i Figur 22 (a) och Figur 23 (a).



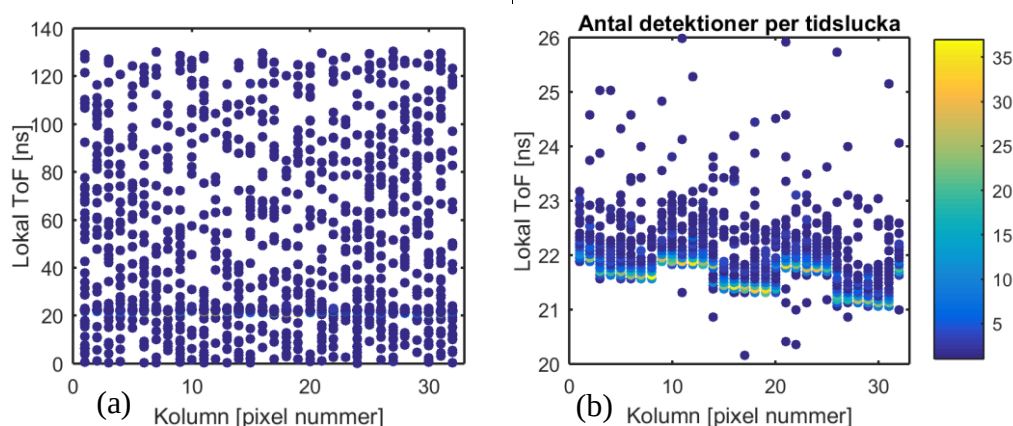
Figur 25. Avståndsbild från strålgångssimulering med målet på ca 150 m avstånd och en matrisdetektor med 32×32 pixlar med 4×4 subpixelupplösning i simuleringen.

Det finns några saker som inte i detalj ställts in på samma sätt som för hårdvarusimuleringarna. Det ena är relaterat till effektnivåer inkluderat laserns pulsenergi och divergens, samt mottagarens apertur och systemets optiska verkningsgrad. Det andra är systemets brusnivå. För en detaljerad modellering av dessa delar krävs en mer omfattande karakterisering som faller utanför arbetet i detta skede. Mjukvarumodellens pulsenergi har grundinställts så att detektionsfrekvensen blev 50 %. Detta innebär alltså att ca 50 % av de utsända pulserna ger en detektion i varje pixel, vilket följer tumregeln att 50-70 % av antalet utsända pulser ska ge detektion i varje pixel. Denna tumregel motiveras av att man vill kunna detektera flera avstånd i en och samma pixel. Resultat från simuleringar av olika detektionsfrekvenser i förhållande till normaliserad pulsenergi visas i Figur 26.

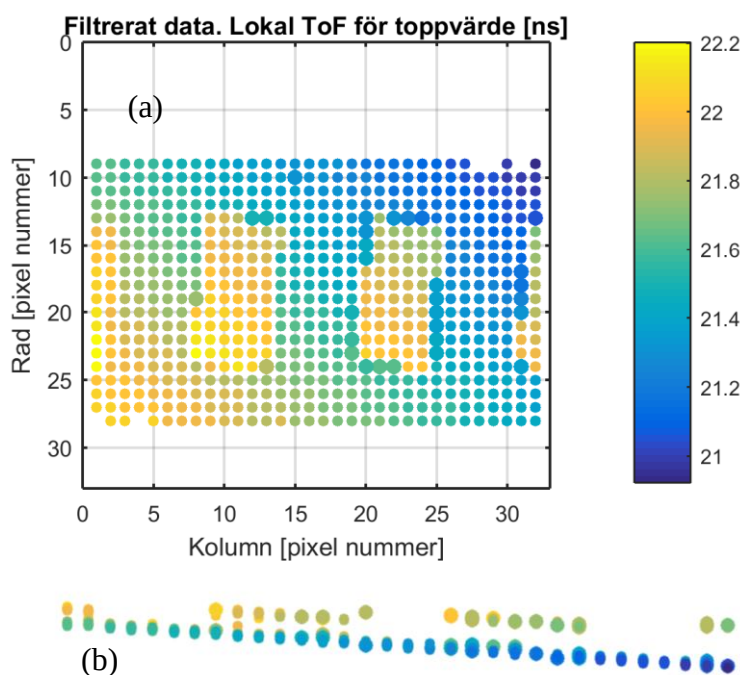


Figur 26. Resultat från simulering av detektionsfrekvens som funktion av laserns pulsenergi. Resultatet baseras på statistik från 100 utsända pulser och 10 pixlar på målet.

Resultatet med grundinställningar och simulering av 200 pulser visas i Figur 27. Det data som visas i figuren är antal detektioner per tidslucka enligt samma princip som illustreras i Figur 22 (a) och Figur 23 (a). Dock visas nu 32 pixlar med målet sett uppifrån. Data kommer från pixelrad 15 i detektormatrisen, vilket motsvarar subpixelraderna 57 – 60 i Figur 25. I Figur 27 (a) syns de sanna målytorna som ansamlingar av detektioner kring 20 ns lokal ToF, tillsammans med glesa detektioner från bakgrundsljus och detektorbrus. I Figur 27 (b) visas data inzoomat över ett kortare tidsintervall med antalet detektioner i varje tidslucka. För att bestämma ett eller flera avstånd i varje pixel behöver data filtreras och toppar detekteras enligt metoden beskriven i kapitel 4. Resultatet från denna bearbetning för hela detektormatrisen visas i Figur 28, där små punkter visar att *ett* avstånd detekterats och stora punkter att flera avstånd detekterats i pixeln (jämför Figur 22 (b) och Figur 23 (b)). Vi ser att endast enkeldetektioner görs vid kanten av ytan med 33 mm separationsavstånd, ett fåtal dubbeldetektioner vid 53 mm, och flera dubbeldetektioner kring kanterna av ytorna med 73 mm och 93 mm separationsavstånd. Detta resultat överensstämmer kvantitativt med, och förklaras av, den använda bredden på systemsvaret om 390 ps vilket motsvarar ca 58 mm i avståndsled. Vi noterar även en falsk dubbeldetektion av ytor gjorts på rad 10 och kolumn 15 i matrisen. Det visar sig i Figur 27 (b) som en detektion av en falsk yta något bakom tavlan. Vi noterar i Figur 27 också att färre pulser ger färre pixlar med detektion på kanterna av tavlan i övre och nedre kanten, vilket beror på att antalet mottagna fotondetektioner i dessa pixlar är få eftersom målytan endast täcker en del av pixelns synfält.



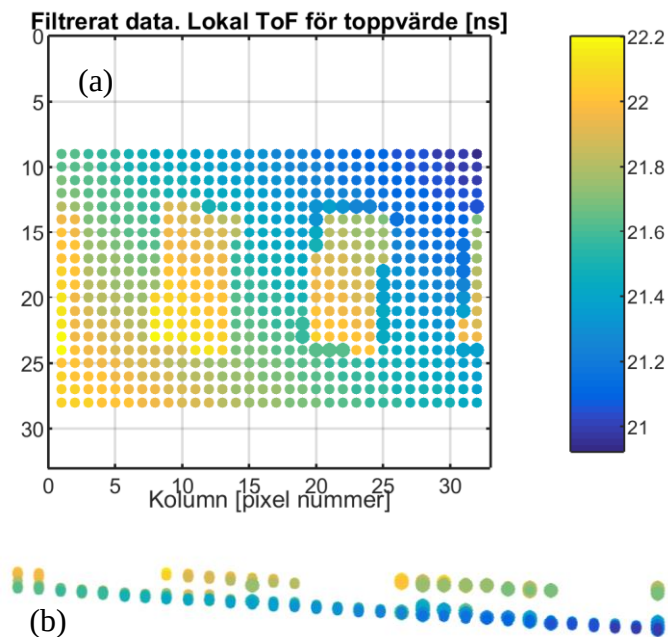
Figur 27. Resultat från simulering av detektioner från målet för en pixelrad med 32 kolumner i en matrisdetektor. Varje prick i bilden motsvarar detektioner i en tidslucka. De sanna målytorna syns i form av ansamlingar av detektioner kring 20 ns lokal ToF, men utspritt finns glesa detektioner från bakgrundsljus och detektorbrus (a). I figur (b) visas samma data inzoomat över ett kortare tidsintervall där även antalet detektioner i varje tidslucka visas. Data baseras på 200 simulerade laserpulser med 0,1 normaliserad pulsenergi (enligt Figur 26) och en avståndsupplösning i mottagaren på 390 ps.



Figur 28. Punktmoln från simulering av detektioner och efterföljande filtrering och toppvärdesdetektion med en enkel algoritm. I figur (a) syns målet framifrån där små punkter visar pixlar där enbart en yta detekterats medan stora punkter visar pixlar där toppvärdesdetektorn registrerat två toppar (ytor). Resultatet baseras på 200 simulerade laserpulser med 0,1 normaliserad pulsenergi och 390 ps brett systemsvar i mottagaren. Figur (b) visar punktmålet sett ovanifrån.

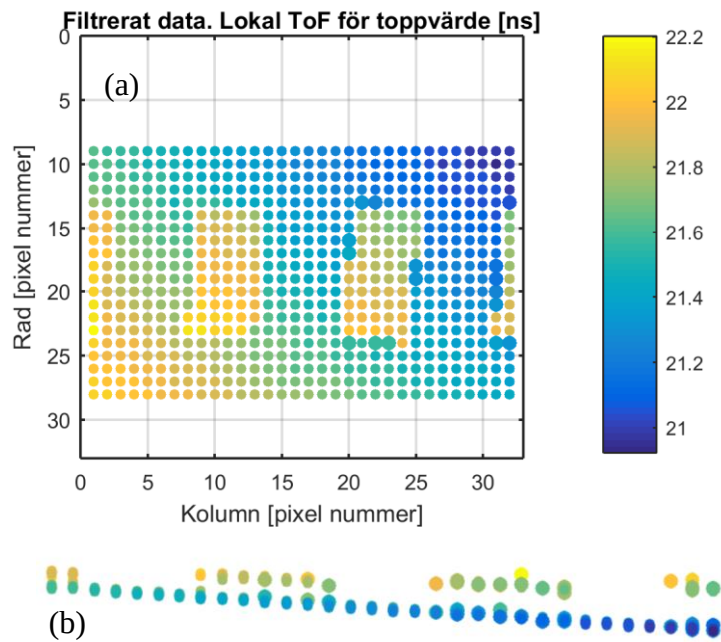
I Figur 29 - Figur 31 visas resultat från simuleringar med ändrade parametrar från grundinställningen i Figur 28. Om vi ökar antalet pulser från 200 till 1000 ser vi i Figur 29 att avståndsbestämningen blir robustare och utan falska avstånd. Dessutom ser antalet dubbeldetektioner ut att minska kring kanten på 53 mm öppningen. Detta kan bero på att bruset när histogrammet i varje pixel innehåller få detektioner gör att den effektiva upplösningen varierar från pixel till pixel (jämför t ex med illustrationen i Figur 20). Över-

och nederkanten på tavlan detekteras med fler pixlar eftersom fler fotondetektioner byggs upp som möjliggör avståndsbestämning.



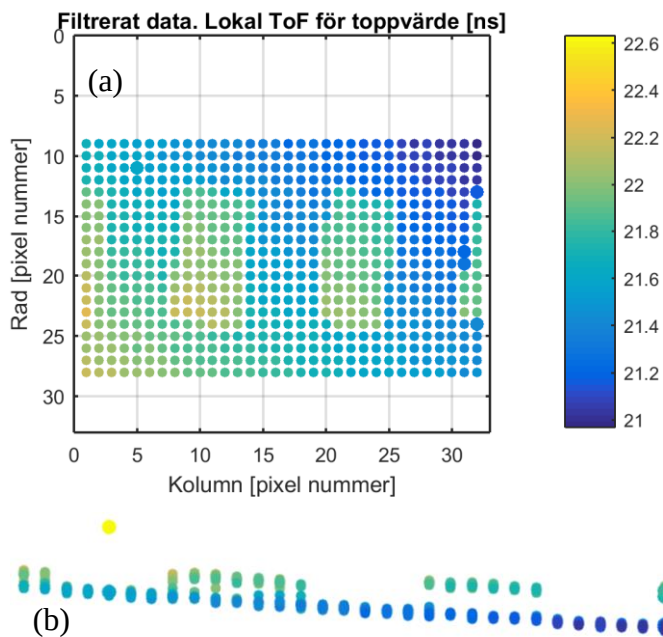
Figur 29. Punktmoln från simulering av detektioner och efterföljande filtrering och toppvärdesdetektion med en enkel algoritm. Resultatet baseras på 1000 simulerade laserpulser. Övriga parametrar är samma som för Figur 28.

I Figur 30 visas resultat då pulsenergin ökas så att detektionsfrekvensen ligger nära 100 % (motsvarande normaliserad pulsenergi 1,0 i Figur 26) samtidigt som antalet pulser minskar med en faktor 10 till 100 pulser. Den sammanlagda pulsenergin från lasern är alltså samma som för simuleringen i Figur 29. Effekten av detta visas relativt tydligt av att antalet dubbeldetektioner minskar till ca hälften kring kanten på hålet med 73 mm separationsavstånd. Detta avstånd kan den simulerade detektorn med 390 ps brett systemsvar klara av att lösa upp, men i detta fall minskar förmågan att detektera den bakre ytan eftersom pulsenergin är för hög. Detta är en effekt av att detektorn alltid triggas av den främre ytan och därför inte är aktiv när fotoner reflekterade från den bakre ytan når detektorn. Effekten att den bakre ytan försvinner vid för hög pulsenergi från lasern är alltså inte beroende av avståndet mellan ytorna utan gäller även för större separation.

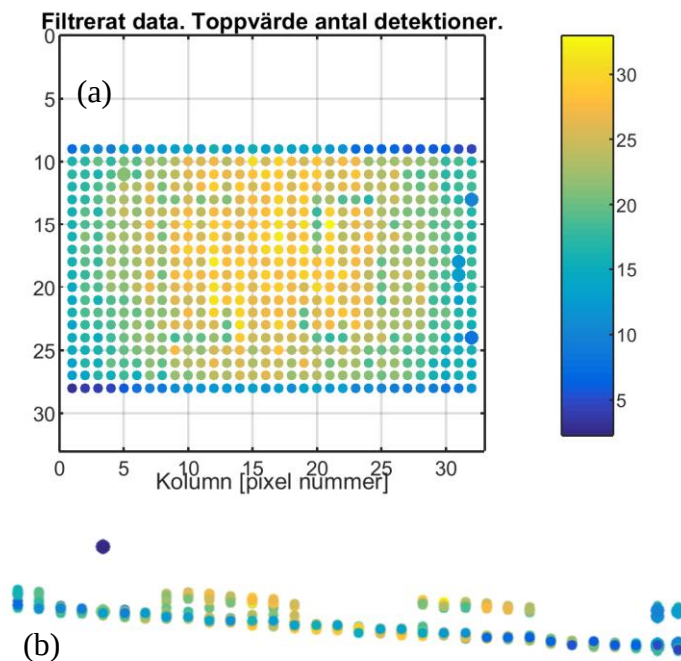


Figur 30. Punktmoln från simulering av detektioner och efterföljande filtrering och toppvärdesdetektion med en enkel algoritm. Resultatet baseras på 100 simulerade laserpulser och 1,0 normaliserad pulsenergi. Övriga parametrar är samma som för Figur 28.

I Figur 31 visas ytterligare ett simuleringsresultat med liknande parametrar som för Figur 29 med skillnaden att bredden på detektorns systemsvar ökas från 390 ps till 600 ps, vilket motsvarar 90 mm i avstånd. I detta fall försvinner förmågan helt att lösa upp avstånd på 73 mm (eller kortare) på tavelmålet. Vi noterar även en falsk dubbeldetektion i rad 11 och kolumn 5, som i figur (b) visar sig vara en falskyta bakom målet. I Figur 32 visas resultat från samma simulering som för Figur 31, men istället för ToF (Time-of-Flight) så visar färgskalan toppvärdet (höjden) på detekterade toppar i de filtrerade histogrammen. Dessa värden kan tolkas som intensitetsdata. Vi ser dels att intensiteten är svagare vid kanterna på tavlan, beroende på att enbart en del av pixlarna täcks av ytorna, och dels urskiljs stråltvärsnittet från lasern med högre intensitet i centrum av målet och avklingande åt kanterna. I detta fall har vi simulerat en lasersändare med optik som ger en stråldivergens som precis täcker måltavlan och med ett Gaussiskt stråltvärsnitt, enligt principerna för Systemkomponenter som beskrivs i kapitel 5. Det falska avståndet i Figur 32 (b) visar sig ha mycket låg intensitet (få fotondetektioner) och skulle med en något mer avancerad signalbehandling kunna tas bort utan att sanna detektioner påverkas negativt.



Figur 31. Punktmoln från simulering av detektioner och efterföljande filtrering och toppvärdesdetektion med en enkel algoritm. Resultatet baseras på 1000 simulerade laserpulser med 0,1 normaliserad pulsenergi och 600 ps brett systemsvär för mottagaren. Övriga parametrar och beskrivningar är som för Figur 28.



Figur 32. Punktmoln från simulering av detektioner och efterföljande filtrering och toppvärdesdetektion med en enkel algoritm. Simuleringsparametrarna är samma som för Figur 31 men här visar färgskalan istället antal detektioner (motsvarande "intensitet") i de toppar som detekterats i varje pixel istället för lokal ToF (motsvarande "avstånd").

7 Diskussion

Simuleringsresultat som framtagits med mjukvara och hårdvara överensstämmer väl med varandra avseende upplösningseffekter i avstånd för detektion av ytor på olika avstånd inom samma pixel. Båda simuleringsmetoderna ger kvantitativt och kvalitativt överensstämmande resultat då samma signalbehandlingsmetod tillämpas på endera mjukvaru- eller hårdvarusimulerat data. Detta indikerar att mjukvarusimulering är en möjlig framkomlig väg för att generera realistiska signaler som kan användas för att utvärdera både funktion och signalbehandling för systemkoncept som i en nära framtid är svåra att realisera experimentellt. Vi bedömer att hårdvarusimuleringarna har ett mycket stort värde för att parallellt med utvecklingen av mjukvarusimuleringarna verifiera dess fysikaliska riktighet.

De grundläggande fenomen som studerats i denna rapport har stor betydelse för hur ett dynamiskt (t ex UAV-monterat) insamlade system kan arbeta med signalerna. Vi har sett att pulsenergi, antalet pulser (eller hur lång tid, givet en viss pulsrepetitionsfrekvens) som integreras i histogram inom varje pixel har inverkan på förmågan att detektera ytor. I ett dynamiskt system måste dessa parametrar vägas mot förmågan att hålla noggrann vinkel och positionsbestämning mot scenen och hur signalbehandlingen hanterar de kvarvarande osäkerheterna i position.

Vi ser i princip fyra generaliserade användningsområden för en fotonräknande 3D-lidar (se Figur 2): Identifiering från fast position, spaning från fast position, spaning från rörlig plattform och identifiering från rörlig plattform. I mjukvarusimuleringen klarar vi än så länge bara av den första, där både sensor och mål står stilla. Hårdvarusimuleringen klarar av de två första fallen där sensorn står stilla.

Det svåraste fallet när mätsystemet riktas mot samma position samtidigt som plattformen rör sig har vi ännu inte simulerat. Det fallet har hög relevans för långgräckviddig måligenkänning av skylda mål. En plan är att göra simulering av detta genom att göra mätningar med det skannande systemet från något tiotal olika positioner. Möjligheten att göra detta under 2016 undersöks för närvarande. Vi kommer att vara begränsade till att simulera diskret (hoppande) rörelse, men med tillräckligt många positioner och om vi i signalbehandlingen inte utnyttjar att plattformen står still i varje punkt så blir det förhoppningsvis relevant för en flygande UAV som används för långgräckviddig måligenkänning.

Vid mjukvarusimulering så kräver varje ny sensorposition och sensorriktning en ny analys av scenen (ray-tracing). Om relativt enkla scener används så tar detta dock inte så lång tid. Att göra enstaka körningar där man gör en ny ray-tracing för varje laserpuls är tänkbart. Då är det möjligt att ta med plattformsrörelse inte bara som förflyttning utan även med vibrationer som gör att systemet inte pekar mot önskad punkt. Här behöver två modeller utvecklas, en för hur vi pekar relativt önskad riktning för att bestämma vad vi mäter mot, och en för hur vi tror att vi pekar relativt den verkliga riktningen för att få realistiskt brus i koordinatdata.

Vi har i arbetet med mjukvarusimuleringsmodellen identifierat några utvecklingsmöjligheter. En åtgärd som skulle kunna minska exekveringstiden för simuleringen är att slå samman systemresponsen för respektive laser och detektor som i nuvarande version görs i två separata steg. I de simuleringar som gjort för denna rapport har genereringen av fotonstatistik varit den mest tidskrävande exekveringsmässigt, varför förbättringar i dess implementering avseende snabbhet även bör studeras vidare. Utveckling av modellen för att inkludera simulerad rörelse med modellerade fel (t ex slumpmässigt pekfel) är en nödvändighet för att realistiskt simulera mätning från en rörlig plattform.

Vid plattformsrörelse tillkommer problemet med registrering av data mätt från de olika positionerna. Frågeställningen är här om man helt måste lita på mätplattformens positioneringssystem eller om det med rimliga krav på beräkningskraft går att utnyttja data för att förbättra positioneringen av synfältet vid varje tidpunkt. Om det inte går att utnyttja data för att registrera olika "bildrutor" mot varandra så kommer kraven på bestämning av

vinkel och position för sensorplattformen bli mycket höga. För en lateral upplösning på 20 cm på 3 km avstånd så får vinkelfelet inte vara större än 67 μ rad. Ju mer vi kan släppa på vinkelkraven från hårdvara desto billigare och mindre kan systemet bli.

När skillnaderna i infallsvinkel mot målet ökar eftersom sensorplattformen rör sig kan inte heller histogram konstrueras på ett lika enkelt sätt som beskrivits här. Reduceringen av bruspunkter från bakgrundsbelysning och mörkerström måste då istället ske med volymselement där data mätta från olika positioner läggs samman. För små volymer är detta relativt rättframt, men att göra det så beräkningseffektivt att det kan utnyttjas för stora dataset är en utmaning som ännu inte har undersökts.

Som sammanfattning visar simuleringen av ett fotonräknande 3D-lidarsystem på den mycket höga prestanda som kan uppnås med tekniken. Hårdvarusimuleringen med ett skannande enpixelsystem har samlat in realistiska data för utprovning av signalbehandling. Mjukvarusimuleringen ger data som stämmer väl med mätningarna och kan användas för att studera påverkan av olika systemparametrar.

8 Referenser

- [1] M. Henriksson, E. Amselem, och H. Larsson, "Lasersensorkoncept för UAV - En marknadsgenomgång av befintliga och framtida koncept," FOI-R--3904--SE (2014).
- [2] F. Villa, R. Lussana, D. Bronzi, S. Tisa, A. Tosi, F. Zappa, A. Dalla Mora, D. Contini, D. Durini, et al., "CMOS Imager With 1024 SPADs and TDCs for Single-Photon Timing and 3-D Time-of-Flight," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **20**(6) (2014).
- [3] C. Veerappan, J. Richardson, R. Walker, D. U. Li, M. W. Fishburn, Y. Maruyama, D. Stoppa, F. Borghetti, M. Gersbach, et al., "A 160x128 single-photon image sensor with on-pixel 55ps 10b time-to-digital converter," *Dig. Tech. Pap. - IEEE Int. Solid-State Circuits Conf.*, 312–313 (2011).
- [4] P. a Hiskett, K. J. Gordon, J. W. Copley, and R. A. Lamb, "Long range 3D imaging with a 32x32 Geiger mode InGaAs/InP camera," *Proc. SPIE* **9114**, M. A. Itzler and J. C. Campbell, Eds., 91140I (2014).
- [5] K. J. Gordon, P. A. Hiskett, och R. A. Lamb, "Advanced 3D imaging lidar concepts for long range sensing," *Proc. SPIE* **9114**, 91140G (2014).
- [6] M. Laurenzis, F. Christnacher, J. Klein, M. B. Hullin, and A. Velten, "Study of single photon counting for non-line-of-sight vision," *Proc. SPIE* **9492**, 94920K (2015).
- [7] T. Chevalier, "Modeling of 3D laser radar systems," FOI-R-2764--SE (2009).
- [8] E. Amselem, "Simulating a single photon APD detector array," FOI-D--0618--SE (2014).
- [9] L. Sjöqvist, M. Henriksson, P. Jonsson, and O. Steinvall, "Time-correlated single-photon counting range profiling and reflectance tomographic imaging," *Adv. Opt. Technol.* **3**(2), 187–197 (2014).
- [10] Christina Grönwall, "Ground Object Recognition using Laser Radar Data – Geometric Fitting Performance Analysis, and Applications", Linköping Studies in Science and Technology, Dissertations No. 1055, Linköping (2006).

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



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
164 90 Stockholm

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

www.foi.se