

FOI-R--0991--SE November 2003 ISSN 1650-1942

Vetenskaplig rapport

Ove Steinvall, Lena Klasén, Tomas Chevalier, Pierre Andersson, Håkan Larsson, Magnus Elmqvist, Markus Henriksson

# Grindad avbildning - fördjupad studie



TOTALFÖRSVARETS FORSKNINGSINSTITUT

Sensorteknik Box 1165 581 11 Linköping FOI-R--0991--SE November 2003 ISSN 1650-1942 Vetenskaplig rapport

Ove Steinvall, Lena Klasén, Tomas Chevalier, Pierre Andersson, Håkan Larsson, Magnus Elmqvist, Markus Henriksson

# Grindad avbildning - fördjupad studie

Utgivare	Rapportnummer, ISRN	Klassificering
Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI	FOI-R0991SE	Vetenskaplig rapport
Sensorteknik	Forskningsområde	
Box 1165	4. Spaning och ledning	
581 11 Linköping	Månad, år	Projektnummer
	November 2003	E3889
	Verksamhetsgren	
	5. Uppdragsfinansierad v	erksamhet
	Delområde	
	42 Spaningssensorer	
Författare/redaktör	Projektledare	
Ove Steinvall Markus Henriksson	Lena Klasén	
Lena Klasén	Godkänd av	
Tomas Chevalier	Lena Klasén	
Pierre Andersson		eteckning
Hakan Larsson	FIVIV	
Magnus Eimqvist	Lena Klasén	iskapligt ansvarig
Rapportens titel Grindad avbildning - fördjupad studie		
<b>Sammanfattning (högst 200 ord)</b> Detta projekt avser att fördjupa och förfina kunsl begränsningar för att värdera förmåga och taktisl avbildning. Långräckviddig måligenkännig ut til avstånd, har varit de taktiska situationer som före operatörsstöd vid måligenkänning med grindad a vidareutvecklats och använts vid fältförsök vid lå metoder för bildinsamling och bildbehandling so måligenkänning. För att värdera förmågan hos fr både för 532 nm och en ögonsäker våglängd 1,5 bakgrund, mål och atmosfär vid 1,5 μm. En disk systemtillämpningar för grindade system, utöver Denna diskussion beaktar också de viktigaste sys	kaperna om möjligheter, taktisl k användbarhet för ett framtida l 14 km samt skylda mål och n eträdesvis använts för att påvisa avbildning. För ändamålet har f ånga och korta avstånd. Detta a om kan användas för operatörss amtida system har en simulerin μm. Arbetet har också omfatta ussion om systemaspekter och operatörsstöd vid måligenkänn stemparametrarna.	ka prestanda och system för grindad nål i terräng på närmare a förmågan för försökssystemet rbete omfattar även olika töttning vid ngsmodell utvecklats, t karakterisering av flera olika ning, återfinns även.
Nyckelord Grindad avbildning, laserradar, långa avstånd, tillämp	ningsområden	

Övriga bibliografiska uppgifter

 ISSN 1650-1942
 Antal sidor: 121 s.

 Distribution enligt missiv
 Pris: Enligt prislista

Språk Svenska

Issuing organization		Report number, ISRN	Report type
FOI – Swedish Defence Res	search Agency	FOI-R0991SE	Scientific report
Sensor Technology		Programme Areas	
P.O. Box 1165		4. C4ISR	
SE-581 11 Linköping		Month year	Project no.
		November 2003	E3889
		General Research Area	S
		5. Commissioned Resear	rch
		Subcategories	
		42 Surveillance Sensors	
Author/s (editor/s)		Project manager	
Ove Steinvall N	larkus Henriksson	Lena Klasén	
Lena Klasén		Approved by	
Tomas Chevalier		Lena Klasén	
Pierre Andersson		Sponsoring agency	
Håkan Larsson		FMV	
Magnus Elmqvist		Scientifically and techn	ically responsible
Depart title (In translation)		Lena Klasen	
Report title (in translation)	) ch (		
Galed Viewing - deepened stu	uy		
Abstract (not more than 2)	)0 worde)		
This project sime to give on	in danth knowledge on	the possibilities testical pa	aformono and limitations
to evaluate the potential and	usability for a future ga	the possibilities, tactical pe	project long range
imaging out to 14 km and o	usability for a future ga	ange are addressed. These l	project, long range
situations that are used to sh	ow the potential for one	ange are autressed. These i rator assisted target identifi	cation by gated viewing
The experimental system ha	ve been ungraded for th	e purpose and used during	field compaigns that have
been conducted at both shore	t and long ranges. The y	vork also includes methods	for illuminating the target
and signal and image proce	and long langes. The v	vork also includes includes	lor munimating the target
developed within this work	to avaluate the perform	ator in the identification tas	ating at both 532 nm and
an execute wavelength 1.5	m The work also inclu	des target and background	characterisation at 1.5
um A discussion on system	aspects and system apr	lications besides operator	orgisted target recognition
ends this report. This discuss	sion includes the most i	mortant system parameter	
	non morados die most n	inportant system parameter	
Keywords			

Gated viewing, laser radar, long range, application areas

Further bibliographic information	Language Swedish
<b>ISSN</b> 1650-1942	<b>Pages</b> 121 p.
	Price acc. to pricelist

1 Inledning	6
2 Experimentell utrustning	6
2.1 Kameror	6
2.2 Laser	7
2.3 Turbulensmätning	8
2.3.1 Scintillometrar BLS900 och BLS2000	8
2.3.2 Kort om mätprincipen för scintillometern	9
2.4 Väderstation	10
2.4.1 GroWeather	10
2.4.2 Vaisala	10
2.5 Tredimensionell (3-D) laserradar	11
2.5.1 Principen för laserradarmätningar	11
2.5.2 Laserskanner Optech ILRIS-3-D	11
2.5.3 Mätförfarande ILRIS-3-D	13
2.5.4 Mätningar	13
3 Genomförda mätningar	15
3.1 Kvarn v18 2002	15
3.2 Alvdalen v41 2002	17
3.3 Kvarn v8 2003	19
3.4 Kvarn v25 2003	20
3.5 Kvarn v34-36 2003	22
4 Mätsystemet för grindad avbildning	24
4.1 System vid mätningarna i Alvdalen v41 2002	24
4.2 System vid mätningarna i Kvarn v8 2003	24
4.3 System vid mätningarna i Kvarn v25 2003	
5 Underliggande teori	
5.1 Teoretisk bakgrund för modellering av GV-system	
5.1.1 Atmosfärsdämpning	
5.1.2 Upplösning beskriven av MTF	
5.1.3 Aerosol MIF	
5.1.4 Speckle och turbulens	
5.2 Integration av speckleinfluerade bilder	
5.2.1 Fundamenta via konerent avbilaning	
5.2.2 SINK via sammaniagring av bilder, speckle och poissonbrus	·
5.2.5 Simulering av sammanlagda bilder	
5.5 Bakgrundstenekuon	
5.4 Malfellektion 1,5 µm (totalfellektion)	
5.5 Nagot om mangenkamning i laseronder vs. Johnson s kriterier	
5.5.1 IR-kamera och GV system 1,5 μm	
5.5.2 Generell blickvallelsekvallon	
6 1 Program för grindstyrning	
6.2 Metoder för hildförbättring	
6.3 Bildsegmentering	
6.4 Avetåndeunnlöet (3-D) avhildning	02 65
6.5 Ökade möjligheter till måligenkänning genom 3-D avhildning	03 67
7 Karakterisering av hakgrund mål och atmosfär vid 1 5 um	
7 1 Bakarundsmätningar vid 1 1 7 μm	<b></b> د0
7.1 Dangiuliusiliauliligai viu 1-1,7 μlli	09 60
7.1.1 Manungar med II RIS kameran	09 72

7.2 Målmätningar	80
7.2.1 Sammanfattning målmätningar	85
8 Modellering av GV-system	85
8.1 Implementering och beskrivning av datamodeller	85
8.1.1 Genomförande av beräkningar	
8.1.2 Degradering av bild	
8.1.3 Generering av bild från 3D-miljö	
8.1.4 Giltighetsområde och osäkerheter	
8.2 Verifiering av systemmodell samt ytterligare simuleringar	89
8.2.1 Bild genererad från 3-D-miljö för validering	
8.2.2 Degenerering av befintliga bilder (med grön laser) för validering	<i>390</i>
8.2.3 Degenerering av befintliga bilder (simulerad 1550nm-bild)	91
9 Systemaspekter	92
9.1 Teknikläget kameror för grindad avbildning vid 1,5 μm	93
9.2 Fall A/ Luftvärn—måldetektion, målföljning	95
9.2.1 Användningssätt	95
9.2.2 Samverkan med andra system/sensorer, flerfunktion	97
9.2.3 Röjningsrisk, belysningstider	
9.2.4 Användning av flera laservåglängder	
9.2.5 NBF-synpunkter	
9.2.6 Grundläggande systemparametrar och prestanda	
9.2.7 Tekniknivå idag och i framtiden	
9.3 Fall B/ Spaning, målinmätning från fpl/hkp eller UAV	101
9.3.1 Användningssätt	
9.3.2 Röjningsrisk, belysningstider	
9.3.3 Grundlaggande systemparametrar	
9.3.4 $Ieknikniva idag och i framtiden$	100
9.4 Fall C/ Användning i Ipl/UAV mot andra luttmal	10/
9.5 Fail D/ Användning I suidstoldon/UGV	107
9.5.1 Anvananingssait	107
9.5.2 Se in i lettungen 0.5.3 Röiningsrisk halvsningstider	107
9.5.5 Kojningsrisk, berysningsituer 0.5.4 Takniknivå idag och i framtidan	111
9.6 Fall F/ Handhållen korthållskikare	111
9.6 1 Användingssätt	111
9.7 Fall F/ Fartyosanvändning	117
10 Diskussion	
10.1 Val av våglängd samt mål- och bakgrundsdata	
10.1.1 Hög-låg prf-bildintegration	
10.2 Teoretisk simuleringsmodell	
10.3 Processering av GV bilder	
10.4 Systemtillämpningar	
10.5 Förslag till fortsatt inriktning	
11 REFERENSER	117

# 1 Inledning

Detta projekt avser att fördjupa och förfina kunskaperna om möjligheter, taktiska prestanda och begränsningar för att värdera förmåga och taktisk användbarhet för ett framtida system för grindad avbildning. Långräckviddig måligenkännig på avstånd upp till 14 km samt skylda mål och mål i terräng på närmare avstånd har varit de taktiska situationer som företrädesvis använts som scenario för utvecklingen av försökssystemet. Arbetet har omfattat delmomenten:

- Utveckling av försökssystemet för grindad avbildning.
- Experimentell verksamhet, omfattande fältförsök vid långa och korta avstånd samt analys av mätdata.
- Modellutveckling samt kontroll av systemmodellen.
- Karakterisering av bakgrund, mål och atmosfär vid ögonsäker våglängd, 1,5 μm.
- Analys av mätningar och algoritmutveckling mot vad som kan implementeras i ett framtida system. Detta omfattar även bildbehandlingsmetoder från tidigare studier<sup>1</sup>, och inom närliggande verksamhet som beaktas för att värdera framtida system.
- Systemaspekter och möjliga applikationer för grindade system.

# 2 Experimentell utrustning

### 2.1 Kameror

Vid försöken har två olika kameror använts, en grindbar kamera Xybion ISG-750, se Figur 1 och Tabell 1, och en Sensors Unlimited InGaAs-kamera SU-320, se Figur 2 och Tabell 2.



Figur 1. GV-system 532 nm. Laser Continuum EPO-5000, kamera Xybion ISG-750.

Tabell 1. Xybion ISG-750.

#### Xybion ISG-750

GenIII bildförstärkare känslig i våglängdsområdet 400-900 nm

Spatiell upplösning, 30 lp/mm horisontellt, 23 lp/mm vertikalt

Temporal upplösning, gatelucka från 40 ns

Format utsignal, analog video CCIR



Figur 2. InGaAs-kamera SU-320 från Sensors Unlimited Inc.

Tabell 2. Sensors Unlimited SU-320.

Sensors Unlimited SU-320

InGaAs-sensor känslig i våglängdsområdet 900-1700 nm

Spatiell upplösning, pixel pitch 40 µm, 320x240 pixlar

Format utsignal, analog video 50 Hz CCIRni, och 12 bit digital

InGaAs-kameran gör en progressiv skanning av bilden. Vid början av integreringen blir översta linjen aktiv, efter 64  $\mu$ s blir nästa linje aktiv och efterföljande linjer blir aktiva i tur och ordning. Efter integrationstiden, 128  $\mu$ s-16.4 ms, blir första linjen inaktiv och därefter andra linjen och så vidare. Följden blir en exponering som rullar över bilden, exponeringstiderna medför att 2-256 linjer är aktiva samtidigt.

Den analoga signalen från sensorn digitaliseras med en 12 bitars AD-omvandlare och både analog videoutgång och digitalt 12 bit RS422 utgång finns.

### 2.2 Laser

Vid försöken har två lasersändare av typen frekvensdubblad Nd:YAG används i kombination med Xybion-kameran. Den ena är en 10 Hz prf laser, Figur 1, med hög energi per puls och den andra är en <5 kHz prf laser med lägre energi, båda ger grönt ljus med 532 nm våglängd.

Ytterligare en laser, en Nd:YAG med OPO och våglängd 1,5 µm, har använts i kombination med InGaAs-kameran, se Tabell 4.

Tabell 3. Laser 532 nm.

#### Laser 532 nm

Quantel Brilliant, 532 nm dubblad Nd:YAG, prf 10 Hz, 4 ns pulslängd, 63 mJ per puls Continuum EPO-5000, 532 nm dubblad Nd:YAG, prf 5 kHz, 3 ns pulslängd, 70 µJ per puls

Tabell 4. Laser 1,5 µm.

#### Laser 1,5 µm

Quantel Ultra, 1,5 µm Nd:YAG OPO, prf 20 Hz, 4 ns pulslängd, 6 mJ per puls

### 2.3 Turbulensmätning

#### 2.3.1 Scintillometrar BLS900 och BLS2000

Turbulensdata registrerades med en scintillometer. I Älvdalen användes modellen BLS900 och i Kvarn modellen BLS2000, båda tillverkade av Scintec AG. BLS900 har mätområdet 500 m – 5000 m medan BLS2000 kan användas på avstånd upp till 10 km. Den består av en optisk sändare och en optisk mottagare samt signalprocessningsenhet och mjukvara. Sändaren för BLS900 består i sin tur av två enheter, vardera med 450 ljusdioder i när-IR (880 nm) och 18 röda i det visuella området, se Figur 3.



Figur 3. Scintillometer BLS900. Vänstra bilden visar sändarenheten; den högra figuren visar mottagaren.

De röda ljusdioderna fungerar som funktionsindikatorer och visar pulsfrekvensen. Ljusdioderna kan arbeta i fyra olika pulsmoder, 1 Hz, 5 Hz, 25 Hz och 125 Hz. 125 Hz pulsmod ger maximal noggrannhet och medger också beräkning av värden på den tvärgående vindhastigheten. Mottagaren har två detektorer (kiselfotodioder), där den ena detektorn används vid inriktning av mottagaren. Mottagarens optik har en fokallängd = 450 mm och en FOV = 8 mrad, vilket medför att inriktningen av mottagaren är ett kritiskt moment. Inriktning görs med stöd av tre signalvärden betecknade X, Y och Z. X och Y är signalintensiteten från respektive sändarenhet efter demodulering och Z är signalintensiteten före demodulering (sändarens två enheter frekvensmoduleras med 500 Hz respektive 1500 Hz). BLS2000 fungerar på samma sätt men har fler lysdioder i sändaren och större mottagaroptik. Efter signalprocessning av insamlade data presenterar mjukvaran 1 gång/min värden på bl.a. brytningsindex strukturparameter  $C_n^2 [m^{-2/3}]$ , Frieds parameter  $r_0 [m]$ , det, för kanalerna X och Y, medelvärdesbildade scintillationsindex  $\beta$  [-] samt vindhastigheten [m].  $C_n^2$  kallas också turbulenskonstant eller turbulensstyrka.  $r_0$  betecknar den aperturdiameter som begränsar upplösningen till följd av turbulens.  $C_n^2$  ger tillsammans med  $r_0$  information om de optiska effekterna av atmosfärsturbulens.

#### 2.3.2 Kort om mätprincipen för scintillometern

Scintillometern tar fram  $C_n^2$  genom en direkt mätning av signalfluktuationerna. Principen är att medelvärdesbilda irradianserna  $I_1$  och  $I_2$  samt beräkna varianserna  $\sigma_{I1}$  och  $\sigma_{22}$  för signalerna från sändarens två enheter. Resultaten omvandlas sedan till logamplitudvarianser enligt ekvation (2.1) och (2.2)

$$B_{11} = \frac{1}{4} \log \left[ 1 + \frac{\sigma_{11}}{\langle I_1 \rangle^2} \right]$$
(2.1)

$$B_{22} = \frac{1}{4} \log \left[ 1 + \frac{\sigma_{22}}{\langle I_2 \rangle^2} \right]$$
(2.2)

Värden på  $C_n^2$  erhålls sedan genom ekvation (2.3)

$$C_n^2 = \alpha_r B_{11} D_t^{7/3} L^{-3} = \alpha_r B_{22} D_t^{7/3} L^{-3}$$
(2.3)

och  $r_0$  genom (2.4)

$$r_0 = \left[0,423(\frac{2\pi}{\lambda})^2 LC_n^2\right]^{\frac{3}{5}}$$
(2.4)

där faktorn  $\alpha_r$  beror av förhållandet mellan sändarens och mottagarens apertur (= 4,2 för BLS900),  $D_t$  [m] är diametern på sändarens enheter,  $\lambda$  är våglängden [m] och L är vägsträckan [m]. Ovan ((2.1) – (2.4)) gäller för ett förhållande med svag turbulens som kännetecknas av att intensitetsvariansen ( $B_{11}$ ,  $B_{22}$ ) är proportionell mot turbulensstyrkan  $C_n^2$ . Situationen blir mer komplicerad vid en (svag) turbulensnivå där hänsyn även måste tas till absorptionsfluktuationerna som annars kan förväxlas med turbulens. Likaså kompliceras situationen vid förhållanden med stark turbulens, då proportionalitet inte längre råder mellan intensitetsvarians och turbulensstyrka och mättningseffekter inträder. Teorin för dessa fall finns beskriven i manual<sup>2</sup>. BLS scintillometrarna använder en numerisk look-up-tabell för att korrigera resultaten för mättningseffekter. I look-up-tabellen finns även definierat ett max-värde för logamplitudvariansen, över vilken  $C_n^2$  inte går att definiera. Större värden än detta maxvärde resulterar i felmeddelanden.

Scintillationsindex,  $\beta$ , är stråltvärsnittets varians som beräknas enligt

$$\beta = \frac{\langle (I - \bar{I})^2 \rangle}{\bar{I}^2} = \frac{\langle I^2 \rangle}{\langle I \rangle^2} - 1$$
(2.5)

## 2.4 Väderstation

### 2.4.1 GroWeather

Insamling av väderdata har i samband med försöken gjorts med en väderstation, GroWeather, som registrerar temperatur [°C], lufttryck [hPa], vindhastighet [m/s], vindriktning [°], solinstrålning [W/m<sup>2</sup>] och luftfuktighet [%] samt en siktmätare, Vaisala FD 12, som lagrar medelvärden av sikten över 1 respektive 10 min [m]. Sensorernas mätområden, upplösning och noggrannhet framgår av Tabell 5.

Sensor	Mätområde	Upplösning	Noggrannhet, ±
Temperatur/ °C	-45 - 60	0,1	0,5 °C
Lufttryck/ hPa	880 - 1080	0,1	1,7 hPa
Vindhastighet/ (m/s)	0,9 - 78	0,1	5 %
Solinstrålning/ (W/m <sup>2</sup> )	0 - 1500	1	5 %
Luftfuktighet/ %	0 - 100	1	3 %
Vindriktning/ °	0-360	1	7 °
Nederbörd/ mm	0 – 9999	0,2	4 %
Sikt/ m	10 - 50000	1	10 % (10 – 10000 m)
			20%(10000-50000)

Tabell 5. Vädersensorer GroWeather – mätområde, upplösning, noggrannhet.

### 2.4.2 Vaisala

Vid ett försök användes istället en väderstation av märket Vaisala, som registrerar temperatur [°C], lufttryck [hPa], vindhastighet [m/s], vindriktning [°], solinstrålning och markstrålning med pyrgeometer och albedometer [W/m<sup>2</sup>] och luftfuktighet [%] samt sikt [m]. Sensorernas mätområden, upplösning och noggrannhet framgår av Tabell 6.

Sensor	Mätområde	Upplösning	Noggrannhet +
Sensor	1. Tutonn uut	opprosimig	105grunniet, ±
Temperatur/ °C	-40 - 60	0,1	0,5 °C
$I = \frac{1}{1} / \frac{1}{1} D_{-}$	(00.1100	0.01	0 10 LD-
Luttryck/ hPa	600-1100	0,01	0,10 hPa
Vindhastighet/ (m/s)	0,4 - 75	0,1	0.17 m/s
Strålning/ $(W/m^2)$	-	$10.59 \text{ V/(W/m^2)}$	_
Straining/ (W/III)		10.37 V/(W/III	
Luftfuktighet/ %	0.8 - 100	0,1	2% (0-90%), 3 % (90-
e	,	,	1009/)
			10070)
Vindriktning/ °	0 - 360	2,8	3 °
Nederbörd/mm/h	-	0.05	-
Sikt/m	10 - 50000	1	10%(10-10000  m)
	10 50000	1	
			20 % (10000 – 50000)

Tabell 6. Vädersensorer Vaisala – mätområde, upplösning, noggrannhet.

## 2.5 Tredimensionell (3-D) laserradar

### 2.5.1 Principen för laserradarmätningar

Med en avbildande skannande laserradar kan X-, Y-, och Z-koordinater (3-D) samt intensitet registreras i varje mätpunkt. En bild består typiskt av flera hundratusen punkter. Flera bilder används för att kunna sätta ihop geometriska modeller. Dessa modeller används bland annat i arbetet med simuleringar. Eftersom ett intensitetsvärde samlas in för varje punkt går det också att beräkna ett objekts lasermålarea utifrån inskannade data. Våglängden på den skanner som användes i Kvarn, Optech ILRIS-3-D, är intressant eftersom våglängden 1,5 µm är en ögonsäker våglängd.

### 2.5.2 Laserskanner Optech ILRIS-3-D

Laserskannern Optech ILRIS-3-D, se Figur 4, är ett integrerat, laserbaserat sensorsystem för kommersiell mätning, med inbyggd digitalkamera och mjukvaruverktyg. Skannern finns även beskriven en tidigare rapport<sup>3</sup>. Instrumentet tar emot operatörens kommandon via en Palm pilot, skannar av scenen, samlar in data och lagrar uppmätta punkter innehållande position i X-, Y- och Z-koordinater samt intensitet på ett flashkort.



Figur 4. Laserskanner Optech ILRIS-3-D.

För att beräkna avståndet till mätobjektet, mäts tiden från det att en laserpuls sänds ut till dess att den kommer tillbaka ("time of flight"). Det finns möjlighet att välja om första eller sista eko skall sparas, skillnaden åskådliggörs i Figur 5. Tiden mäts med en högprecisionsräknare, och räknas sedan om till ett avstånd med hjälp av en mikroprocessor. Den smala laserstrålen visar små detaljer (ner till en centimeter) på avstånd upp till 800 meter om reflektionsfaktorn är minst 4 % på 350 meters avstånd samt 20 % på 800 meter. Strålen kan reflekteras mot en diffus yta med vilken vinkel som helst och återvända till ILRIS-3-D för att producera en avståndsmätning. Skannern är verksam både i mörker och i dagsljus. På vilket avstånd skannern klarar av att mäta beror på reflektansen på den yta som laserstrålen träffar. På grund av att militära objekt har en ganska låg reflektans (ibland någon enstaka procent) är signaturmätning lämpligast att utföra på mellan 30-50 meters avstånd.



Figur 5. Det är möjligt att mäta antingen första ekot (trädgrenarna) eller sista ekot (marken).

Prestanda				
Maximalt avstånd	350 m (4 % reflektans)			
	800 m (20 % reflektans)			
Mätnoggrannhet	X-Y vid 50 m ±7 mm			
	X-Y vid 100 m ±10 mm			
	Z vid 50 m $\pm$ 10 mm			
	Z vid 100 m ±10 mm			
Mätupplösning	Laserns punktstorlek vid 50 m 15 mm, 100 m 20 mm			
	Avstånd mellan punkter vid 50 m<10 mm, 100m<20mm			
Mäthastighet	2000 punkter per sekund			
Laservåglängd	1,5 μm (NIR)			
Stråldivergens	0,2 mrad			
Skannområde (Field of view)	40° (±20°)			
Ögonsäkerhet	Klass 1 för den skannande strålen, ögonsäker			
Operatörens gränssnitt				
Integrerad kamera	640x480 pixlar, färg			
Visningsfönster	17cm VGA			
Kontrollgränssnitt	Handhållen Palm dator			
Fysiska data				
Mått (LxBxH)	300x300x200 mm			
Vikt	approx. 11,4 kg			
Spänningsmatning	24 V DC batteri eller AC omvandlare			
Effekt	75 W nominellt			
 Miljödata				
Operativ temperatur	0°C till +40°C			
Lagringstemperatur	-20°C till +50°C			
Väderskydd	NEMA 4X, vatten- och dammskyddad			

Tabell 7. Tekniska data för Optech ILRIS-3-D

#### 2.5.3 Mätförfarande ILRIS-3-D

Skannern ger data för både avstånd och intensitet i reflekterad stråle, ett punktmoln med X-, Y- och Z-koordinater och intensitet skapas. Data för hela skanningen sparas, tillsammans med andra loggdata, i en binärfil på flashkort. Vidare är skannern utrustad med en digital kamera vars bild också sparas till flashkort. Bilden uppdateras kontinuerligt på skannerns baksida, se Figur 6.



Figur 6. Digitalt foto av hel scen med exempel på skannerområde. Objektet är en pbv 401 (MTLB) på Kvarns skjutfält.

Vid mätning med Optech ILRIS-3-D erhålls en binärfil (I3-D) från varje skannad vy. Dessa filer kan omvandlas i Optechs s.k. "Parserprogram" till en standardiserad textfil (X-, Y-, Z-koordinat samt intensitet) för varje vy (RAW), en bitmap vilken är en bild av scenen tagen med ILRIS-3-D's digitalkamera, samt en loggfil en textfil innehållande bildinformation (avstånd, bredd mellan laserskotten på ett givet avstånd, antalet punkter i höjd och sida etc.) Parserprogrammet kan leverera en rad olika format beroende på vilken tillämpning data ska användas till.

### 2.5.4 Mätningar

I samband med GV-mätningar har T72 och pbv 401 (MTLB) använts som mål. T72 och pbv 401 har mätts med Optech ILRIS-3-D i aspektvinklar såväl ovanifrån, underifrån samt sidan. Modellerna har mätts upp för att kunna göra vidare simuleringar. Figur 7 visar en pbv 401 och Figur 8 visar en T72.



Figur 7. 3-D modell av pbv 401 från ILRIS-data.



Figur 8. 3-D modell av T72 från ILRIS-data.

Modellerna byggs upp som polygonmodeller i form av trianglar. Figur 9 visar hur en typisk triangulering kan se ut.



Figur 9. 3-D modellen av pbv 401 med triangulerad ytstruktur.

Modellerna blir stora, både med avseende på polygonantal och minnesutrymme. Komprimering av modeller görs för att få dem mer användbara för simulering. Figur 10 visar T72 komprimerad från ca 380000 polygoner till 50000. Denna modell har sedan använts vid GV-simuleringar.



Figur 10. Komprimerad 3-D modell av T72.

Modeller utvecklas i programpaketet Polyworks, en utförligare beskrivning av programmet finns presenterad i Svensson et al.<sup>3</sup>.

Optech ILRIS-3-D har använts för att mäta bakgrunder, reflektion, för 1,5 μm (lövskog, barrskog). Detta finns beskrivet senare i denna rapport under avsnitt 3 och 7. Reflektion, lasermålarea, skalade intensitetsbilder etc. beräknas i ett av FOI egenutvecklat Labview program kallat ScanView. En utförligare beskrivning av programmet finns tidigare presenterad i Svensson et al.<sup>3</sup>.

## 3 Genomförda mätningar

Avsikten med de genomförda fälkampanjerna är att testa och värdera försökssystemet för grindade system samt att registrera bilder av mål på långa avstånd upp till 14 km samt skylda mål och mål i terräng. Insamlade data har utgjort underlag för systemanalys av ett system som är verksamt vid 1,5 µm. Fem kampanjer har genomförts enligt nedan:

- Kvarn v18, 2002, se provprogram<sup>4</sup>
- Älvdalen v41 2002, se provprogram<sup>5</sup>
- Kvarn v8, 2003, se provprogram<sup>6</sup>
- Kvarn v25, 2003, se provprogram<sup>7</sup>
- Kvarn v34-36, 2003

Dessa mätkampanjer har genomförts i samverkan med projektet Optroniska Sensorsystem vars målsättning med provverksamheten är att demonstrera ett koncept för informationsinsamling med passiva och aktiva sensorer efter upptäckt av misstänkt mål.

## 3.1 Kvarn v18 2002

Fältförsöken i Bondeby, Prästtomta skjutfält (Kvarn) 2-3 maj 2002 genomfördes i samverkan med projektet Optroniska Sensorsystem och denna mätkampanj har rapporterats separat<sup>3</sup>. Vid mätningarna användes laser Continuum EPO-5000, 532 nm dubblad YAG, PRF 2 kHz och 6 mrad divergens tillsammans med mottagare Xybion-kamera ISG 750 grindbar med optik Celestron G8 Schmidt-Cassegrain teleskop, fokallängd ca 2 m och apertur 8". Avståndsbilder lagrades med PC med videoediteringskort dpsReality och AV-hårddiskar. Som mål användes mättavla "Kvarn tavlan" och fordon T72, se Figur 11-Figur 12, som registrerades på 150 m,

650 m och 1900 m, se Figur 18, under olika aspektvinklar, ljusförhållanden (dag, kväll, natt) och under varierade driftförhållanden (motor kall/varm/igång). Utöver GV-systemet registrerades bilder med bl.a. en QWIP-kamera för att motsvara ett system för invisning av GV sensorn mot ett detekterat mål, se Figur 13.



Figur 11. Visuell bild av målområdet på 1905 m avstånd 2002-05-03, ca kl.13.11, sett från den gemensamma uppställningsplatsen för sensorerna. Sikt och solinstrålning varierade och bilden visar siktförhållanden efter att det hade börjat regna vid lunchtid.



Figur 12. En bild av T72an på nära avstånd samt registrering med GV-systemet på avstånd 1905 meter med grindluckan på respektive bakom fordonet.



Figur 13. 2002-05-03 ca 13.10. Registrering med QWIP-kamera i regnväder. Markeringen visar T72:s position i bilden.

# 3.2 Älvdalen v41 2002

Syftet med mätkampanjen på Älvdalens skjutfält var att registrera bilder på långa avstånd samt bilder som underlag för analys av prestanda för ett system verksamt vid våglängden 1,5 µm. Vid försöken användes systemet med kameran Xybion ISG-750 och Quantel Brilliant lasern verksamt vid 532 nm. En InGaAs-kamera från Sensors Unlimited lånades in för samregistreringar av bilder vid 1,5 µm och 532 nm då leverans av den beställda kameran försenats.Dessvärre fungerade inte kameran under fältmässiga förhållanden, med bland annat elstörningar från lasrarna, och jämförande registreringarna mellan 532 nm och 1,5 µm kunde inte genomföras.

Som referens till modellarbetet registrerades  $C_n^2$  av en scintillometer BLS900 från Scintec. Väderdata och siktsträcka loggades med väderstation under hela försöken.



Figur 14. Karta över mätområdet, Älvdalens skjutfält.

Mätplatsen var belägen på Karlgravsåsen, Figur 14, position N6812472 E1393991, med mål på avstånd 7-14 km. Målen bestod av en terränglastbil 30 och en upplösningstavla och olika mätprocedurer testades med Xybion-systemet vid 532 nm:

- Pålysbilder, grindluckan mitt på målet
- Silhuettbilder, grindluckan bakom målet
- Stegningar genom målet med grindluckan.

Pålysbilder och silhuettbilder illustreras i Figur 15-Figur 17. Resultatet av mätningarna blev bland annat att idéer om framtida mätsystem framkom, se avsnitt 4.

Passiva mätningar genomfördes under dagtid och aktiva mätningar under skymning och mörker. Vädret varierade från klart till lätt snöfall. Ett problem med att ha 14 km mellan mätplats och målplats är att vädret kan skifta flera gånger längs sträckan, det visade sig att det kan vara lokala snöfall som helt blockerar sikten fast siktmätaren säger klar sikt och vice versa. Detta påvisar också behovet av att kunna ,äta upp siktförhållande på sträckan för att bedöma systemprestanda vid snö, dimma etc.



Figur 15. Exempelbild: Tgb 30 avstånd 10 km.



Figur 16. Exempel obehandlade bilder: Tgb30 avstånd 14 km. Vänster: pålysbild, höger: silhuettbild.



Figur 17. Exempel obehandlade bilder: Tgb 30 avstånd 7 km. Vänster: pålysbild, höger: silhuettbild.

## 3.3 Kvarn v8 2003

Vid fältförsöken i Bondeby, Prästtomta skjutfält (Kvarn) 17-19 februari 2003 användes vid samtliga mätningar Xybion ISG-750 kamera och Questar f = 1,4mteleskop. Försökssystemet användes i två konfigurationer, med Quantel Brilliant 10Hz respektive Continuum EPO5000 1Hz - 2kHz lasrar, båda verksamma vid våglängden 532 nm. Vid försöken användes för första gången LabViewgränssnittet för styrning och datainsamling. InGaAs-kameran användes ej, då den inte levererats.

Mätningarna utfördes under skymning och mörker. Under mätperioderna var vädret klart med enstaka lätta dimmoln och temperaturer mellan ca -12°C och -3°C. Meteorologiska data registrerades under mätningarna med väderstation GroWeather och scintillometer BLS2000.



Figur 18. Karta över mätområdet.

Mätningar gjordes mot två målområden på ca 1,9 km respektive 650 m avstånd, markerade i Figur 18. Som mål på det längre avståndet användes terrängbil 30, 13 och 11 i varierande aspektvinklar. Olika sekvensgenereringsprogram användes, bl.a. pålys- och silhuettbilder med långa grindtider (0,5 µs) samt stegning över målen med kortare grindtider. Mätningar gjordes även med terrängbil 11 under maskeringsnät samt terrängbil 30 dold i skog. På det kortare mätavståndet testades olika pulsrepetitionsfrekvenser med EPO5000–lasern mot upplösningstavla samt en betongvägg på skjutfältet. Visuella översiktsbilder i gråskala av målområdet togs upp med CCD-kamera.



Figur 19. Exempel på bilder från mätningarna vecka 8 2003. Till vänster: Terrängbil 30 på ett avstånd av 1,9 km. Reflexen till vänster i bilden kommer från scintillometerns sändarenhet. Till höger: Silhuettbild av terrängbil 11 under kamouflagenät, även denna från 1,9 km.

## 3.4 Kvarn v25 2003

Mätningar genomfördes under två dagar (2003-06-16--2003-06-17) med olika systemkonfigurationer. Mätplatsen var Eveborg på Prästtomta skjutfält. En serie mätningar gjordes med Quantel Brilliant-lasern och Xybionkameran mot flera MTLB dolda i skog. Mätningar gjordes även mot T72 i öppen terräng för att visa på ett systemkoncept där invisning med IR-kamera, ThermaCam2000, simulerades. En annan serie mätningar gjordes mot en referenstavla med EPO5000 lasern och Xybionkameran för att studera effekter av integration av laserpulser i CCD-sensorn. Även med detta system togs bilder mot mål (T72) i öppen terräng. Slutligen togs bilder med Quantel Ultra lasern och InGaAs-kameran på referenstavlor och natur för att samla data om hur ett 1,5 µm system för grindad avbildning skulle uppföra sig. Som stödmaterial och dokumentation togs passiva bilder med InGaAs-kameran (0,9-1,7 µm) och ThermaCam2000 (7,5-13 µm). Dessutom lagrades data om atmosfären med en scintillometer (Scintec BLS2000) och en väderstation (Vaisala). Mätavstånden var 800-900 m mot fordonen, 350 m mot referenstavlan och ca 50 m för de övriga mätningarna med 1,5 µm systemet. Under hela försöken hade vi klart väder utan nederbörd och med god sikt. Temperaturen varierade under mätperioderna mellan 7 °C och 19 °C.



Figur 20. T72 i öppen terräng med brilliantlasern (vänster) och EPO5000 lasern (höger).



Figur 21. Passiva bilder, ThermaCam2000 (vänster) och InGaAs i dagsljus (höger).



Figur 22. Pbv 401 i skogsbryn med lång grindlucka (vänster) och kort grindlucka (höger). Registrerad med Xybion-systemet.



Figur 23. Bilder med 1,5 µm laser och InGaAs-kamera av frigolittavla (vänster) och gräs (höger).



Figur 24. Upplösningstavlan med EPO5000-lasern och Xybionkameran (vänster) samt med Ultralasern och InGaAs-kameran (höger).

### 3.5 Kvarn v34-36 2003

Vid tre olika tillfällen under v34-v36 2003 genomfördes mätningar med Optech ILRIS laserskanner på Prästtomta skjutfält. Huvudsyftena med dessa mätningar var att

- karaktärisera bakgrunder inför fortsatta mätningar vid 1550 nm.
- geometriskt mäta in i huvudsak två förändrade skogsfasader.
- ge underlag till metoder att analysera skogsfasaders täckningsgrad mm.

För att smidigare kunna undersöka insamlade data i de två första punkterna togs ett användargränssnitt fram enligt Figur 25. I dess nedre högra hörn kan man se genomträngningsgraden i ett exempel på skogsdata. I förgrunden på 20-30 meters avstånd har vi en kulle och vid 100-110 meter har vi skogsfasaden, som ändå släpper igenom en hel del ljus upp till 145 meter. Det undersökta exemplet visas i Figur 26.

FOI-R--0991--SE



Figur 25. Användargränssnittet för undersökning och analys av skogsfasaddata.



Figur 26. Ett exempel på skogsfasaddata insamlat med Optech ILRIS. I mitten ses referenstavlan som används för att kalibrera intensitetsdata.

Mätningarna utfördes på 50-200 meters avstånd från skogen för att utnyttja skannerns intensitetsdynamik på bästa sätt och för att täcka in skogsfasaden med så få datainsamlingar som möjligt. För att kunna relatera de inskannade datamängderna till varandra placerades markörer ut i kanterna av varje mätnings utsträckning i sidled. Dessa användes sedan för att lägga ihop datamängderna till en sammanhängande skogsfasad. Detta förfarande tillåter dock inte kalibrerade intensitetsdata för mer än de datamängder där referenstavlan finns med.

Mätningar utfördes därför med en referenstavla närvarande både mot lövskog och barrskog för att ge en möjlighet till kalibrering av de båda skogstyperna. Referenstavlans fyra fält hade reflektanserna 2, 30, 60 samt 99 %. Undersökningarna kan bara klassas som inledande men har givit inspiration och idéer till vidare utnyttjande av 3D-tekniker i terräng.

# 4 Mätsystemet för grindad avbildning

Försökssystemet har utvecklats och värderats i samband med de fältkampanjer som genomförts vilket beskrivs i detta avsnitt. Avsikten har varit att ha ett modulärt system som medger användning av olika lasrar samt kameror som sändare/mottagare.

## 4.1 System vid mätningarna i Älvdalen v41 2002

För att kunna registrera grindade bilder krävs noggrann tidssynkroniseringen mellan laser och kamera. Detta sköttes genom att lasern sände ut en trig-puls till en pulsgenerator, modell Stanford Research Systems DG535, som sedan fick styra grinden på ljusförstärkaren. På pulsgeneratorn kan man styra fördröjning och pulslängd med ner till pikosekunds noggrannhet och på så sätt ställa in grindens position och längd. Stegning av grinden över målet sköttes genom att manuellt knappa på pulsgeneratorn vilket gjorde att ingen information finns om vad inställningarna var för individuella bilder i en sekvens. Den manuella stegningen gjorde också att steg mindre än 10 ns inte var praktiskt användbara. Dessutom har det visat sig att en del bilder blev felaktiga, troligen för att trigsignalen kom samtidigt som inställningarna på pulsgeneratorn ändrades.

Bilderna lagrades i en dator med hjälp av ett framegrabberkort modell MatrixVision Titan RGB och medföljande programvara. Eftersom lasern har 10 Hz pulsrepetitionsfrekvens och ccd-kameran som sitter bakom bildförstärkaren har bildfrekvensen 25 Hz, triggades framegrabberkortet så att bara de exponerade bilderna lagrades. Bilderna mellanlagras i ett buffertminne vars storlek gjorde att maximalt 150 bilder kunde tas i varje sekvens.

## 4.2 System vid mätningarna i Kvarn v8 2003

Efter mätningarna i Älvdalen fanns många idéer om hur systemet kunde förbättras och viss teknikutveckling genomfördes. Den förändring som var mest angelägen var att stegningen av grinden automatiserades så att antalet bilder för varje inställning kunde kontrolleras och registreras. Systemet skulle också till denna mätkampanj även klara av lasrar med höga pulsrepetitionsfrekvenser, förutom den 10 Hz laser som användes i Älvdalen.

Vi hade också kommit fram till att det finns tre viktiga typer av bildsekvenser som systemet skulle kunna användas för att samla in. Dels vill man kunna samla in bilder där målet syns tillsammans med omgivningen inom en lång grindlucka, en bildtyp som vi kallar *pålysbild*. Man vill också samla in bilder där bakgrunden är upplyst men inte målet, något vi kallar *silhuettbilder*. Detta åstadkoms genom att lägga en lång grindlucka med en fördröjning som gör att vi bara tittar bakom målet. Slutligen vill vi skära upp målet i tunna skivor *för att ta fram 3-D-information*. Det är för denna typ av bildsekvens som automatiseringen gör störst skillnad. Grindluckan förskjuts för varje bild och ett nytt avståndsintervall är upplyst i bilden och på så sätt skapas en stegad bildsekvens, där man har god kontroll över avståndet till/på målet..

En förutsättning för att stega grinden över målet på ett kontrollerat sätt var att pulsgeneratorn styrdes via dator. Metoden som valdes var GPIB-kommunikation och styrning med en egenutvecklad LabView-applikation. Även styrningen av datainsamlingen sköttes via LabView-programmet för att synkronisera kameran med pulsgeneratorn så att antalet bilder för varje inställning kunde kontrolleras.



Figur 27. Användargränssnittet för LabView-applikationen som styr GV-systemet.

Den första inställning som man skall göra i programmet är att ange vilken laser som används. Vi har valt att benämna alternativen efter de två gröna lasrar vi hade tillgängliga vid försöken, men i princip är de två alternativ som finns att lasern har mindre än 25 Hz repetitionsfrekvens eller mycket mer än 25 Hz repetitionsfrekvens. Gränsen 25 Hz kommer från kamerans bildfrekvens.

Om man använder Quantel Brilliant lasern så ska systemet vara kopplat enligt Figur 28. Det innebär att lasern får gå fritt och att Q-switchsignalen används som grundklocka. Den triggar sedan en pulsgenerator av modell SRS DG 535 som via GPIB kan ställas in på väldigt exakta fördröjningar och pulslängder från datorn. Pulsgeneratorn skickar dels en grindpuls till bildförstärkaren som öppnar slutaren medan pulsen varar och dels en trigpuls till framegrabberkortet av modell MV Titan RGB för att tala om att nästa bild är exponerad och ska sparas.



Figur 28. Signalschema för GV-systemet med Quantel Brilliant lasern.

Om man istället använder Continuum EPO5000 lasern så ändras uppställningen lite och ser istället ut som i Figur 29. Anledningen till förändringen är att nu har lasern högre pulsrepetitionsfrekvens än kamerans bildfrekvens och varje bild exponeras av flera laserpulser. Här börjar signalkedjan med att kameran skickar ut en trigsignal när den börjar integrera en ny bild. Denna tas emot av en pulsgenerator av modell HP 8116 A som för varje inkommande puls skickar ut ett pulståg med repetitionsfrekvens och längd styrt via GPIB från LabViewprogrammet. Det här pulståget går till laserns Q-switch och skapar ett tåg av laserpulser. Lasern skickar även vidare trigpulserna till SRS-pulsgeneratorn som styr bildförstärkaren enligt de instruktioner som laddats ner från datorn via GPIB. Då alla bilder nu är exponerade så behöver inte framegrabberkortet triggas utan kan spara alla bilder det tar emot från kameran.



Figur 29. Signalschema för GV-systemet med Continuum EPO5000 lasern.



Figur 30. Detaljbild av kontrollerna i LabViewgränssnittet.

I användargränssnittet för LabView-programmet används den högra delen för att visa bilden och systemets status medan inställningsmöjligheterna är samlade i vänstra kanten. En detaljbild av bara kontrollerna finns i Figur 30. Överst görs valet av laser och om EPO5000 lasern väljs även antalet pulser som integreras per bild och hur tätt de ska komma. Underst finns kontroller för manuell inställning av grindluckan för att ställa in startläget för insamlingen och för att söka efter mål. Enheterna kan väljas antingen som nanosekunder eller meter och en nollposition kan ställas in på ett föremål i förgrunden som avståndsreferens. Avståndet som anges stämmer annars inte med avståndet från sensorn eftersom signalerna fördröjs i kablar och elektronik. I mitten till vänster i Figur 30 sker inställningarna för sekvensen som ska lagras och till höger visas inställningar för lagring till fil. Det som ställs in för sekvensen är hur många bilder som ska lagras för varje steg (grindposition), hur många steg som ska tas och hur långt varje steg ska vara. Det finns också ett val för om man vill att både startpositionen och slutpositionen eller bara slutpositionen för grindluckan ska stegas. I det första fallet ser man en tunn skiva som flyttas bort och i det andra fallet ser man för varje steg ett större område. En funktion för att automatiskt lagra silhuettbilder i slutet av en stegsekvens las till under mätningarna eftersom vi insåg att detta skulle underlätta segmenteringen av mål från bakgrund. Slutligen finns en startknapp för att köra igång sekvensgenereringen när alla inställningar är klara.

Om man vill lagra pålys- eller siluett-bilder så ställer man in ett steg och antalet bilder man vill lagra som antalet bilder per steg. Position och längd på grindluckan ställs in med de manuella kontrollerna nedanför och det som lagras är samma vy som ses i bildfönstret till höger före start. För att lagra en stegad sekvens så ställs startpositionen in med de manuella kontrollerna längst ner och när man sedan startar sekvenslagringen med OK-knappen läggs steglängden till på antingen startposition eller lucklängd efter att det önskade antalet bilder per steg har lagrats. Detta upprepas tills det önskade antalet steg har genomförts.

Då bilderna nu sparas till hårddisken efter hand är antalet bilder i en sekvens inte längre begränsat. Med det nya systemet är steglängder ner till 1 ns praktiskt användbara. Systemet klarar i princip steglängder ner till 1 ps, men då ljusförstärkarens kortaste möjliga lucklängd är 40 ns är det inte relevant att använda kortare steglängd.

### 4.3 System vid mätningarna i Kvarn v25 2003

Vid detta fältförsök användes samma system som förra gången utan större förändringar. Dessutom gjordes försök med en triggad InGaAs-kamera känslig vid 1,5  $\mu$ m för att studera möjligheterna till ett ögonsäkert system för grindad avbildning. Då kamerans kortaste integrationstid var 128  $\mu$ s och pixlarna dessutom inte öppnas samtidigt utan integrationen sveper över sensorn, så var det inte intressant att stega fördröjningen utan integrationstidens start styrdes manuellt med pulsgeneratorn som triggades av lasern. Bilderna samlades in med samma framegrabberkort som använts tidigare med hjälp av den medföljande programvaran. För att undvika oexponerade bilder triggades insamlingen med laserns pulsrepetitionsfrekvens.

# 5 Underliggande teori

## 5.1 Teoretisk bakgrund för modellering av GV-system



Figur 31. Översikt av faktorer som påverkar prestanda för ett GV-system.

De faktorer som påverkar prestanda hos ett grindat system har behandlats i en tidigare rapport<sup>1</sup>. Figur 31 illustrerar dessa. Vi hänvisar till denna rapport samt de referenser som finns upptagna i denna för en översikt. Här ges en kort sammanfattning samt några kompletteringar till den förra rapporten.

#### 5.1.1 Atmosfärsdämpning

För atmosfärsdämpningen har vi använt följande formel för att relatera dämpning vid olika våglängder  $\lambda$  (giltig för vis/NIR området): (V är den visuella sikten)

$$\sigma = \left(\frac{3.9}{V}\right) \cdot \left(\frac{550}{\lambda}\right)^{0.585V^{0.33}}$$
(5.1)

Denna formel illustreras i Figur 32.



Figur 32. Relationen mellan atmosfärsdämpningskoefficienten vid 0.55 µm och 1,55 µm utnyttjande formeln (5.1) ovan.



Figur 33. Laserenergivinst vid olika visuell sikt = målavstånd för 1,55 och 1,06 µm relativt 0,532 µm. Övriga parametrar är samma.

Atmosfärstransmissionen är till 1,55  $\mu$ m fördel. Vi antar att vi vill utnyttja ett system till ett avstånd *L*=*V*=den visuella sikten. I övrigt antas alla parametrar lika mellan de båda våglängdsfallen.

Med den enkla dämpningsmodellen enligt formel (5.1) så blir laserenergivinsten betydande relativt den vid 0,55 µm och ca en faktor 3 om man jämför 1,06 med 1,55 µm.

#### 5.1.2 Upplösning beskriven av MTF

Den totala MTF-funktionen för ett avbildande laserradarsystem kan skrivas<sup>8</sup>:

$$MTF_{tot} = MTF_{optics} \cdot MTF_{target} \cdot MTF_{turb} \cdot MTF_{aerosol} = = \exp\left[-4\left(\frac{\lambda v_a}{D}\right)^2\right] \exp\left[-\frac{(\Theta_2^2 + \Lambda_2^2)\pi\lambda v_a^2}{2L\Lambda_2}\right] \exp\left[-3.44\left(\frac{\lambda v_a}{r_0}\right)^{5/3}\right] MTF_{aerosol}$$
(5.2)

där  $v_a$  är den spatiella vinkelfrekvensen, *D* mottagardiametern,  $\lambda$  våglängden, *L* avståndet till målet och  $r_0 = 2.1 \cdot \rho_0$  är Fried's parameter och  $\rho_0 = \rho_{ps}$  är den transversella koherenslängden (kort exponering). Parametrarna  $\Theta_2$  and  $\Lambda_2$  är strålparametrar definierade av Andrews<sup>8</sup>.

#### 5.1.3 Aerosol MTF

Atmosfärens degraderande inverkan på upplösningen brukar oftast behandla enbart turbulens. Numera har man insett att även aerosolspridning kan ha ett relativt stort inflytande på upplösning vid sidan av ren dämpning. Kopeika har behandlat ämnet utförligt och det diskuteras i kapitel 17 i hans bok<sup>9</sup>.

Vanligtvis har man ansett att aerosol MTF kan beskrivas som ren transmission som är dess gränsvärde för höga frekvenser. Aerosolospridning sker huvudsakligen i framåtsektorn och inom en vinkel  $\lambda/a$  där a är den dominerade partikelradien. Emellertid är denna vinkel typiskt av storleken radian för partiklar och våglängder kring 1 µm. Denna spatiella gränsfrekvens  $f_a=a/\lambda$ , gäller emellertid inte för ett praktiskt optisk instrument som begränsar denna vinkel till ett betydligt mindre värde och därigenom minskar oskärpecirkeln och förbättrar bildkvaliteten.

Aerosol MTF är av intresse av flera skäl:

- Den kan i vissa fall av låg turbulens (t.ex. för sneda banor eller under de tider på dygnet där turbulensen är låg) vara den dominerande atmosfärseffekten för framkallande av oskärpa. I regel är effekten av aerosol MTF mer betydande för OD>1. OD är den optiska densiteten där transmissionen är  $10^{-OD}$ .
- Den kan beräknas med hjälp av väderinformation<sup>10.</sup>
- Den är konstant över bilden och relativt konstant i tiden och kan därigenom kompenseras för genom invers filtrering. Detta är oftast inte fallet med turbulens kopplad till målinducerat speckle, eftersom den effekten inte är konstant över bilden.
- Den beror av atmosfärsspridning och de optiska parametrarna för sensorn vilket medför att effekten i viss mån kan hanteras redan på konstruktionsstadiet.
- Gränsfrekvensen  $f_c$  för aerosol MTF uppmätt av Kopeika med ett FOV=1,9mrad tenderar att variera mellan 6-17 cykler per mrad eller uttryck i upplösningsvinkel 30-80 µrad/pixel. För att känna igen ett fordon på 25 km avstånd krävs ca 10 µrad/pixel.
- Inverkan av Aerosol MTF blir lägre för ett aktivt pulsat avbildande lasersystem jämfört med ett passivt eftersom det aktiva tidsgrindar bort en hel del av den spridda strålningen från aerosoler som återfinns mellan mål och sensor.
- Aerosol MTF har ett relativt starkt våglängdsberoende till följd av våglängdsberoendet hos aerosolspridning och aerosolabsorption. I klart väder förbättras MTF med våglängden. Om stora partiklar ingår som i vindrivet damm eller hos marin atmosfär gäller det omvända.

Vi skall nedan uppskatta Aerosol MTF enligt det schema som anges i Kopeikas bok. Notera att denna baseras på ett passivt avbildande system.

Lite förenklat beräknas aerosol MTF enligt följande:

1/ Uppskatta spridning,  $\sigma$ , och absorption, a, för aktuell aerosol och laservåglängd. Vi antar att a=0 och att  $\sigma$  ges av uttrycket (5.1) ovan.

2/ Ansätt aerosolspridningens fasfunktion som baseras på antagen eller mätt partikelstorleksfördelning inklusive brytningsindex, enligt

$$P(\theta) = 4\sqrt{\pi} \cdot \exp(-\alpha_p \cdot \theta^2)$$
(5.3)

3/ Uppskatta den "klassiska" aerosol MTF enligt:

$$K(f_a) = \exp(-\int_0^z T_{eff} \cdot \left[1 - \exp(-\frac{\pi^2 \cdot f_a^2}{\alpha_p})\right] dz'$$
(5.4)

där z är avståndet och  $f_a$  den spatiella vinkelfrekvensen (cykler/rad) samt  $T_{eff}$  är det effektiva optiska djupet som ges av:

$$T_{eff} = -\ln(M_a(\infty)) = \sigma \cdot z + a \cdot z \cdot (1 - \exp(-\sigma \cdot z)) \quad (5.5)$$

4/ Bestäm instrumentbegränsningen i vinkel avseende mottagen spridd strålning från aerosoler.

a/ Den ändliga spatiella frekvens som kan associeras med varje passivt avbildande system begränsar den detekterade ospridda strålningen och ger en relativ ökningen av andelen spridd strålning i motsats till dynamikbegränsningen som i regel begränsar den minsta detekterbara spridda strålningen.

b/ Begränsad dynamik motsvara en maximal vinkel där spridd strålning kan detekteras ( $\theta_l$ ).

c/ SNR begränsning. Minsta detekterbara strålning relativt brus i detektorn. Motsvarar en annan maximal vinkel ( $\theta_2$ ).

d/ Ändligt synfält *FOV*,  $\theta_3 = FOV/2$ .

5/ Välj  $\theta_{max} = \min(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ .

6/ Beräkna den specifika intensiteten I(q) från multipelspridning. I fallet plan våg gäller:

$$I(\theta) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-i\theta \cdot f_a) \cdot K(f_a) df_a$$
(5.6)

7/ Om MTF för optiken är känd så ersätt (5.6) med:

$$I(\theta) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-i\theta \cdot f_a) \cdot K(f_a) \cdot MTF_{optik} df_a$$
(5.7)

8/ Beräkna slutligen aerosol MTF via inversa Fouriertransformen av den specifika intensiteten.



$$MTF_{aerosol} = \int_{-\infty}^{\infty} \exp(i\theta \cdot f_a) \cdot I(\theta) d\theta$$
(5.8)

*Figur 34. MTF för ett fall med 10 km sikt, våglängd 1,5 µm, z=20 km, C*<sub>n</sub><sup>2</sup> =1*E-16 m*<sup>-2/3</sup>. Mottagardiametern har antagits vara 15 cm och  $\alpha_p$ =1000,  $\theta_{max}$ =3 mrad samt OD=2,22.



Figur 35. Samma som figur 10 med  $\theta_{max}$ =1 mrad ( i stället för 3 mrad).

Det finns en avvägning mellan *FOV* och inflytandet av aerosolspridningens inducerade oskärpa. Ett mycket litet *FOV* reducerar aerosoloskärpan men minskar samtidigt bildtäckningen. Fört ett passivt system minskas dessutom SNR, något som inte är fallet med ett GV system om laserstrålens bredd anpassas till mottagarens *FOV*.

Sammantaget bör aerosolspridningens MTF tas i beaktande för små synfält och *OD*>1.

Den dominerande bildkvalitetsförsämringen sker dock pga. av låg SNR och/eller speckle till följd av turbulens och koherenseffekter vid målreflektion.

#### 5.1.4 Speckle och turbulens

Målets ojämnhet kopplad till fasdistorsion i atmosfärens resulterar i en "grynig" bild till följd av speckle. Speckle är vid höga fotonnivåer den dominerade källan till brus i bilden. Vid låga fotonnivåer som uppstår vid räckviddsgränsen uppstår ytterligare fluktuationer i bildintensiteten till följd av hagelbrus (shot noise). Ljusets kvantnatur medför att hagelbruset blir Poissonfördelat.

Speckle karakteriseras av storlek och kontrast. Mottagaraperturen filtrerar det inkommande specklefältet. När specklefältet når detektorplanet så reduceras kontrasten pga. detektorelementens ändliga storlek och fokuseringen i detektorplanet. Ett fullt utvecklat specklefält har en exponentiell sannolikhetsfördelning (pdf) med kontrasten 1.

Ett fullt utvecklat speckelmönstret är inte vanligt för ett grindat system. Laserns koherenslängd t.ex. är begränsad, kanske till några cm med multimodemission, målets djup, rörelse och ytstruktur samt pulslängden bidrar vidare till att speckelfördelningen avviker från en exponentiell fördelning och närmar sig en Rayleigh eller Riceansk fördelning. Målinducerade speckler propagerar vidare genom atmosfären och in i mottagaroptiken.

MTF för ett idealt speckle-fält kan enligt Andrews<sup>8</sup> skrivas:

$$MTF_{mail} = \exp(-\pi^2 / 2 \cdot \left(\frac{W_{mail} \cdot f_a}{L}\right)^2)$$
(5.9)

där  $W_{mål}$  är målets ekvivalenta radie,  $f_a$  den spatiella vinkelfrekvensen och L målavståndet. Vi ska nu jämföra denna MTF med den för optik och turbulens. Figur 36 och Figur 37 visar MTF kurvor för ett avbildande scenario där man observerar ett mål på marken på 25 km avstånd och olika höjder för den flygburna sensorn. Vi har ansatt 20 cm mottagaroptik, 1,5 µm våglängd och 3 meter målradie  $W_{mål}$ .



Figur 36. MTF-kurvor som visar upplösningsförmågan pga. optik, turbulens och målspeckler. Sensorn tittar från 2500 resp. 250 meters höjd. Laservåglängd 1,55 µm, markturbulens  $C_n 2= 10^{-13} m^{-2/3}$  och turbulensens höjdberoende enligt  $h^{-4/3}$ .


Figur 37. Samma som Figur 36 men med höjden H=100 meter.

Enligt exemplen ovan är speckle det klart mest upplösningsbegränsade fenomenet. Storleken på det mål inducerade specklet framför mottagaren är approximativt:

$$\rho_{speckle-mål} \approx \frac{\lambda L}{\pi W_{mål}} \tag{5.10}$$

vilket för *L*=25 km,  $W_{m\hat{a}l}$ =3 m och  $\lambda$ =1,55 µm innebär  $\rho_{speckle-m\hat{a}l} \sim$  4 mm. Nyligen har Korotkova and Andrews<sup>11</sup> modifierat detta uttryck till:

$$\rho_{speckle-mål} = \frac{\sqrt{2} \cdot \pi L}{\pi W_{mål}} \cdot \sqrt{\frac{1 + W_{mål}^2 / W_1^2}{1 + 2(1 + W_{mål}^2 / W_1^2) \cdot (\lambda L / (\pi W_{mål} \rho_0)^2}}$$
(5.11)

I Figur 38 har vi jämfört speckleradierna uppskattade enligt formlerna (5.10) och (5.11) ovan.



Figur 38. Uppskattning av speckleradier framför mottagaren i enlighet med formlerna (5.10) och (5.11) ovan.

Enligt ovan är alltså speckle radien väl undre 10 mm framför mottagaren. Detta är förklaringen till varför speckleproblemet inte är något problem i laserradarsystem med en eller ett fåtal detektorer eftersom det stora antalet speckler som fyller mottagaren ger ett tämligen konstant irradiansmedelvärde på detektorn. Specklestorleken av denna specklemångfald i mottagaren ges i bildplanet ges av av Rayleighkriteriet:

$$\rho_{speckle},_{bildplan} = \frac{1.22\lambda F}{D}$$
(5.12)

där F = fokallängden och D = mottagardiametern. Med F=1 m, D=0.2 m och  $\lambda$ =1,55 µm erhålles en specklestorlek på 10 µm.

Edouart<sup>12</sup> et. al. har utvecklat en modell som kombinerar turbulens och speckler. För en icke turbulent atmosfär finner man Goodmans<sup>13</sup> klassiska specklemönster och statistik.

Vid turbulent atmosfär undersöker man fallen med eller utan koppling mellan fram och återgående passage genom atmosfären. I det kopplade fallet erhåller man följande uttryck för intensitetskorrelationsfunktionen  $B_l(\mathbf{p_1},\mathbf{p_2})$  i bildplanet för ett GV-system och <u>utan turbulens:</u>

$$B_{I}(\mathbf{p}_{1},\mathbf{p}_{2}) = \kappa^{2} I_{0} \left( \frac{\mathbf{p}_{1}}{\gamma} \right) I_{0} \left( \frac{\mathbf{p}_{2}}{\gamma} \right) \left( \left[ \frac{1}{\gamma^{2}} \int d\mathbf{s} \left[ h_{0}(\mathbf{s}) \right]^{2} \right]^{2} + \left[ \int d\mathbf{p}_{1} h_{0}(\mathbf{p}_{1},\mathbf{p}_{1}) h_{0}^{*}(\mathbf{p}_{1},\mathbf{p}_{2}) \right]^{2} \right)$$
$$= \frac{I_{0} \left( \frac{\mathbf{p}_{1}}{\gamma} \right) I_{0} \left( \frac{\mathbf{p}_{2}}{\gamma} \right) \left( 1 + \left| \frac{2J_{1} \left( \frac{\pi D}{\lambda l} \left[ \mathbf{p}_{1} - \mathbf{p}_{2} \right] \right) \right|^{2} \right) \left( \frac{1}{\lambda l} \left[ \mathbf{p}_{1} - \mathbf{p}_{2} \right] \right)^{2} \right)$$
(5.13)

där **p1** och **p2** är positionsvektorer i bildplanet,  $I_0$ =strålens irradianprofil,  $k=2\pi/\lambda$ ,  $\kappa = 4\pi/k^2$ ,  $\gamma = -F/D$  och N=F/D. Funktionen  $h_0$  är överföringsfunktionen för fälten mellan inträdespupillen och bildplanet i mottagaren. Detta resultat erhålles även av Goodman dvs. att medelstorleken för att speckle utan turbulent atmosfär är ca.  $\lambda F/D$  enligt formel (5.12).

Om man <u>adderar turbulens</u> till utbredningen modifieras korrelationsfunktionen  $B_l(p_1,p_2)$  i bildplanet. För korrelerade fram och återgående passager. Detta inträffar då sändar-mottagar avståndet < Fresnelradien =  $(\lambda L)^{0.5}$  vilket för L = 5 (25) km och  $\lambda = 1,55 \mu m$ är 4(20) cm. Om vi ansätter ett monostatiskt system erhålles:

$$B_{I}(\mathbf{p}_{1},\mathbf{p}_{2}) = \frac{I_{0}\left(\frac{\mathbf{p}_{1}}{\gamma}\right)I_{0}\left(\frac{\mathbf{p}_{2}}{\gamma}\right)}{\left(4N^{2}\right)^{2}} \left(\exp\left[8\sigma_{\chi}^{2}\right] + \left|\frac{2J_{1}\left(\frac{\pi D}{\lambda l}\left|\mathbf{p}_{1}-\mathbf{p}_{2}\right|\right)}{\frac{\pi D}{\lambda l}\left|\mathbf{p}_{1}-\mathbf{p}_{2}\right|}\right)^{2} \exp\left[8\sigma_{\chi}^{2}\right] + 2\left(\frac{4D}{\lambda L}\right)^{2}\int_{0}^{\infty}\rho d\rho \cdot sct_{c}(\rho) \cdot H\left(\left|\mathbf{p}_{1}-\mathbf{p}_{2}\right|\right)\right)$$
(5.14)

där  $\sigma_{\chi}^2$  är log-amplitude variansen pga. turbulens och  $sct(\rho_1-\rho_2)$  är en funktion som representerar målspeckle och turbulenta fluktuationerna. Bredden hos denna funktion är lika med Fresnelradien. Funktionen H representerar medelvärdesbildning av speckler över mottagaraperturen och ges av:

$$H(\mathbf{s}) = \int_0^1 u du \left[ \cos^{-1} u - u \sqrt{1 - u^2} \right]^2 J_0 \left( \frac{2\pi D}{\lambda l} u |\mathbf{s}| \right)$$
(5.15)

De första termerna i den stora parentesen förstärks med faktorn  $exp(8\sigma_{\chi}^2)$ . Detta brukar benämnas "enhanced backscatter" och uppstår till följd av att ljus som följer samma sträcka i den fram och återgående strålgången adderas koherent. När turbulensen ökar så ökar även antalet statistiskt oberoende passager vilket förklarar att förstärkningen ökar med turbulensnivån. För en vidare diskussion av begreppet "enhanced backscatter" se t.ex. Andrews bok<sup>8</sup>. Den tredje termen i parentesen visar mottagarfiltreringen av specklerna. Enligt Edouart et. al. kan den försummas vid sedan av de övriga termerna. Vi har använt formlerna ovan till att uppskatta intensitetskorrelationsfunktionen i det flygburna scenariet med 25 km målavstånd, se Figur 39 och Figur 40.



Figur 39. Exempel på intensitetskorrelationsfunktionen för monostatiska fallet. Den övre figuren visar fallet för en sensor på 2500 meters höjd och 25 km målavstånd och den undre för 250 meters höjd. I detta senare fall är turbulensinflytandet mycket större och backscattereffekten uttalad. Specklestorleken i bildplanet är ung samma för det turbulenta som för det icke turbulenta fallet.



Figur 40. Normaliserad intensitetskorrelation i bildplanet visande speckelloben och intensitetsloben för större värden på koordinaten p.

Turbulensen påverkar även intensitetsfördelningen  $I_0$ . Detta ger en ojämn belysning av målet och i allmänhet större "speckler" i mottagarens bildplan and de som uppstår till följd av målets diffusa reflektion. Denna belysningsojämnhet har en utsträckning som definieras av det transversella korrelationsavståndet  $\rho_0$  relaterad till Frieds parameter  $r_0$  via relationen  $r_0=2.1*\rho_0$ .

# 5.2 Integration av speckleinfluerade bilder

Speckleinfluerade bilder vinner på medelvärdesbildning eftersom varje specklerealisation är oberoende av nästföljande. Några intressanta frågeställningar angående bildkvalitet och bildintegration ur fysikalisk och systemmässig synpunkt kan därför vara:

- Hur många bilder (N) man behöver integrera för att få goda detektionsprestanda.
- Hur många bilder (N) man behöver integrera för att få goda igenkänningsprestanda.
- Hur N beror av signalbrusförhållandet (SNR) i bilden.
- Hur N beror av den spatiella frekvensen  $f_a$
- Hur det fysikaliska kravet på N relativt något bildkvalitetsmått, överenstämmer med måligenkännings-förmågan hos en operatör.
- Hur N värderas ur systemsynpunkt, dvs relativt räckvidd, laserns prf/pulsenergi, laserns tillåtna belysningstid (för att upprätthålla rimligt smyguppträdande), signal- och bildbearbetningstider etc.

Vi skall i detta avsnitt försöka diskutera dessa frågor.

# 5.2.1 Fundamenta vid koherent avbildning

Viktiga effekter är speckler och fotonbrus till följd av låga belysningnivåer som kan uppträda för långa avstånd eller mot lågreflekterande mål på något kortare avstånd.

Låt sannolikheten att detektera n antal fotoner per pixel (eller per bildruta) vara p(n). Under närvaro av speckler samt Poissonfluktuerande brus (låg belysningsnivå) ges denna enligt Goodman<sup>14</sup> av:

$$p(n) = \int_{0}^{\infty} P_{Poisson}(n|I) \cdot P_{speckle}(I) dI$$
(5.16)

där I är irradiansen och Ppoisson, Poissonfördelningen med medelvärdet qI, ges av:

$$P_{Poisson} = \frac{(qI)^n}{n!} \exp(-qI)$$
(5.17)

där q = kvantverkningsgraden och specklefördelningen av ordning M och med medelvärde  $\mu$  ges av gammafördelningen:

$$P_{speckle} = \left(\frac{M}{\mu}\right)^{M} \cdot \frac{I^{M-1}}{\Gamma(M)} \cdot \exp(-MI/\mu)$$
(5.18)

och enligt (5.16) erhålles då:

$$p(n) = \frac{\Gamma(M+n)}{\Gamma(M) \cdot \Gamma(n+1)} \cdot \frac{1}{\left(1 + M/m\right)^n} \cdot \frac{1}{\left(1 + m/M\right)^M}$$
(5.19)

där  $m = \mu^* q$  är medelvärdet av *n*. Uttrycket anger en negativ binomialfördelning. Variansen av *n* ges av:

$$\sigma^2(n) = m \cdot (1 + m/M) \tag{5.20}$$

*M* ges som antalet speckellober inom mottagaraperturen eller:

$$M \approx \frac{D^2 \cdot D_{m\hat{a}l}^2}{\lambda^2 R^2}$$
(5.21)

*M* kan typiskt vara stort, t.ex. ger R=10 km, mottagardiametern D = 0.2m,  $\lambda = 1.5$  µm och  $D_{mål}=3$  meter ett *M*-värde kring 2000. Nu gäller att vi är intresserade i antal speckle per pixel. Vi antar att vi har en mycken liten pitch, närmande sig upplösningsgränsen för optiken. I detta fall antar *M* låga värde nära 1.

Detektionssanolikheten  $P_{det}$  mot falsklarmsannolikheten  $P_{fa}$  för en pixel visas i Figur 41 och Figur 42. I figuren har vi antagit en målpixel med medelnivå  $m_a$  =5, relativt en bakgrund  $m_b$  =1, båda negativt binomialfördelade enligt (5.19) för specklefrihetsgraden M=1. För flera laserpulser med samma energi har  $m_a/M$  och  $m_b/M$  använts. Vi ser hur prestanda sjunker något med ökat antal integrerade pulser M. Vi kan alltså konstatera utifrån dessa överläggningar att <u>detektion av punktmål i</u> <u>speckle och/eller poissonbrus i ett diffraktionsbegränsat mottagarelement inte blir</u> bättre av att dela upp samma pulsenergi i flera laserpulser (M>1).

För bilder blir situationen annorlunda. Målet är här att bestämma detektionsprestanda för ett mål med medelsignal  $m_a$  och en bakgrund med medelsignal  $m_b$ . Vi antar att pixlarnas gråvärden (intensitetsvärden) är fördelade stokastiskt enligt den negativa binomialfördelningen.



Figur 41. Detektionssanolikheten P<sub>det</sub> mot falsklarmsannolikheten P<sub>fa</sub> för en pixel med medelnivå m<sub>a</sub>=5 relativt en bakgrund m<sub>b</sub>=1, båda negativt binomialfördelade för specklefrihestgraden M=1. För flera laserpulser med samma energi har m<sub>a</sub>/M och m<sub>b</sub>/M använts. Vi ser hur prestanda sjunker något med ökat antal integrerade pulser M.



Figur 42. Samma som Figur 41 med detektion relativt poissonbrus med medelvärde 1 elektroner/tidsenhet och målsignal m<sub>a</sub>=2.

Problemet består i att bestämma detektionsprestanda för det allmänna fallet att  $m_a$  och  $m_b$  är okända men att vi känner målstorleken (antal målpixlar  $N_a$ ) samt bakgrundens storlek ( $N_b$ ) och specklefrihetsgraden M. Lösningen till den här typen av problem brukar hänföras till generaliserade likelihood test. Man uppskattar  $m_a$  och  $m_b$  med medelvärdet över mål och bakgrund. Målfönstret löper över bilden och detekteras mot bakgrund av om regionerna skiljer sig avseende statistiska parametrar eller inte. Nyligen har Goudail<sup>15</sup> analyserat detta problem rent matematiskt. Figur 43 baseras på

deras resultat. I detta fall har vi antagit  $N_a$ = 4,  $N_b$ = 80. Som mått på detektionsprestanda finns parameter Area Under Curve (AUC) definierad enligt:

$$AUC = \int_{0}^{1} P_{det}(P_{fa}) dP_{fa}$$
(5.22)

som är ytan under Receiver Operating Curve (ROC)  $P_d(P_{fa})$ . Generellt gälller att AUC < 1. Figur 43 är ett exempel som visar kravet på mål/bakgrundskontrast för att uppnå AUC=0.95 som funktion av speckle-frihetsgraden M där m<sub>a</sub> och m<sub>b</sub> båda skalas med 1/M för att illustrera fallet att man jämför 1 puls med energi E med integration av flera pulser var och en med energi E/M. Det framgår att för dessa lågnivåbilder så skulle det vara bättre att integrera M=4-6 pulser vardera med energi E/M jämfört med enpulsfallet med energi E. Man ser även att vinsten för större M>5 är liten. Det senare visas även i Klasén<sup>29</sup>.



Figur 43. Nödvändig mål/bakgrundskontrast för att uppnå AUC=0.95 för mb=1 resp. 100. Na= 4, Nb= 80. Från Goudail et.al.<sup>15</sup>

#### 5.2.2 SNR vid sammanlagring av bilder, speckle och poissonbrus

Ett mått på bildkvalitet är SNR. Detta kan definieras på många olika sätt<sup>16</sup>. Idell och Webster<sup>17</sup> har presenterat upplösningsgränser för koherent avbildning genom att behandla SNR i den spatiella domänen (fourierspektrum av den detekterade bilden).

Det primära egenskaperna för måligenkäning är upplösning och kontrast. Det är därför lämpligt att definiera SNR i termer av variation för spatiella frekvensamplituder i stället för intensitetsvariationer. Detta SNR definieras enligt:

$$SNR(D(\underline{f})) = \frac{\left|E(D(\underline{f}))\right|}{\left[Var(D(\underline{f}))\right]^{1/2}}$$
(5.23)

där D är mottagardiametern, *E* är väntevärdet och *Var* är varians. Vektorn  $\underline{f} = (f_x, f_y)$  är den 2-dimensionella frekvensvektorn som svara mot den spatiella  $\underline{r}(x,y)$ .

Om detta SNR visar sig svara väl mot måligenkänningskravet, formulerat med upplösning och kontrast, kan vi hoppas att det ger svar på systemfrågor som formulerats ovan angående antalet integrerade bilder för given total laserenergi och apertur. Avsikten är också att studera betydelsen av aperturstorlekeken som berör frågor som är det t.ex. kostnadseffektivt med större optik?

Om vi följer Idells beteckningar så betyder *K*> medelantalet fotoelektroner per exponering. Eftersom varje exponering kan anses ge oberoende speckle och Poissonbrus så gäller att:

$$SNR^{(N)}(D(\underline{f})) = \sqrt{N \cdot SNR(D(\underline{f}))}$$
(5.24)

eller uttryckt i andra termer<sup>14</sup>:

$$SNR^{(N)}(D(\underline{f})) = \left| \tilde{O}(\underline{f}) \right| \cdot \left| MTF \right| \frac{\sqrt{N \cdot \langle K \rangle}}{\left[ 1 + \frac{\langle K \rangle}{M(\underline{f})} \right]^{1/2}}$$
(5.25)

där *N* är antalet integrerade bilder, *MTF*, som beskrivs i avsnitt 5.1, är överföringsfunktionen till följd av optik, aerosol och turbulens, och M(f)specklefrihetsgraden per spatiell frekvens. Man kan approximera M(f) med: M(f) = M / MTF (5.26)

där M är förenklat ges enligt (5.21) ovan.



Figur 44. Tv. Orginalbild, mitten Poisson/speckle influerad bild och t.h. den slutliga bilden när den filtrerats med en MTF funktion (i detta fall motsvarande ett symmetriskt gaussiskt lågpassfilter med 3\*3 pixlar och standardavvikelse=1). Efter Idell och Webster<sup>17</sup>.

Man kan i MATLAB<sup>™</sup> Image Toolbox lätt studera inflytandet av medelnivån K, speckle, Poissonbrus och MTF på bilder. I Figur 44 visas ett exempel.

Medelantalet fotoelektroner per exponering (bildruta), <K>, kan uppskattas enligt:

$$\langle K \rangle = q \cdot T_{opt} \cdot E_p \cdot \frac{\rho}{\pi} \cdot \frac{\pi D^2}{4R^2} \cdot \frac{1}{h\nu} \cdot T_{atm}^2$$
(5.27)

där *q* är kvantverkningsgraden,  $T_{opt}$  den optisk verkningsgraden,  $E_p$  laserpulsenergin, *D* mottagardiametern, *R* avståndet,  $\rho$  medelreflektiviteten hos målet, hv fotonenergin och  $T_{atm}^2$  den totala atmosfärsförlusten . Med *R*=20 km,  $E_p$ = 100 mJ , *D*=20 cm,  $T_{atm}^2$ varierbar (Vilket motsvarar olika visuell sikt och våglängden 1,5 µm), *q*=0.15,  $\rho$ =10 % samt våglängden 1,5 µm erhålles resultat enligt Figur 45.



Figur 45. Medelantal elektroner <K> per bildruta som funktion av visuell sikt. Målavstånd 20 km och parametrar enligt texten ovan.

Vi ser att i det typiska exemplet ovan med ett mål på 20 km så är  $\langle K \rangle \gg 1000$  under goda siktförhållanden men kan gå ned till 0.1-10 för sikt i området 3-5 km. Genom att titta på uttrycket för SNR (5.25) kan vi urskilja två gränssättande fall för avbildningen:

1/ Hagelbrusbegränsade (shot noise) fallet. I detta fall är:

$$\frac{\langle K \rangle}{M(\underline{f})} \approx \frac{\langle K \rangle}{M} \cdot MTF(\underline{f}) \ll 1$$
(5.28)

I vårt exempel är  $M \approx \frac{D^2 \cdot D_{mål}^2}{\lambda^2 R^2} = 400$  för  $D_{mål} = 3$  m, och vi ser att

hagelbrusavbildning i detta fall sker för  $\langle K \rangle \langle \langle M / MTF(f) \rangle$  som beror av f. För låga frekvenser krävs alltså  $\langle K \rangle \langle \langle 400 \rangle$  medan för de högsta urskiljbara rumsfrekvenserna är  $\langle K \rangle \langle \langle 50^*400 \rangle \rangle = 20\ 000$ .

Vi ser att för hagelbrusfallet gäller

FOI-R--0991--SE

$$SNR \approx \left| \tilde{O}(\underline{f}) \right| \cdot MTF(\underline{f}) \cdot \sqrt{\langle K \rangle} < \sqrt{\langle K \rangle}$$
(5.29)

dvs SNR kan högst uppgå till  $\langle K \rangle^{1/2}$ . I detta fall kan speckleinflytandet försummas. Detta bör alltså gälla vid räckviddsgränsen!

2/ Laser-speckle dominerade området. I detta fall antas:

$$\frac{\langle K \rangle}{M(\underline{f})} \approx \frac{\langle K \rangle}{M} \cdot MTF(\underline{f}) >> 1$$
(5.30)

I detta fall kan SNR uppskattas av:

$$SNR \approx \left| \tilde{O}(\underline{f}) \right| \cdot MTF(\underline{f}) \cdot M$$
 (5.31)

dvs SNR är oberoende av K och maximeras av antalet speckler i aperturen multiplicerat med MTF och objektfunktionen. Notera att för mycket höga frekvenser när MTF blir litet kan man övergå till hagelbrusfallet trots att K är högt.

### 5.2.3 Simulering av sammanlagda bilder

Idell har gjort systematiska simuleringar. Testobjektet visas i Figur 46. Den totala bilden är 128\*128 pixlar stor med mönstret upptagande 63\*59 pixlar. Samtliga mönster består av 3 svart/vita stapelpar, med en ökande pixelbredd. Figur 47 visar objektfunktionen och MTF samt OF (optical transfer function) för olika rumsfrekvenser *f*.



Figur 46. Testobjekt 128\*128 pixlar med ett mönster mönstret upptagande 63\*59 pixlar. Efter Idell.

Figur 48 visar hur objektfunktionen och MTF i simuleringsexemplet beror av den spatiella frekvensen  $f_{0,x}$ , där x är spatiell frekvens, antal linjepar per bild



Figur 47. T.v. samband mellan spatiell frekvens och bredden hos de olika staplarna i testbilden. T.h. visas MTF och OF för det valda simuleringsfallet.

I Figur 49 visas ett fall med integrerade bilder för olika K och antal interationer N som krävs för att ge ett viss SNR. En spatiell "medelfrekvens  $f_0$ =21 lp/bild har valts (motsvarande 3 pixlar breda staplar i testbilden).



K	SNR vid 21	SNR vid 21	SNR vid 21	SNR vid 21
	lp/bild	lp/bild	lp/bild	lp/bild
	1	$3^{1/2}$	$10^{1/2}$	10
300	2	4	13	124
30	10	29	96	959
3	93	280	931	9309
0,3	928	2784	9281	92802

Figur 48. Simulerade koherenta bilder sammanlagrade N ggr enligt tabellen. Varje tabellcell motsvarar en delbild i motsvarande position. Olika rader motsvarar ett visst medelantal fotoelektroner per bild och varje kolumn ett visst SNR. I varje cellposition i tabellen anges antal summerade bilder N som ger motsvarande SNR. Efter Idell<sup>17</sup>.



K	Spatiell	Spatiell	Spatiell	Spatiell
	frekvens	frekvens	frekvens	frekvens
	f=13	f=16	f=21	f=32
300	2	3	13	185
30	13	18	96	1509
3	121	171	931	14754
0,3	1202	1696	9281	147203

Figur 49. Simulerade koherenta bilder sammanlagrade N ggr enligt tabellen. Varje tabellcell motsvarar en delbild i motsvarande position. Olika rader motsvarar ett visst medelantal fotoelektroner per bild och varje kolumn en viss upplösning (f lp/bild). I varje cellposition i tabellen anges antal summerade bilder N som ger motsvarande SNR=10<sub>1/2</sub> för givet f. Efter Idell<sup>17</sup>.

Av simuleringsexemplen framgår bl.a. :

- Bästa bildkvaliteten verkar föreligga för lägre integrationstal *N* och högre exponering (större *K*).
- Det behövs ett SNR> $10^{1/2} \approx 3$  och en motsvarande hög spatiell frekvens för att få en bild som ger god mönsterigenkänning.
- Det behövs en något lägre totalenergi (=N\*K) för att realisera bra bilder under goda intensitetsförhållanden (högre *K*).
- Det är viktigt att definiera SNR för given önskad upplösningsförmåga, dvs ett SNR för den Fouriertransformerade bilden för att illustrera SNR till bildkvalitet.

Man kan illustrera ovan sagda lite mer konkret i ett par diagram. I Figur 50 har vi illustrerat sambandet mellan det nödvändiga antalet integrerade bilder N och exponering K för olika SNR och spatiell upplösning f. Notera att N är nära oberoende av K i det specklebegränsade fallet (hög exponering).



Figur 50. Samband mellan det nödvändiga antalet integrerade bilder N och exponering K för olika SNR och spatiell upplösning f. Notera hur man kan urskilja två områden, den hagelbrusbegränsade regionen och den specklebrusdominerade. I den förra stiger antalet integrationer kraftigt med minskande exponering (K) medan N för det specklefallet är nära konstant oberoende av K.

I Figur 51 har vi illustrerat hur sambandet mellan det nödvändiga antalet integrerade bilder N och exponering K för olika spatiell upplösning f. Notera att återigen att N är nära oberoende av K i det specklebegränsade fallet (hög exponering).



Figur 51. Samband mellan det nödvändiga antalet integrerade bilder N och exponering K för olika spatiell upplösning f. Notera återigen hur man kan urskilja två områden den hagelbrusbegränsade regionen och den specklebrusdominerade i analogi med den förra figuren. SNR=3.16 för alla upplösningar f.





Figur 52. SNR som funktion av exponeringen K och antalet integrerade bilder N.



Figur 53. SNR(för 21 lp/bild) som funktion av antalet fotoelektroner K för olika total-exponeringar NK (totalenergi konstant).

Figur 53 visar SNR för f=21 lp/bild när den totala laserenergin (totalexponeringen NK) är konstant. Vi ser att hög totalenergi, dvs. högt NK, och det speckledominerande fallet, innebär att det lönar sig att integrera många bilder. För låg exponering (Poissonbrusdominerande fallet) lönar det sig sämre att integrera många bilder, SNR närmar sig snabbt ett konstant värde oberoende av K. Värdet på SNR beror

naturligtvis starkt av *NK* som framgår av figuren. Gränsen för optimalt *N* kan lätt härledas ur formlerna ovan enligt:

$$N_{opt} \approx \frac{NK}{M^2} = \frac{E}{M^2}$$
(5.32)

där *E*=*NK* är totalenergin. Om *M*=1000 och *E*=*NK*=10000 så är det optimalt att integrera ca 10 bilder etc.

### 5.3 Bakgrundsreflektion

Figur 54 visar klassmedelvärden för reflektion hos några bakgrundsmaterial i området 1-5  $\mu$ m. Ett riktvärde för reflektionen vid 1,5  $\mu$ m kan enligt denna figur vara 15-30 % för vegetation, 15 % för asfalt och 30-40 % för jord. Reflektionskontrasten mellan mål och denna typ av bakgrund ser inte ut att bli så framträdande.



Figur 54. Klassmedelvärden för reflektion hos asfalt, jord, vegetation och en kamoflageduk. Från Vaidyanathan et al<sup>18</sup>.

Däremot uppvisar snö en mycket låg reflektion vid 1,5  $\mu$ m. Reflektionen hos snö varierar med typ av snö samt av snöns ålder. Nysnö är nästan svart i IR området men reflektionen ökar med tiden<sup>19</sup>.

Figur 55 visar reflektionskurvor för snö. Notera att snön är "svart" kring 1,5, 2,0 samt 2,5 µm. I figuren visas även visas reflektionen i 3-5 samt 8-12 µm.



Snow Characteristics		Reflectance (%)	
Density (kg/m <sup>3</sup> )	Description	3-5 μm Band	8-12 μm Band
160	Metamorphosed grains 0.1-1 mm, some clustering, pock marked surface, 1 mm peak to trough	1.27	0.51
220	Broken crystals, 0.1-1 mm, drifting snow, very flat	0.94	0.44
320	Melt-freeze ice crust, pocked surface, 3 mm peak to trough	2.86	1.46

Figur 55. Överst visas hur den spektrala reflektionen för snö kan variera med snöns ålder. Notera att snön är "svart" kring 1,5, 2,0 samt 254 µm. Under visas reflektionen i 3-5 samt 8-12 µm. Från IREO Handbook, Vol I<sup>20</sup>.

### 5.4 *Målreflektion* 1,5 μm (totalreflektion)

För grindad avbildning är det av intresse att jämföra reflektion inom det visuella området med den vid 1,06 och 1,5  $\mu$ m. Figur 56 och Figur 57 nedan visar exempel på spektrala total-reflektionskurvor för relevanta militära färger och ytor hämtade från en FOA-rapport (Staaf<sup>21</sup>).



Figur 56. Exempel på spektrala reflektionskuror för militärt relevanta färger. Från FOA<sup>21</sup>.

Frånsett den svarta färgen uppvisas i allmänhet högre reflektionsvärden mellan 1-2  $\mu$ m jämfört med det visuella området.



Figur 57. Ytterligare exempel på spektralkurvor för militärt relevanta färger. Från FOI<sup>21</sup>.



Figur 58. Exempel på spektrala reflektionskurvor i vitt och olivgrönt. Från Waldham and Wootton<sup>22</sup>.

I Figur 57 visas ytterligare exempel på spektralkurvor för militärt relevanta färger. Notera strukturen i området 1-5  $\mu$ m. Figur 58 visar exempel på vit kamouflagefärg liksom en olivgrön färg. I allmänhet är kravet på reflektion från en kamouflagefärg lågt i det visuella området (5-20 %) men högre i det nära visuella området (0,7-2,5  $\mu$ m).

Vinkelreflektionen beskrivs av en BRDF-funktion (bi-directional distribution function). Den monostatiska funktionen relevant för laserradarsystem kan tecknas<sup>23</sup>:

$$BRDF = BRDF_{diff} + BRDF_{spec} = \frac{A}{\cos^{6}(\theta)} \exp(-\tan^{2}(\theta)/s^{2}) + B\cos^{m}(\theta)$$
(5.33)



Figur 59. Vinkelreflektionskurvor för metallytor som kan vara representativa för militära objekt. Rms för ytprofilen är ca 2 µm och medelytlutningen s=0,3. De inlagda kurvorna är representativa för hur inslaget av spekulär reflektion ökar när man går från det visuella området (A=0, B=0,4, m=1) till 1 µm (A=0,1;B=0,35,m=0,6 och s=0,3) och 1,5 µm (A=0,4; B=0,35; s=0,3, m=0,6).

där BRDF<sub>spec</sub> och BRDF<sub>diff</sub> representerar den spekulära och diffusa komponenten, s medelytlutningen och A, B samt m är konstanter. Figur 59 visar exempel på vinkelreflektionskurvor typiska för en yta med ca 2  $\mu$ m rms profilhöjd och med en medellutning av s = 0.3. Inslaget av spekulär reflektion ökar från det synliga området till våglängdsområdet 1-1,5  $\mu$ m. Typiska militära målytor har ett relativt stort spekulärt inslag för längre våglängder (>3-10  $\mu$ m ekvivalent med att våglängden är 2-3 ggr längre än rms-värdet för ytprofilen). Detta medför att krökta ytor som ger vinkelrätt infall kan ge höga signaturer.

# 5.5 Något om måligenkänning i laserbilder vs. Johnson's kriterier

Måligenkänning i bilder utförda av operatör brukar traditionellt antas följa Johnson's kriterier. Dessa regler togs fram genom att personer fick betrakta 2-D bilder (TV, foto) och från dessa utföra uppgifter från detektion till klassificering, igenkänning och identifiering. Uppgifternas betydelse kan illustreras med:

Detektion : Ett mål finns i bilden	$N_{50}=1,5$
Klassificering: Målet är ett fordon	$N_{50}=3,0$
Igenkänning: Målet är en stridsvagn	N <sub>50</sub> =6,0
Identifiering: Målet är en T72 strv.	$N_{50}=12,0$

Nyligen har man gjort en översyn av dessa regler<sup>24</sup>. Ovanfrån aspekter var t.ex. inte inkluderade i Johnsonfallen från början.

Man kan formulera Johnsonkriterierna enligt följande. Låt  $N_{50}$  vara antalet upplösningselement över den <u>effektiva</u> måldimensionen  $L = (L_x * L_y)^{1/2}$  som krävs för att utföra uppgifterna enligt ovan med 50 % sannolikhet. Sannolikheten att utföra uppgiften,  $P_{\infty}$ , givet oändlligt lång tid ges av<sup>25</sup>:

$$P_{\infty} = \frac{(N/N_{50})^{E}}{1 + (N/N_{50})^{E}}$$
  

$$E = 2.7 + 0.7 \cdot N/N_{50}$$
(5.34)

 $P_{\infty}$  ökar snabbt om *N* överstiger  $N_{50}$ , se figuren nedan.



Figur 60. Sannolikheten för en operatör att utföra olika uppgifter från detektion till identifiering som funktion av kvoten  $N/N_{50}$  där N är antalet upplösningselement över den effektiva mål-dimensionen och  $N_{50}$  är motsvarande gränsvärde för 50 % sannolikhet. Efter Friedman<sup>25</sup> et.al.

Hur är det nu med igenkänningskriterierna när sensorerna känner mer än den "platta" intensitetsbilden som vårt öga och hjärna lärt oss tolka? Inte minst intressant är detta för lasersensorer som kan ge 3-D information vid sidan av spektral reflektion, doppler, polarisation och andra målparametrar ("N-dimensionell imaging"). Bob Harney<sup>26</sup> har presenterat en informationsteoretisk ansats till problemet. Han definierar det totala informationsinnehållet i en bild som summan av antalet pixlar (upplösningselement) över målet multiplicerat med antalet bitar per upplösningselement. Rent allmänt kan man skriva informationsinnehållet som en summa:

$$H_{total} = H_{bild} + H_{spektrum} + H_{övr} + H_{extern}$$
(5.35)

där  $H_{bild}$  är bildinforamation,  $H_{spektrum}$  är spektral information t.ex. vibration, akustik etc, och  $H_{övr}$  betyder "övrig sensorinformation" samt  $H_{ext}$  extern information (t.ex. underrättelse, tidsinformation etc.). Vi behandlar bara bildinformation  $H_{bild}$ . Denna kan enligt Harney skrivas:

$$H_{bild} = N_x \cdot N_y (B_I + B_{RR} + B_P + B_V) + H_1 + H_C + H_H + H_{AR} + H_M$$
(5.36)

där  $N_x * N_y$  är antalet pixlar över målet. Intensitets-informationen per upplösningselement  $B_I$  kan skrivas:

$$B_{I} \approx \log_{2}(1 + SNR)$$

$$1 - 2 < B < 6 - 7 \text{ bitar per upplösningsel. (resolution element)}$$
(5.37)

där SNR är signalbrusförhållandet i bilden. I praktiken skulle  $B_I$  kunna vara hur stort som helst när SNR ökar. I verkligheten gäller dock att detektion kräver SNR>2 och en mänsklig operatör kan inte tillgodogöra sig mer än 64-128 grånivåer (6-7 bitar). För avståndsinfomation gäller att antalet bitar per upplösningselement är:

$$B_{RR} \approx \log_2(L_z / \delta R) \tag{5.38}$$

där  $\delta R$  är mätprecisionen i avstånd relaterat till upplösningen  $\Delta R$  enligt:

$$\delta R = \frac{\Delta R}{\sqrt{2CNR}} \quad \text{för CNR} < 50$$
  
$$\delta R \approx 0.1 \cdot \Delta R \text{ för CNR} \ge 50$$
 (5.39)

Det finns även en information i absolut avståndsmätning och skattning av måldimensioner. Detta informationsinnehåll kan skattas enligt

$$H_{AR} \approx \log_2(4N_x N_y) \tag{5.40}$$

Informationsinnehållet per upplösningscell i polarisations- och hastighetsmätning (dopplerbild av målet) kan uppskattas från uttryck för  $B_p$  och  $B_v$  i ekv. 5.36:

$$B_{P} \approx 2\log_{2}(1 + SNR)$$
  

$$B_{V} \approx \log_{2} \{ (V_{\text{max}} - V_{\text{min}}) / \delta V \}$$
(5.41)

Målets totala hastighet är av intresse för klassificering (gående man, hjulfordon, ytfartyg, jetplan, robot etc.). Det kanske finns 8-32 klasser ( $N_M$ ) av hastigheter som relaterar till måltyp. I informationshänseende kan vi skriva:

$$H_M \approx \log_2(N_M) = 3 - 5 \, bitar \tag{5.42}$$

Målets kontur (spatiell ordning av upplösningselementen) innehåller information. Dels återfinns information om målets form i  $B_I$  men information i form aspektförhållande bredd och höjd t.ex. är en ytterligare typ av information. Det visar sig att man för stora  $N=N_x*N_y$ kan uppskatta informationsinnehållet enligt:

$$H_1 \approx \log_2(N_x N_y) \tag{5.43}$$

Målaspektkvoter  $(L_x/L_y)$  varierar typiskt mellan 1-5, och för typisk igenkänning gäller  $N_y$ =4-8 vilket uppskattar  $H_1$  till 5-6 bitar.

Ytterligare en information ligger i kontexten. Är målet på en väg, i lufthavet eller t.ex på vattnet. En stridsvagn återfinnes knappast på en liten sjö. Informationsinnehållet associerade med  $N_C$  olika möjliga sammanhang är:

$$H_c \approx \log_2(N_c) \tag{5.44}$$

Slutligen kan färg ha information. För laserfallet skulle en multipelvåglängdslaser ge "färg". Informationsinnehållet i "färg" skulle kunna skrivas (med Harneys beteckning)

$$H_H \approx N_x N_y N_p B_H \tag{5.45}$$

där  $N_P$  är antalet "färger" som detekteras och  $B_H$  informationsinnehållet per färg och upplösningselement.

Det kan vara av intresse att tillämpa ovanstående teori för termisk IR och ett GV system. Låt iss bara titta på en intensitetsbild (GV eller IR t.ex.). I detta fall kan (34) förenklas till:

$$H_{bild} = N_x N_y \log_2(SNR + 1) + \log_2(N_x N_y) + H_c$$
(5.46)

-----

För igenkänning krävs minst  $N_{50}$ =6 pixlar, SNR>2.8 och en kontextinformation av 11 bitar (se vidare Harney). För identifiering krävs  $N_{50}$ =12 pixlar. Detta ger enligt (ekv. 5.46, SNR=3)

$$H_{igenkänning} = 88 \text{ bitar}$$
  
 $H_{identifiering} = 306 \text{ bitar}$  (5.47)

#### 5.5.1 IR-kamera och GV system 1,5 μm

Låt oss anta D=15 cm och en kamera i 3-5 respektive 8-12 µm området samt att sensorn är diffraktionsbegränsad avseende spatiell upplösning. Detta ger för 3-5 µm sensorn en

upplösningsvinkel  $\alpha$ =1,2 $\lambda$ /D=32 µrad och 100 µrad för 8-12 µm sensorn. För GV systemet vid 1,5 µm antas 12 µrad upplösningsvinkel.

Vi jämför följande fall:

- Termisk kamera, brusbegränsad
- GV laser, lång gate (intensitetsbild) samt 32 avståndsceller över målet (B<sub>RR</sub>=5 bitar). Vidare jämför vi 1 bild mot 8 bilder integration i båda fallen.

För igenkänning krävs  $H_{tot}$ =88 bitar. För identifiering krävs  $H_{tot}$ =306 bitar enligt ovan (ekv. 5.47). Vi antar att ett mål har 5 m<sup>2</sup> area.

Tabell 8. U	/ppskattade igenkännings- o ti	och identifieringsavstånd för urbulensbegränsning antage	' IR kamera och GV n.	system. Obs ingen
	System	Avstånd	Avstånd	]

System	Avstånd igenkänning	Avstånd identifiering
	(klass.) [km]	[km]
8-12 μm kamera	3,4	1,8
3-5 μm kamera	10,5	5,6
GV, lång	28,1	15,1
avståndslucka 1 bild		
GV, lång	34,4	18,5
avståndslucka 8 bilder		
GV, kort	48,6	26
avståndslucka 1 bild		
GV, kort	56,2	30,1
avståndslucka 8 bilder		

Detta är teoretiska värden men de torde ge en ledning till vilka parametrar som är av betydelse för att öka informationsinnehållet och förbättra igenkänning och identifieringsförmågan.

# 5.5.2 Generell bildkvalitetsekvation

Det traditionella foto/bildspaningen har haft en skala som i praktiskt operative termer beskiver bildkvalitet och upplösning. Denna skala kallas NIIRS (National Imagery Interpretability rating Scale) och sträcker över 9 klasser. Exempel är:

NIIIRS 1: Detektera en mindre hamn.

NIIRS 5: Identifiera en radar som fordons- eller trailermonterad.

NIIRS 8: Identifiera en man med en bärbar IR robot.

NIIRS 9: Identifiera registreringnummer på foron.

NIIRs 8 och NIIRS 9 kan vara relevanta fler långräckviddig GV system. Dessa klasser motsvarar vinkelupplösningar under ca 14 µrad.

Nedanstående tabell är hämtad från US DoD UAV Roadmap<sup>27</sup> och visar kapaciteten för de bästa EO systemen för måligenkänning. Inom det <u>synliga området</u> ligger man på 9-10 µrad som bäst, dock ger dessa sensorer ingen kapacitet på natten. Ett GV system med 15 cm optik och 1,5 µm våglängd uppnår liknande nominell upplösning. Inom 3-5 mm området kan man uppnå 20 µrad dock med större optik. Vi ser att om man vill identifiera en soldat med bärbar IR robot på 6 km avstånd krävs ca 7-14 µrad i upplösning. Detta bör ett GV system klara. Noteras bör att man dessutom kan erhålla invisning via retroreflexen från optiken.

Den generella bildkvalitetsekvationen (GIQE, General Image-Quality Equation) utvecklades under slutet av 80-talet med avklassificerades först 1994. Denna ekvation predikterar NIIRS som en funktion av perceptuellt kvalitetsattribut i form av skala, upplösning, skärpa, kontrast och brus. Dessa termer har tidigare härletts som relaterar fysikaliska bildmått till tolkningsbarhet. Denna formalism kan vara av intresse även för GV bilder. För mer fördjupning hänvisas till en artikel i Appl. Optics<sup>28</sup>.

Tabell 9. Dagens IR/EO sensorer på UAV för långräckviddig måligenkänning. Källa US DOD UAV Road map 2001<sup>27</sup>.

	Calculated IFOV (μrad)	Pixel Pitch/Array Size (μm / pixels)	Distinguish Armed v. Unarmed? @ NIIRS 8 (7.1 < IFOV < 14.3 μrad)		Distinguish Facial Features? @ NIIRS 9 (IFOV < 7.1 μrad)	
			Needed Pitch (μm)	Needed Array Size	Needed Pitch (μm)	Needed Array Size
<i>Visible Wavelength</i> Raytheon Integrated Sensor Suite, planned for Global Hawk UAV	10	9 / 307,200	YES	YES	NO 7.6	NO 430,071
Wescam Model 14TS/QS, employed on Predator LIAV	9	8.3 / 379,392	YES	YES	NO 7.4	NO 478,024
IAI Tamam MOSP, employed on Hunter UAV	30	9 / 393,216	NO 6.2	NO 825,564	NO 4.4	NO 1,651,474
<i>MWIR</i> Wescam Model 14TS/QS, employed on Brodator UAV	55	30 / 65,536	NO 15.3	NO 252,256	NO 10.8	NO 504,617
ROI CA-295	20	30 / 4,000,000	NO 25.4	NO 5,598,712	NO 17.9	NO 11,199,776
LWIR Indigo Alpha, uncooled	1576	51 / 20,480	NO 4.9	NO 2,258,834	NO 3.4	NO 4,518,617

# 6 Operatörsstöd i ett systemperspektiv

Metoder för operatörsstöd kan utformas olika beroende på prioriteringen mellan olika krav. I ett första skede är detektion och nära realtid de primära kraven, och här kan det röra sig om rent grundläggande operatörsstöd. I ett senare skede kan mer komplexa grindförfaranden och signal- och bildbehandlingsalgoritmer kopplas in för ökat operatörsstöd eller olika grader av semiautomatisk målidentifiering. Priset för detta ökade stöd får som regel betalas på två olika sätt: Dels innebär det ökade informationskravet att systemet i en taktisk situation måste operera aktivt under en längre tidsperiod. Generellt krävs också längre beräkningstider i signalbehandlingen, och hantering av större datamängder.

I detta avsnitt belyser vi utifrån ett systemperspektiv hur man med ett antal olika grindningsförfaranden och signalbehandlingsmetoder i kombination kan få olika grader av operatörsstöd vid måligenkänning.

# 6.1 Program för grindstyrning

Beroende på avvägningen mellan tidigare nämnda faktorer väljs den för situationen bästa operatörsstödsnivån, och systemet ska därför kunna opereras enligt olika mätprogram. Utvärderingar av fältförsöken, utvecklingen av experimentsystemet och analysen av mätdata har resulterat i några olika möjliga grindningsförfaranden, här ordnade i stigande komplexitetsordning:

A) Pålysprogram för målavbildning med bred grindlucka (500 ns/75 m har använts vid fältförsök) med nära realtidsprocessande. Detta förfarande ger operatören en snabb bild av innehållet i ett helt terrängavsnitt, vilket i enklare fall ger en direkt målidentifiering eller, i svårare fall, en indikation på områden som ska studeras närmare. I enklaste fallet tas endast en bild, medan ett utökat pålysprogram registrerar flera bilder, vilka underkastas bildbehandling exempelvis genom rörelsekompensering och medelvärdesbildning, vilket beskrivs i avsnitt 6.2 och teoriavsnittet 5.2. Invisning av målområde kan ske exempelvis mha. IR-sensor.

B) Program för automatisk grindning av ett specifikt område som visats in av IRsensor eller motsvarande för operatörsstöd. Detta förfarande har exemplifieras med grindlucka 40 ns och steglängd 10 ns som avslutas med siluettbild 500 ns, under flera mätkampanjer. Detta program ger operatören en snabb avsökning av ett begränsat terrängavsnitt i djupled, och assisterar i målidentifiering genom att visuellt frilägga målet från bakgrund och förgrund.

C) 3-D-program, vilket innebär automatisk sekvensgenerering för syntes av 3-D-data. Syftet är direkt operatörsstöd eller utökat operatörsstöd genom ökad automatisering av identifieringsprocessen.Vid fältförsök har dessa sekvenser genererats genom att en kort (oftast 40 ns) grindlucka placerats framför målet och sedan förflyttats i avståndsled i korta steg (1-10 ns) tills hela målet passerats. För att underlätta automatisk segmentering avslutas dessa sekvenser i sista steget med en silhuettbild med lång (500 ns) grindlucka bakom målet. Den registrerade informationen underkastas signalbehandling, vilket avbildar målet i 3-D.

I ett systemperspektiv i vidare mening kräver denna metod förutom invisning i bildplanet även en god avståndsbedömning till målet för att kunna uppnå en hög automatiseringsgrad.

När detta grindprogram testats vid fälförsök, har fem bilder registrerats vid varje steg, och steglängden har hållits så kort som 1 ns/15 cm, vilket sammantaget innebär förhållandevis många bilder och därmed relativt lång total belysningstid. Preliminära utvärderingar tyder dock på att det nödvändiga antalet bilder i många fall skulle kunna reduceras avsevärt jämfört med detta förfarande, med hjälp av vidareutveckling av de nuvarande metoderna (se avsnitt 6.4).

# 6.2 Metoder för bildförbättring

Metoder för bildförbättring som kan användas för ökad förmåga för måligenkänning har utvecklats vid FOI, dels i tidigare studier<sup>1</sup>, och inom närliggande projektverksamhet. Detta gäller metoder för bildförbättring genom fusionering av bilder i serie, som fungerar även vid den bilddegenerering som uppkommer av bla atmosfärseffekter och kamerarörelser. Arbetet har även följts upp inom detta projekt med en utredning av den bakomvarande teorin för integrering av ett optimalt antal bilder, enligt avsnitt 5.2.

De resultat som framkommit i en tidigare studie är att en signifikant förbättring av bildkvalitén uppnås genom att applicera olika filtrerings- och bildprocesser, främst genom sammanslagning av flera efterföljande bilder. De resultat som framkommit, och som redovisats<sup>1</sup>, har även gett upphov till en metod för semiautomatisk bildförbättring, se Klasén<sup>29</sup>, Klasén et al.<sup>30</sup>, Andersson et al.<sup>31</sup>. Motiveringen till detta arbete var att utforma en metod som inte är beroende av specifika målegenskaper, som linjer, kanter, lyktor eller reflektorer på målet. Metoden skulle klara olika måltyper utan behov av sådan a prioriinformation, eftersom det innebär att metoder för att hitta dessa målegenskaper behövs och därigenom ökar också beräkningstiden och komplexiteten. Ett annat krav som ställdes var att klara stora rörelser i bildplanet, som uppkommer av atmosfärisk tilt och plattformsrörelser, samt låga SNR-förhållanden. Den metod som utvecklats är baserad på en vidareutveckling av en algoritm (Transformation-Based Motion Compensation, TBMA) för att effektivt hantera bilddegenerering som uppkommer av bl.a. atmosfärseffekter och kamerarörelser. Efter det att bildrörelsen är estimerad och kompenserad för, kan efterföljande bilder slås samman. Härigenom kan effekter hanteras som uppkommer av främst atmosfärisk tilt, speckelbrus och kamerarörelser, vilket illustreras i Figur 62 och Figur 62 och beskrivs mer i detalj i Klasén<sup>29</sup>. De processade bilderna kan t.ex. användas som indata till metoder för detektion, klassning eller igenkänning.



61. Älvdalens skjutfält, pilen anger målets ungefärliga position på 14 km avstånd. Ovan från vänster: En närbild av tgb30, en obearbetad bild från en bildsekvens genererad med experimentsystemet (532 nm, Xybionkameran) samt en processad bild där 57 efterföljande bilder rörelsekompenserats och fusionerats till en bild, överst th är en CAD-modell av målet.



Figur 62. T72 sett rakt framifrån, se även Figur 12, på avstånd 1905 m. Övre raden från vänster: Obearbetad bild, följt av 2 resp. 5 rörelsekompenserade och sammanlagda bilder. Nedre raden från vänster: 10, 20 och 30 rörelsekompenserade och sammanlagda bilder.



Figur 63. Maskerad Tgb 11 pålysbild till höger och silhuettbild till vänster.

# 6.3 Bildsegmentering

Automatisk segmentering av målet i sensordata är en viktig del i algoritmer för automatisk måligenkänning, men kan också användas som ett operatörsstöd. En sådan automatisk segmentering måste vara robust, exempelvis mot olika typer av belysningsförhållanden, och därför har försök gjorts att utveckla och utprova parameterfria segmenteringsmetoder. Två sådana presenteras kort här.

Den första metoden använder som indata grindade bilder av dels målet och dels dess silhuett. Algoritmen bestämmer globala tröskelnivåer för de båda bilderna, och de resulterande binärbilderna kombineras för att undvika över- respektive undersegmentering. Idén bakom bestämningen av de globala tröskelnivåerna är att utnyttja förhandskunskaper om den förväntade relativa skalan av ett typiskt mål i jämförelse med andra artefakter som också finns i bilden. Om vi trösklar en gråskalebild med ett godtyckligt tröskelvärde får vi en binärbild, där vi benämner de pixlar som hade en intensitet över tröskelvärdet som objektpixlar, och resten bakgrundspixlar. Den genomsnittliga skalan på objekt i binärbilden kan beskrivas genom kantförhållandet  $R_E = N_E / N_{TO}$ .  $N_{TO}$  är antalet objektpixlar och  $N_E$  är antalet kantpixlar, d v s objektpixlar som gränsar till minst en bakgrundspixel i en 8omgivning. Småskaliga och uppbrutna objekt kommer att ha ett större kantförhållande än stora och sammanhängande dito. I fallet med grindad avbildning väntar vi oss att sensorbrus typiskt har låga intensitetsvärden, samt är småskaligt i jämförelse med det mål vi vill segmentera. Detta förhållande används i en heuristiskt utvecklad metod för automatisk bestämning av tröskelnivåerna.

Den andra utvecklade segmenteringsmetoden opererar på bildsekvenser, där grinden successivt stegas över målet och avslutas med en silhuettbild. Ett sådant stegningsförfarande är typiskt för den automatiska sekvensgenerering som ligger till grund för användningen av grindad avbildning för återgivning av målet i 3-D, se avsnitt 6.2. En silhuettmask bestäms genom att jämföra varje pixels intensitet i silhuettbilden med dess värde i de tidigare bilderna i sekvensen. De pixlar vars intensitet i silhuettbilden överstiger värdet  $c \cdot (p_{max} - p_{min}) + p_{min}$ , där c < 1, anses höra till silhuettmasken.

De båda segmenteringsalgoritmerna demonstreras här genom applikation på två olika datamängder. Försökssystemet hade vid bildregistreringen i båda fallen programmerats för automatisk sekvensgenerering genom att en grindlucka med längden 40 ns placerades framför målet och därefter försköts i steg om 1 ns, motsvarande 15 cm i avstånd. I varje steg insamlades fem bilder, vilka sedan kunde medelvärdesbildas för att minska atmosfärsturbulensens inverkan. Bildsekvenserna avslutades med fem silhuettbilder, med en 500 ns lång grind strax bakom målet. Resultatet av segmenteringarna visas i Figur 64 och Figur 65. Automatgenererade bildsekvenser av den aktuella typen kan användas för avståndsupplöst avbildning, vilket visas i nästa avsnitt. Den första algoritmen använder sig här endast av bilder från två grindpositioner i respektive datamängd, dels när hela målet ryms inom grinden, och dels silhuettbilden. Den andra algoritmen använder hela sekvensen.



Figur 64. Överst i mitten: Fem medelvärdesbildade bilder med grinden över målet – en terrängbil 30 på ett avstånd av 1,9 km. Överst till höger: Fem fusionerade bilder av målets silhuett mot bakomliggande terräng. Underst till vänster: resultatet av tröskling med enbart mål- och silhuettbild. Underst till höger: resultatet av segmentering med utgångspunkt i hela den stegade bildsekvensen. Segmenteringsmaskerna visas i rött mot silhuettbilden som bakgrund. Överst till vänster visas en bild från den första delen av den stegade sekvensen, när endast den främre delen av målet ligger inom grinden. Bilderna har kontrastjusterats för visning.



Figur 65. Överst i mitten: Fem medelvärdesbildade bilder med grinden över målet – en stridsvagn T72 på ett avstånd av 830 m. Överst till höger: Fem fusionerade bilder av målets silhuett mot bakomliggande terräng. Underst till vänster: resultatet av tröskling med enbart mål- och silhuettbild. Underst till höger: resultatet av segmentering med utgångspunkt i hela den stegade bildsekvensen. Segmenteringsmaskerna visas i rött mot silhuettbilden som bakgrund. Överst till vänster visas en bild från den första delen av den stegade sekvensen, när grinden är på väg in över målet.

# 6.4 Avståndsupplöst (3-D) avbildning

Med försökssystemet för grindad avbildning är det möjligt att inhämta data för att bygga upp en 3-D bild av ett mål, även på stora avstånd. Den första algoritmen med denna tillämpning beskrevs i Andersson<sup>32</sup>. Algoritmen användes då på data som registrerats med manuell styrning av försökssystemet. Med hjälp av det automatiserade programmet för stegad bildsekvensregistrering och vidare algoritmutveckling, har bättre resultat uppnåtts, vilka presenteras här.

Avståndsupplösningen demonstreras här med hjälp av de två stegade bildsekvenser som exemplifierades i Figur 64 och Figur 65. För att välja ut de pixlar som kan ges relevanta avståndsvärden, används resultatet av den automatiska segmenteringen som beskrevs i föregående avsnitt. Segmenteringen utförs med hela bildsekvensen som utgångspunkt.

Metoden för att genomföra avståndsupplösningen är att studera intensiteten hos varje pixel medan grinden successivt stegas in över målet. Genom att avgöra i vilket steg en pixel tänds, bestämmer man med kunskap om steglängden dess avståndsvärde. Eftersom att reflektansen och laserbelysningen är olika på olika delar av målet, behövs en individuell tröskelnivå för varje pixel. Denna bestäms genom att bildsekvensen, där alla multipla bilder vid varje steg medelvärdesbildats, först lågpassfiltreras i avståndsled. Därefter sätts tröskelnivån vid en nivå mellan det minsta och största signalvärdet i varje pixel. Det exakta värdet på denna nivå är inte kritiskt, men det bör ej vara så lågt att pixlar triggas för tidigt i bildsekvensen på grund av brus. En andel på 80 % av avståndet mellan största och minsta signalvärde har använts i detta arbete.

I Figur 66 och Figur 67 visas proceduren för en godtycklig pixel från var och en av de aktuella bildsekvenserna. Till vänster visas den uppmätta kurvan, där varje intensitetsvärde är medelvärdet av pixelns intensitet i samtliga bilder som tagits vid respektive steg. Till höger visas kurvan efter lågpassfiltrering. Det första grindsteg i vilket kurvan överskrider 80 % - nivån ger pixelns avståndsvärde. Grindens steglängd var i detta fall 1 ns, vilket motsvarar 15 cm i avståndsskillnad.



Figur 66. Till vänster visas intensitetsvärdets variation i en godtycklig pixel, när grinden stegas över målet. Varje värde på kurvan är ett medelvärde av pixelintensiteten vid alla fem upptagna bilder vid respektive steg. Till höger visas den lågpassfiltrerade kurvan, tillsammans med den satta tröskelnivån på 80 %, och en markering vid det steg där kurvan överstiger tröskeln, vilket motsvarar avståndsvärdet för pixeln. Pixeln kommer från en bildsekvensen av terrängbil 30 på 1,9 km avstånd.



Figur 67. Motsvarande Figur 66, men pixeln kommer från stridsvagn T72 vid 830 m. Notera det lägre signal/brus-förhållandet i Figur 66.

Resultatet av avståndsbestämningen för respektive mål visas i Figur 68. De inbördes avstånden kan avläsas med hjälp av färgskalan, som är graderad i meter. Vi kan notera att felaktiga avståndsvärden ges till vissa pixlar i terrängbilens strålkastarreflektorer, vilket beror på att signalen bottnat för dessa i delar av sekvensen.



Figur 68. Avståndsupplösta bilder. Till vänster: Terrängbil 30. Till höger: Stridsvagn T72. Relativa avstånd i varje bild kan utläsas med hjälp av färgskalan, som är graderad i meter.

I ett systemperspektiv arbetar försöksalgoritmen med förhållandevis långa bildsekvenser. Preliminära utvärderingar visar dock på möjligheten att i många fall lösa uppgiften med endast bråkdelar av datamängden. Förhållandet att grinden inte är ideal utan har en finit stigtid, gör det nämligen möjligt att använda en längre steglängd och därigenom sampla varje pixels intensitetskurva glesare, med bibehållen avståndsupplösning. Detta kan inses genom att studera exempelvis intensitetskurvorna i Figur 67. Under goda mätförhållanden, exempelvis sådana som rådde vid registreringen av de två bildsekvenser som använts i detta avsnitt, är det dessutom inte nödvändigt att registrera så många som fem bilder i varje steg. Slutligen inses från Figur 67 att cirka halva kurvan är redundant med nuvarande metod. Därför skulle en algoritm som triggar avståndsvärdet på intensitetskurvans bakre del, i stället för den främre, i ett slag halvera den insamlade bildmängden. Vidare undersökningar kan karaktärisera förutsättningarna för 3-D avbildning kvantitativt, optimera bildregistreringen i ett systemperspektiv och utveckla signalbehandlingsmetoderna.

De avståndsupplösta bilderna i Figur 68 är en utgångspunkt för automatisk eller operatörsstödd måligenkänning, se t.ex. Zheng et al.<sup>33</sup>. Vissa ATR-algoritmer för 3-D data

opererar med utgångspunkt i datapunktmoln, exempelvis Wellfare et al.<sup>34 35</sup> och Carlsson<sup>36</sup>, snarare än avståndsbilder. Avståndsbilderna kan dock enkelt omvandlas till punktmoln, vilket visas i följande avsnitt.

# 6.5 Ökade möjligheter till måligenkänning genom 3-D avbildning

Grindad avbildning ger operatören möjlighet till måligenkänning genom direkt inspektion av sensordata i dess ursprungliga eller behandlade form. Tekniken ligger dessutom i gränslandet mellan 2-D- och 3-D-avbildande system. I föregående avsnitt visades möjligheten att genom automatisk bildsekvensgenerering och efterföljande signalbehandling skapa ett avståndsupplöst objekt från målet. 3-D avbildning ger mer information om målets karakteristik än tvådimensionell (2-D). Därför kan 3-D avbildning också ge ökade möjligheter till operatörsstödd eller automatisk måligenkänning. Figur 69 och Figur 70 visar exempel på 2-D- och 3-D-data från två olika mål.



Figur 69. Ovan till vänster visas rådata i form av en obehandlad grindad bild av en stridsvagn T72, registrerad från ett avstånd av 830 meter. Vid samma tillfälle inhämtades även en bildsekvens där grinden successivt stegades över målet. Till höger visas det 3-D- punktmoln som genererats från denna sekvens genom signalbehandling. Punktmolnet är avståndskodat i färg, samt betraktat ur en något större elevationsvinkel än originalsekvensen. Det är också möjligt att istället visa reflektansen från originalbilderna i punktmolnet. Den undre raden i figuren visar hur en operatör kan betrakta det genererade punktmolnet ur olika aspektvinklar.

Avståndsupplösta data som rekonstruerar målet i 3-D kan betraktas ur olika vyer och därigenom ge ökat stöd till en operatör i vissa fall. Detta gäller till exempel när ett mål är placerat bakom lövverk, buskage eller andra "glesa" hinder. Detsamma gäller i fall då bakgrundskontrasten är låg, det vill säga om målet och omgivningen har likartad reflektans vid den aktuella våglängden. Genom möjligheten att vrida eller segmentera punktmolnet efter datainsamlingen kan målet i dessa fall fås att framträda tydligare.



Figur 70. Ovan till vänster: Rådata i form av grindad bild av terrängbil 30 på avståndet 1,9 km. Till höger: Bearbetade data i form av ett avståndsupplöst punktmoln genererat från en bildsekvens av terrängbilen på samma målplats under det aktuella fältförsöket. Undre raden visar hur en operatör kan betrakta punktmolnet ur olika aspektvinklar.

3-D laserradardata har också mycket stor potential för användning i automatisk måligenkänning. Metoder för automatisk måligenkänning studeras och utvecklas i pågående arbete vid FOI, se till exempel Klasén et al.<sup>37</sup>. En studerad metod baseras på Zheng<sup>33</sup>, och finns beskriven i Andersson<sup>32</sup>. Denna metod bygger på jämförelser av nedsamplade avståndsupplösta bilder av målet med motsvarande bilder genererade från ett modellbibliotek, vilket illustreras i Figur 71.



Figur 71. Till vänster visas ett målobjekt, skapat från avståndsupplösta data som visas i Figur 70. Den aktuella metoden utför måligenkänningen genom att jämföra målobjektet med ett bibliotek av kandidater, vilka genererats från CAD-modeller i olika aspektvinklar. Ett motsvarande kandidatobjekt från en terrängbil 30modell i en liknande aspektvinkel visas till höger. Båda objekten har samplats med den laterala upplösningen 0,2 m/pixel. Notera att mål- och kandidatobjekt skiljer sig något på grund av att laserstrålningen transmitterats genom fordonets vindruta, och därför avbildar insidan av förarhytten. CAD-modellen är dock helt opak.

En annan intressant metod beskrivs av Wellfare et al.<sup>34 35</sup>. Utgångspunkten är här att lösa uppgifterna detektion och igenkänning av mål i realtid från ett luftburet system som färdas med hastigheten 100 m/s på en höjd av 300 m över marken. Till skillnad från metoden i

Zheng<sup>33</sup>, opererar denna algoritm på datapunktmoln (se t.ex. Figur 70), i stället för avståndsbilder.

Grindad avbildning är en av flera tekniker som kan användas för generering av avståndsupplösta data. Både grindad avbildning och skannande 3-D-laserradar kräver många laserskott för att erhålla avståndsinformation från hela målytan inom synfältet. I framtida tillämpningar förutspås tekniken med 3-D-fokalplansmatriser, vilka skapar en bild med avståndsinformation i varje pixel från ett enda laserskott, att spela en avgörande roll i 3-D-avbildande tillämpningar för måligenkänning. En översikt av utvecklingen av 3-D-fokalplansmatriser och dess möjligheter ges av Steinvall et al.<sup>38</sup>. En studiegrupp har också under våren 2003 övergripande studerat främst signalbehandlingsmetoder för detektion, segmentering, klassificering och igenkänning från 3-D-data, vilket presenteras i Grönwall et al.<sup>39</sup>.

# 7 Karakterisering av bakgrund, mål och atmosfär vid 1,5 μm

# 7.1 Bakgrundsmätningar vid 1-1,7 μm

Information om bakgrundsreflektion har samlats in via 3 sensorer:

- InGaAs kameran, se kapitel 2.1
- Multimir kameran, en utförlig beskrivning av den multispektrala IR-sensorn MULTIMIR (MULTIspectral Mid wave IR) finns i en tidigare FOI-rapport<sup>3</sup> och<sup>50</sup>.
- ILRIS skannern, se kapitel 2.5.2

Vi ska återge några exemplet från dessa samt försöka sammanfatta och kommentera bakgrundsreflektion vid 1,5  $\mu$ m. Bakgrundsinformation är av intresse ur flera synpunkter Man kan t.ex. använda bred lob och bildförstärkare vid 1,5  $\mu$ m för att snabbt orientera sig och spana. Vinner man något med denna (t.ex. under sämre väder) relativt konventionella bildförstärkare som är känsliga vid kortare våglängder? Hur ser den passiva bakgrunden ut för en bildförstärkare vid 1,5  $\mu$ m?

# 7.1.1 Mätningar med InGaAs kameran samt Multimirkameran

Några registrering med och utan laserbelysning gjordes.



Figur 72. Passiv bild med InGaAs-kameran. Bilden utnyttjar endast reflekterat solljus. Motivet föreställer ett hörn av en frigolittavla, ståendes i gräset, med en svart fastnålad sammetslapp.





Figur 73. Överst visas histogrammet för bilden där det kan noteras att reflektionen av det torra gräset ligger över 50 % !! Under detta visas till vänster spektral reflektans för den vita frigolittavlan och till höger känsligheten för InGaAs (1-1,7 µm).



Figur 74. T.v. Notera hur kulörta kläder och hår reflekterar väl i området 1-1,7 µm. T.h. referenstavlan sedd i terrängbakgrund. Notera att det är hög reflektans för löv och gräs. Bilderna är tagna enbart med reflekterat solljus som belysningskälla.

I Figur 72 och Figur 73 visas den svarta och vita referenstavlan sedd mot gräsbakgrund och i Figur 74 två av författarna sedda mot referenstavlan samt en scen där referenstavlan ses mot ett större ängs- och skogsparti. Gräs och löv verkar reflektera mycket bra mellan 1-1,7  $\mu$ m. Figur 75 styrker antagandet om den relativt höga reflektionen från gräs och sten genom att jämföra resultatet med reflektionen från referenstavlan i frigolit.



Figur 75. Exempel på laserbelysning vid 1,5 µm (pulsenergi ca. 6 mJ pulser) på kort avstånd (< 100 m). ref. tavla material frigolit.

Figur 76 och Figur 77 visar bakgrunder upptagna med InGaAs kameran. Soljusets inflytande på bakgrundsnivån är uppenbar liksom den i allmänhet högre reflektionen från terrängen relativt fordonets reflektion (T72 i detta fall).



Figur 76. Överst t.v. visas en passiv bild från InGaAs kameran och t.h. från multimirkameran tagen vid ett annat tillfälle. Under visas motsvarande bilder justerade så att de spänner över hela gråskaleintervallet 1-256. Fordonet i bild är en T72.



Figur 77. Bilder av T72 och bakgrund från InGaAs kameran utan filter.


Figur 78. Överst: Skenmål i form av pressening och metallrör som eldrör. Nederst:T.v. samma mål från InGaAs-kamera. Solreflektion i 1-1,7 µm. T.h. Skogsbakgrund i InGaAs-kamera.

### 7.1.2 Mätningar med ILRIS kameran

Nedan skall vi ge några mätningar med ILRIS kameran som direkt arbetar vid den intressanta 1,5 µm och således får anses som med relevant för vår problemställning – bakgrundsreflektion vid 1,5 µm relevant för laserradar.



Figur 79. Reflektionsbakgrund upptagen med ILRIS kameran.



Figur 80. Reflektionsbakgrund upptagen med ILRIS kameran. Notera de vita stammarna.

I Figur 79 och Figur 80 visas exempel på reflektionsbakgrunder. Man noterar särskilt de vita stammarna som tyder på hög reflektion. Det är emellertid inte helt säkert att dessa resultat är helt relevanta för ett grindad system. Man måste nämligen fråga sig hur ILRIS mäter intensitet(reflektion). Eftersom man mäter signalamplitud så kan pulsträckning pga. distribuerat mål inom lobbredden, t.ex. löv/barr från ett träd sträcka pulsen så att toppamplituden sjunker. Ett grindat system mäter medelreflektionen över grindluckan något som kan skilja sig från en den reflektion som motsvaras av en toppvärderskännande avståndsmätare. Bilderna ger emellertid en anvisning av hur de inbördes reflektionsintensiteterna kan se ut i en scen.

Figur 81 visar ytterligare en bakgrund där man slås av den kraftiga reflektionen från markstrukturen.



Figur 81. Reflektionsbakgrund upptagen med ILRIS kameran. Notera de vita stammarna. Bilden är ej avståndskompenserad.

Mätningar mot barrskog, se Figur 81 samt Figur 82 för intensitetsbild, visar att reflektionsfaktorn är hög från stammar cirka 0,5, medan barren ger ungefär 0,1-0.2. Mätningen är utförd på hösten.



Figur 82. Intensitetsbild av barrskog.

Under v 35 2003 har mätning mot skogsridå i Kvarn utförts genomförts för noggrann kalibrering av ekvivalent reflektion, se sektion 3.5. Detta eftersom ILRIS-kameran ger en avståndsberoende intensitet som man måste kompensera för. Figur 83, Figur 84 och Figur 85 visar löv respektive barrskogsridå.



Figur 83. Lövverksridå från Kvarn. Reflektionsuppskattningarna är lokala medelvärden i bilden.



Figur 84. Barrskogsridå i Kvarn med tillhörande reflektionsuppskattning.



Figur 85. Intensitetsvärden för barrskog. Notera referenstavlans plats. Noteras bör att förgrunden är borttagen.

Med den avståndskännande laserradarn kan man även beräkna penetrationsgraden i en skogsridå-något som är av stort värde för att bedöma hur lång in i skogen som man kan detektera ett utbrett mål. Den uppmätta barrskogsvyn har en täckningsgrad motsvarande mycket tät barrskog. Laserstrålen når stammar bra in till ca 20 m och toppar något längre.



Figur 86. Penetration i den uppmätta barrskogen med ett uppskattat avstånd på ca 22 m till stammer längst in.



Figur 87. Penetration i lövskog, Kvarn.

Uppmätt lövskog motsvarar tät till mycket tät björkskog med inslag av sly. Penetreringsgraden här var ca 30 m. På detta avstånd syns stammar riktigt bra. Med hjälp av ett enklare program i Matlab, kan vi studera penetrationsgraden statistiskt.

FOI-R--0991--SE



Figur 88. Användargränssnittet för en enkel programvara som beräknar penetrationsgraden i terräng.



Figur 89. Avståndsbild av barrskogsvyn.

Penetrationsdata liksom dess spatiella fördelning är av stort värde för att bedöma hur långt in i skogen man kan upptäcka och segmentera fram ett mål-både för 2-D (passiv och aktiv avbildning) men framför allt i full 3-D avbildning.



Figur 90. Graf över hur stor del i procent av punktskuren som är kvar på givna avstånd. Barrskogsvyn till vänster och lövskogsvyn till höger.

Det är även intressant att plotta avståndsdistributionen i bilden räknat utifrån skogsridåns början. Denna typ av data är av stort intresse inte bara för aktiva utan även för passiva sensorer avseende upptäcktssannolikhet /röjningsrisk för ett förband som skall framrycka över fältet respektive dölja sig i skogen och bevaka det öppna fältet.



Figur 91. Avståndsfödelning i lövskog, Kvarn. Denna typ av data är av stort intresse inte bara för aktiva utan även för passiva sensorer avseende upptäcktssannolikhet /röjningsrisk för ett förband som skall framrycka över fältet respektive dölja sig i skogen och bevaka det öppna fältet.

Man skulle även kunna göra ett "pulsavkännande" filter som letar efter avståndsanhopningar (pulser) på denna en-dimensionella kurva där terrängeko skulle motsvara ett relativt homogen backscatter och ett mål skulle kunna detekteras som en topp / knä på kurvan –i analogi med djupsonderande lasers detektion av mål i vatten. För att detta skulle bli effektivt bör scenen delas upp i mindre fönster så att ett mål skulle uppta en relativt stor del av synfältet.

Nedanstående vy, i Figur 92, visar punktskuren från Polyworks med graf för antalet punktträffar som funktion av avståndet för barrskogsvyn. Grafen visar tydligt "barrkogsväggen" mellan 100-120 m med ett större träd på ca 140 meters avstånd.



Figur 92. Avståndsfördelning i barrskog, Kvarn.

En mätomgång avseende snö påbörjades men fick tyvärr avbrytas pga. Tekniska problem med ILRIS kameran. Figur 93 visar ett exempel på mätningar mot snö med ILRIS kameran. Den extremt låga reflektionen som förväntades enligt Figur 55 bekräftades.

Vatten ger inte heller någon nämnvärd reflektion vid 1,5 µm. Figur 94 visar ett exempel på registrering över vatten. Inga returer erhölls vid detta sneda infall.



Figur 93. En vinterscen från FOI gård i Linköping. Notera den låga snöreflektionen. Den tavla som indikerar 2 % reflektion har markerats. Den undre bilden är inverterad.



Figur 94. Mätning ut över vatten. Inga träffar erhölls på vattenytan. Smålkrusig vattenyta (dm klass).

De erhållna exemplen från sommarterräng verkar ge något högre reflektionsvärden än de klassmedelvärden som indikeras i Figur 54.

# 7.2 Målmätningar

Mätningar mot olika militära mål med bla ILRIS kameran har utförts inom detta och angränsande forskningsprojekt<sup>3,40</sup>. För närmare beskrivning av försöksupplägg och apparatur hänvisas till dessa rapporter. Varje bild kan kalibreras med hjälp av en referenstavla med fyra kända reflektanser, se Figur 95. Referenserna är kalibrerade i samband med leverans från Labsphere<sup>41</sup>.



Figur 95. Kalibreringstavla med fyra kända reflektanser samt bandvagn som objekt (från Älvdalen oktober 2002).

Reflektionen  $\rho$  beräknas i varje mätpunkt genom att jämföra med referenstavlornas reflektans. Detaljer för kalibreringen bl.a. med kompensation för instrumentegenheter och avståndsberoende diskuteras i andra rapporter<sup>3</sup>.

- 99 % reflektans
- 60 % reflektans
- 30 % reflektans
- 2 % reflektans

Vi ger några exempel på reflektion från fordon. I Figur 96 och Figur 97 visas foto och referenstavla av strv 104. Laserradarbilden upptagen med ILRIS 3-D visar att de ljusa delarna på fordonet och det torra gräset har en ekvivalent reflektion mellan 30-40 % med den mörkare delen av fordonet verkar ligga kring 10 % reflektion.

Figur 98 och Figur 99 visar foto och laserreflektionsbild av en ikv. Notera att kamouflagemönstret <u>inte</u> överensstämmer i det synliga och 1,5 µm området. Det som är mörkt för ögat är relativ ljust vid 1,5 µm så när som på något undantag. Kamouflagemönstret försvinner till stora delar i laserbilden. Nivåerna för de ljusa områden i laserbilden verkar ligga kring 30-40 % reflektion.



Figur 96. Foto och laserreflektionsbild av strv 104. Notera den relativt höga reflektionen från nätet ovanpå den bakre delen av fordonet. Omgivande gräs och de ljusa delarna på fordonet verkar ha reflektion kring 30-40 % medan de mörka delarna verkar ligga kring 10 % reflektion.



Figur 97. Bakifrån vy av strv 104.



Figur 98. Foto och laserreflektionsbild av ikv. Notera att kamouflagemönstret inte överensstämmer i det synliga och 1,5 µm området.



Figur 99. Ikv sedd bakifrån.



Figur 100. Pbv 401, notera den relativt låg signaturen för de övre snedställda ytorna.

Figur 100 och Figur 101 visar resultat för MTLB. Denna reflektionsbild skiljer sig något från de övriga fordonen eftersom en låg signatur kan observeras förutom vissa delar av banden och underredet. Vi tolkar den låga signaturen som att ytan är något mer speglande så att de snedställda ytorna reflekterar bort en stor del ev den infallande laserstrålen.



Figur 102. Sidovy T 72.

Figur 102 visar T 72. Notera att den uppvisar till skillnad från MTLB en högre refektion även för snett infall. Reflektionen verkar vara i intervallet 20-40 %. I Figur 103 visas T 72 på 150 avstånd där den låga reflektionskontrasten mot gräsfältet framgår. Notera den goda målbakgrundssegmenteringen i avståndbilderna. Detta visar tydligt styrkan med grindning för at separera mål från bakgrund. Man kan göra denna segmentering automatisk i en full 3-D avbildning via ståndsfilter t.ex. i form av ett Kalmanfilter. Figur 104 visar en upptagning av terrängbil 40 i olika vyer. Notera hur lätt synlig personen inne i bilen är i laserbilden.

FOI-R--0991--SE



Figur 103. T 72 på 150 avstånd där den låga reflektionskontrasten mot gräsfältet framgår. Notera den goda mål-bakgrundssegmenteringen i avståndbilderna t.h.



Figur 104. Bild av terrängbil 40 i tre olika vyer. Notera hur väl synlig personen är i hytten. Notera återigen att medelreflektionen för större delen av fordonet verkar ligga i samma nivå som gräset.

Slutligen visas exempel på ett tätt kamouflagenät, inga laserpulser penetrerade detta nät. Det skulle emellertid vara enkelt att detektera detta som något man made eftersom ingen vegetation normalt är så tät (se kanten i den undre avståndsvyn i Figur 105). Det enda naturliga större objekt som kan ge en så tät avståndsprofil torde vara stenar i terrängen.



Figur 105. Tätt kamouflagenät framför skogsridån. Den undre bilden visar en annan vi avslöjar det "onaturliga" avståndsinnehållet kring nätet.

### 7.2.1 Sammanfattning målmätningar

De flesta fordonsmål verkar ha reflektionsfaktorer mellan 20-50 %, något som inte direkt motsägs av de spektrala reflektionskurvorna i Figur 56 och Figur 57. Kontrasten mot terrängbakgrund i form av gräs och jord är inte så stor varför det är tveksamt om reflektion i detta fall kan hjälpa till i segmenteringsprocessen för ett GV system med bred grindlucka. Mot andra bakgrunder t.ex. snö torde det däremot vara uppenbart att man får en god reflektionskontrast.

# 8 Modellering av GV-system

## 8.1 Implementering och beskrivning av datamodeller

Strukturen som programmet arbetar efter återfinns i Figur 106. Denna struktur fungerar analogt med ett tidigare simuleringsprogram, se Carlsson<sup>42</sup>, utvecklat för att simulera pulsformer från LADAR-system. Ett huvudprogram leder användaren in i de olika inställningsgränssnitten och när dessa är justerade så att önskade förutsättningar för simuleringen erhållits kan beräkningarna påbörjas.



Figur 106. Programstrukturen i simuleringsprogrammet.

En tidig version av de olika inställningsgränssnitten redovisas nedan i Figur 107 och Figur 108. Anledningen till att dela upp gränssnitten i olika delar är för att öka läsligheten och översiktligheten. En extra fördel är att versionhanteringen blir lättare och mer överskådlig.



Figur 107. Inställningar för laserkällan (tv) omfattar våglängd, divergens, pulsenergi, pulsbredd, fokusavstånd och PRF (pulsrepetitionsfrekvens). Atmosfärsinställningarna (th) innefattar bakgrundsljus, turbulens och siktförhållande.



Figur 108. Målinställningarna (tv) utnyttjar en utifrån genererad modell och väljer avstånd och aspektvinkel mot vyn. Mottagaren (th) har parametrar för optiken, sensorn, grindluckan och elektroniken.

### 8.1.1 Genomförande av beräkningar

När alla parametrar som beskriver simuleringen har ställts in, kan beräkningarna påbörjas. Figur 109 visar gränssnittet som används vid beräkningarna. Det ger möjlighet till två typer av beräkningar. Den första metoden utgår från en befintlig bild exempelvis tagen från kamera, TV, IR-kamera eller en passiv bild från ett grindat system. Bilden förutsätts vara tagen på förhållandevis nära håll och ej påverkad av speckle eller turbulens. Den andra metoden utgår från en konstgjord miljö beskriven som en 3D-miljö som innehåller information om bland annat reflektion hos varje material.

FOI-R--0991--SE

Gated Viewing Calculation v1.0 (LYSIM/LADAR)					
Gated Viewing Calculation					
I Beam mapping Image (fig 32)	Gate Center Start (m) 6980				
Depth Dot Plot (fig 32)	Gate Center Step (m) 0.15				
Beam mapping	Gate Center End (m) 7030				
Gate Center (m) 7000	# Images per Step 1				
	Calculate Gate Sequence				
Calculate single Slice					
	Beturn to system acttings				
Push the yellow button					

Figur 109. Användargränssnittet använt för beräkningarna.

## 8.1.2 Degradering av bild

Vid degradering av befintliga bilder uppstår fall som är svåra att generalisera. Av denna anledning har beräkningarna genomförts utan grafiskt gränssnitt och anpassats efter motivet och situationen. I stora drag har ursprungsbilderna varit bilder tagna på nära håll med obefintlig turbulens och atmosfärsdämpning, då de flesta parametrar redan har varit låsta av det insamlande systemet. Några exempel på låsta parametrar är våglängd, scenario och insamlingssystem.

Degraderingen består i försämrad sikt samt tillförd turbulens och målspeckle. Även inställningarna av insamlingssystemet har påverkat bilden med bland annat sin upplösningsbandbredd.

### 8.1.3 Generering av bild från 3D-miljö

För att generera bilder från en 3D-miljö krävs en avancerad och kraftfull simuleringsmotor. Denna har utvecklats för tidigare projekt men har för dessa simuleringar uppdaterats och anpassats. Figur 110 visar några nödvändiga delberäkningar i simuleringen och återger miljön färglagd på olika sätt.



Figur 110: Genererat scenario. Uppe visas en avståndsbild (tv) och en ytnumreringsbild (th). Nederst visas en normalvinkelbild given i grader.

Ytnummer används för att identifiera specifika ytor för att ge dem individuella reflektionsegenskaper i form BRDF. Ytnormalens vinkel används till att avgöra hur mycket ljus som reflekteras mot mottagaren i varje del av ytan.

Detta startsteg följs av möjligheten att beräkna enskilda bilder från det grindade systemet såväl som sekvenser där grindluckan enligt ett förinställt mönster flyttas mellan varje bild. Ett exempel på simulerad bild visas i Figur 111.



Figur 111: Ett exempel på en simulerad bild från ett GV-system.

Uppdelningen av beräkningarna i ett antal steg ger en möjlighet att byta ut delar av simuleringarna till mer avancerade. Exempelvis kommer snart en möjlighet att modellera retroreflektorer att finnas. Då kommer till exempel reflexer och strålkastare att återges mer verklighetstroget i simuleringarna.

### 8.1.4 Giltighetsområde och osäkerheter

Modellen tillåter simuleringar vid de flesta parameterinställningar, men vissa begränsningar föreligger. En grundinställning man bör ha när man betraktar simulerade bilder är att de inte exakt kan återge en bild tagen med ett befintligt system. Det är alldeles för mycket slump och kaos inbyggt i atmosfärs- och specklescintillationer. Däremot kan den statistiska fördelningen analyseras.

Främst gäller parameterbegränsningarna atmosfärssimuleringarna, där bland annat modellen är begränsad till våglängder mellan 500 och 2000 nm. Vid simuleringar under väldigt stark eller väldigt svag turbulens uppstår även fenomen som inte överrensstämmer med verkligheten. Detta omfattar även långa avstånd som integrerat över hela avståndet till målet ger en stark turbulens. Dessutom har 3D-miljön som beskriver målet, för att snabba upp beräkningarna, reducerats i antal trianglar och vid stor förstoring kommer detta återspeglas i resultatet. Antalet trianglar i 3D-miljöerna har i simuleringarna legat runt 100 000.

# 8.2 Verifiering av systemmodell samt ytterligare simuleringar

Modellarbetet har resulterat i tre simulerade situationer.

### 8.2.1 Bild genererad från 3-D-miljö för validering

Som originalsekvens används en sekvens tagen med grön laser (532 nm) i Bondeby-Kvarn i februari 2003. Bilderna visar en terränglastbil tgb30 på 1900 meters avstånd i 45 graders vinkel mot systemet. Det var på kvällen och turbulensen  $(C_n^2)$  uppmättes till ca 4  $10^{-14}$  m<sup>-2/3</sup>. Sikten var ungefär 45 km och därmed betydligt längre än vägen till målet.



Figur 112: Jämförelser mellan riktiga sekvenser (tv) och sekvenser simulerade utifrån en 3D-modell av målmiljön (th).

Den simulerade sekvensen, se Figur 112, utnyttjar en modell av tgb30 framtagen vid FOI och en enkel mark och skogsbakgrund. Den största skillnaden mellan uppmätt och simulerad sekvens är retroreflexer och reflexplattor som inte simuleras i denna generation av simuleringsprogrammet. En annan skillnad är intensitetsnivån på bilderna. Detta kommer sig av att kameran utnyttjar sig av en oavläsbar manuell föstärkningsinställning medan simuleringarna använder sig av en automatiskt inställd förstärkning. Storleken hos speckleoch turbulensceller är dessutom svår att avgöra vid stillbilder, men vid en undersökning av filmsekvenserna kan en stor likhet iakttas. Den högsta spatiella frekvensen i bildbruset har inte återgivits bra men kan nog förklaras av förenklingarna av turbulensen.

# 8.2.2 Degenerering av befintliga bilder (med grön laser) för validering

För att validera degenereringen av bilder används en serie bilder tagna med grön laser vid fältförsök i Älvdalen och Kvarn vid olika tillfällen. De är tagna på olika avstånd (14, 10, 7 och 1,9 km) och ska representera olika avstånds- och turbulensförhållanden. Originalbilderna använda för degenerering kom från digitalkamerafoton tagna på nära avstånd mot målfordonet. För att representera reflektionen vid 532 nm valdes det gröna bandet i bilderna ut. En nackdel med denna metod är att bilderna är tagna med en ljuskälla (solen) ej placerad på samma ställe som kameran, vilket resulterar i skuggor som inte uppstått vid aktiv belysning såsom vid ett grindat system. Med detta i åtanke kan man betrakta simuleringarna återgivna i Figur 113.



Figur 113: Jämförelser mellan simulerade grindade bilder och originalbilder vid 532 nm. Bilderna är tagna vid 1,9, 7, 10 och 14 km.

Resultatet får klassas som bra förutom 14km-fallet vilket kan förklaras utifrån svårigheter att simulera stark turbulens korrekt.

### 8.2.3 Degenerering av befintliga bilder (simulerad 1550nm-bild)

För att simulera 1550nm-fallet användes bilder tagna dels passivt med InGaAs och solen som belysning och dels Optech ILRIS 3D-skanner. Den förstnämnda har samma nackdel som nämndes vid 532nm-degraderingarna med solen som belysningskälla, och den sistnämnda har istället problemet med att punkterna enbart är punkter i rymden och inte en 2-dimensionell kamerabild.

Figur 114 visar en utvald InGaAs-kamerabild, medan Figur 115 visar de degenererade bilderna med varierad turbulens och varierat avstånd. Strålstorleken varierar även på grund av felinställd divergens för att passa med avståndet. Det simulerade sytemet har varit ett GVsystem med en InGaAs-kamera (med parametrar från tillverkaren) och en laser i 1550nm. Vid längre avstånd (>5km) blir turbulensens effekter för stora vid mark-markförhållanden. Vid luft-markförhållande borde bättre förutsättningar finnas för bra bilder vid längre avstånd. Dessa simuleringar är dock ännu inte genomförda.



Figur 114: Originalbild tagen med InGaAs-kameran. Passiv bild med med en T72 som mål.



Figur 115: Simulerade pålysbilder av T72 på varierade avstånd och under varierade turbulensförhållanden.

Försök gjordes även att degradera bild tagen från ILRIS. Efter svårighet att hitta rätt aspektvinkel och betraktningsavstånd har originalbilden fortfarande vissa svarta fält vilket ses till vänster i Figur 116. Reflektansen är inte kalibrerad, men ger en ungefärlig bild av det reflekterade ljuset från en tänkt laserstråle vid 1550 nm. Den degenererade bilden visas til höger i samma bild, och borde ge ett bättre överrensstämmande resultat än i det föregående fallet. Målet är en Tgb40 med flak och de simulerade situationen förutsätter 1,9 km avstånd och ganska hög turbulens. Systemet efterliknar den tidigare beskrivna InGaAs-kameran.



Figur 116: Tgb40. Originalbild till vänster och en degraderad bild till höger.

# 9 Systemaspekter

I detta avsnitt skall vi försöka analysera några systemfall av potentiellt intresse för försvarsmakten. De fall som avses har valts att representera olika fall: mark-luft, luft-mark, luft-luft samt mark-mark.

A/ Luftvärn—måldetektion, målföljning av luftmål utnyttjande grindad avbildning.

B/ Långräckviddig måligenkänning från fpl/hkp eller UAV.

C/ Användning i fpl tillsammans med -IRST/radar för ingenkänning, följning av andra luftmål.

D/ Användning i stridsfordon/UGV för att identifiera andra fordons/markmål.

E/ Handhållen korthållskikare för spaning och måligenkänning.

F/ Marina tillämpningar.

Vi skall försöka diskutera dessa system från ett spelkortsliknande upplägg. Detta innebär att bla följande delar berörs:

- Diskussionen rörande användingssätt
- Samverkan med andra system/sensorer för invisning
- Flerfunktionsfrågor-avståndsmätning, laserutpekning mm.
- Röjningsrisk, belysningstider
- Användning av flera våglängder

- NBF synpunkter, som t.ex. bistatiska system
- Grundläggande systemparametrar
- Prestanda
- Tekniknivå idag och i framtiden bla strålkontroll

# 9.1 Teknikläget kameror för grindad avbildning vid 1,5 μm

Grindade rör har funnits en längre tid för kortare icke ögonsäkra våglängder. Intevac i USA har utvecklat ett rör känsligt vid 1,5 µm som prövats i USA för flera utveckling inom alla vapengrenar. Den s.k. "Transferred Electron" (TE) fotokatoden kombineras med "electron bombardement" (EB) kiselbaserad kamera del. Elektroner slås ut från fotokatoden och faller in till en CCD array som ger ut en högupplöst videobild. Förstärkning som medger "enfotondetektion" sker i via en elektron-bombardemangprocess i kisel.



Figur 117. T.v. principen för Intevacs grindade bildförstärkarrör. T.h. olika fotokatoder som kan kombineras med CCD delen. Kurvan t.h. i bilden (InGaAs/InP (950 to 1650 nm)) är relevant för ögonsäker användning vid 1,5 µm. Notera att även Nd:YAG våglängden vid 1,06 µm kan användas. Bilder från <u>www.intevac.com</u>, okt 2003.

Tabellen nedan (<u>www.intevac.com</u>, okt 2003) ger lite data om röret samt lite om de system i vilka man i USA planerar att införa denna teknik. Liknande planer finns i flera Europeiska program , bl.a. England-Frankrikes flygburna pod Joanna. Kostandsuppskarrning motsvara ca 45 kkr/rör i dagens dollarkurs.

#### Weapon Systems/Secondary Items Impacted

- Unmanned Aerial Vehicle (UAV)
- Future Combat Systems (FCS) Troop Carrier
- A Crew Served Weapon Sight
- M1A1/A2 Abrams Main Battle Tanks
- Potential Air Force systems including the Lantern, F18AT, P-3, F-117
- Apache, Kiowa, and Cobra Helicopters

#### Potential Cost Avoidance

- \$54,000,000 for projected 1,200 tube units per year over ten years.
- · Benefit-to-Investment Ratio (BIR) of approximately 15:1.

Nuvarande prestanda hos Intevac-röret framgår av deras hemsida:

#### Tabell 10. Specifikation Intervac. Tabell från <u>www.intevac.com</u>, okt 2003

Camera/Sensor	Model 120 (TE-EBCCD) SWIR gated camera	
	13 μm square pixel	
	Resolution > 32 lp/mm	

	QE > 15% @ 1,5 μm
	Cathode dark current $< 50 \text{ nA/cm}^2$
	Camera Frame Rate = 17 Hz
Gating	Range Resolution 2.5 ft
	Gate width resolution 2.5 ft
	Minimum gate width 150 ns
	Electro-Optic rise / fall time approximately 30 ns
Video	10 bit Digital Video, 512 x 512 pixel format

Intevac marknadsför även en komplett laserradarutrustning (LIVAR) för långräckviddig övervakning för t.ex. tull och polis.



Figur 118. T.v. Intevacs LIVAR utrustning innhållande laser, optik och GV kamera . T.h. Exempel på bilder för detaljigenkänning av t.ex. båtnamn/nummerplåtar etc. på långa håll (1-2 km). Bilder Intevac.

Även andra system för grindad avbildning utvecklas för civila och militär användning. Här kan vi nämna det kanadensiska ELVISS (Enhanced Low-light-level Visible and Infrared Surveillance System) som kombinerar 3-5 µm kamera och en grindad generation 3 kamera för igenkäning på långa avstånd. Der kan vara av intresse att nämna att man använder sig av en 30 W laserdiodarray som belysare. Liknande system har även rapporterats på andra håll, se Figur 119. För 1,5 mm området torde pulsade fiberlasrar kunna vara av intresse. Dessa kan ge mycket höga medeleffkter (100 W eller mer) och mycket korta pulser med hög prf (50-100 kHz). I detta fall kan man integrera många pulser per frame och få en ekvivalent eller högre belysningsnivå jämfört med låg pulssystem av avståndsmätar-/målutpekartyp.



Figur 119. Överst, laserdiod-belysare för det kanadensiska ELVISS systemet och under CALI för längräckviddig igenkänning av mål inklusive text mm. Bilder från CALI<sup>43</sup>.

Vi omsätter dessa prestanda till följande antaganden:

Tabell 11. Översiktliga parametrar för ett antaget system med grindad avbildning (GV) för långräckviddig mål igenkänning.

Parameter	1,5 μm GV system idag	1,5 µm GV system 2010 ?	
Pixelstorlek	15 μm	10 µm	
Fokallängd	1,5 m	1,5 m	
Laserpulsenergi totalt	? Joule	? J	
integrerad över flera			
pulser			
σ /km	Varierar med sikt	Varierar med sikt	
$\theta_{Laser}$ mrad	0.3 mrad	0.3	
	0.017	0.017	
$A_R m^2$	(15 cm diameter)		
$\rho_{\rm m}$	Varierar	Varierar	
$A_{Ta} m^2$	Varierar	Varierar	
$\eta_{sys}$	0.22 0.22		
	5E-20 J/pixel	5E-20 J/pixel	
ENI	-	-	
SNR <sub>T</sub>	3 3		

# 9.2 Fall A/ Luftvärn—måldetektion, målföljning

### 9.2.1 Användningssätt

Lasersystemet utnyttjar befintlig eller uppgraderad avståndsmätare. Alternativt har GV systemet en separat laser. Invisning via radar följt av optisk sensor. TV eller IR-sikte torde kunna ge den erfordrade vinkelföljenoggrannheten för att matcha laserloben på antagna 0.3 mrad. Lasern slås på efter det att följning i EO sensorn etablerats. Om man använder sig av en

normal LV laserfrekvens (10-20 Hz) så kanske 5-10 bilder är lämpliga att integrera för att underlätta igenkänning.

Genom att glida med kort grindlucka kan man generera 3-D avbildning av målet. Ett antal successiva grinluckor användas för att bygga upp en 3-D bild som underlättar för automatisk måligenkänning. Det krävs ca 200 pixlar på målet och 15 cm avståndsupplösning för att nå goda resultat med ATR<sup>33</sup> utnyttjande 3-D.

För att kunna utnyttja glidande lucka för 3-D liknande avbildning mot ett snabbt rörligt mål som t.ex. ett flygplan, är det viktigt att man kan grinda röret mycket snabbt för tidsmärkning av den pålysta delen av flygplanet. Figur 120 visar det schematiskt. Om flygplanet ligger i snabb sväng kan säkerligen viss tvetydighet mellan de olika grindluckornas lägen erhållas.



Figur 120. Illustration av problemet med tidssynkronisering av grindpulser för 3-D avbildning mot ett rörligt mål. En separat lasermottagare kan användas alternativt kan avståndsmätar-funktionen integreras i själva bildförstärkaren. Efter en tröskeltidpunkt T=0 läggs grindluckan ut med ökande fördröjning  $\Delta T$  i steg om 1-3 ns för att uppnå en högupplöst djupbild

Man kan även tänka sig att följa på GV bilden (videomålföljning) om denna uppdateras snabbt >10 Hz. Fördelen skulle vara att man i sämre väder samt undre mörker kan uppnå bättre följeprestanda än med IR / radar. Dessutom kan man följa i avstånd och inte bara i sida som från konventionell TV målföljning.

Om laserenergin är tillräckligt hög kan man se genom moln. Hur mycket dämpning som kan tolereras beror naturligtvis på systemet, avstånd, väder och målets reflektion. I praktiska fall bör 40-50 dB total dämpning (tvåvägs) kunna uppnås. Detta innebär ca 80 -100 meter för tjocka moln och 300 meter eller mer for moderat täta moln. Figur 121 visar exempel på mätningar och illustration av möjligheter att identifiera flygplan bakom moln.



Figur 121. Möjlighet att se genom moln med GV system. Det torde vara lämpligast när systemet är inne i molnet och "tittar ut", Om målet är inne i moln kommer multipelspridning att försvara spridningsundertryckning vid tidsgrindning. Bild från FOI.

Andra möjligheter som underlättar måligenkänning är GV teknikens möjlighet till siluettbilder. Siluettbilden underlättar även signalbehandling för bildförbättring eftersom målets yttre kanter kan extraheras. Siluettbilden kan uppnås om tillräcklig ekvivalent reflektion uppnås från atmosfären inom grindluckan. Den ekvivalenta reflektiviteten  $\rho_{atm}$  för atmosfären är:

$$\rho_{atm} = \pi \cdot \beta \cdot \Delta L_g \text{ för } \sigma_{ext} \cdot \Delta L_g < 1$$
$$\rho_{atm} = \frac{\pi \cdot \beta}{2 \cdot \sigma_{ext}} \text{ för } \sigma_{ext} \cdot \Delta L_g > 1$$

där  $\beta$  är bakåtspridningskoefficienten,  $\sigma_{ext}$  atmosfärens extinktionskoefficient pga. aerosoler och  $\Delta L_g$  är gateluckans längd. För gateluckor längre än atmosfärens dämpningslängd (1/ $\sigma_{ext}$ ) blir atmosfärens ekvivalenta reflektion konstant. För visuella våglängder inträffar detta för  $\Delta L_g > 1/\sigma_{ext} = V/4$  där V är visuell sikt. Figur 122 visar bakåtspridningskoefficienten  $\beta$  och kvoten  $\beta/\sigma_{ext}$  som funktion av extinktionskoefficienten  $\sigma_{ext}$ . Laservåglängd 1,06 µm. Vi ser att den ekvivalenta reflektiviteten uppgår till knappt 10 % mot moln och dimma (höga extinktionsvärden) med lucklängder >  $1/\sigma_{ext}$  men är betydligt mindre för kortare luckor och normal atmosfär. För en 10 meters lucka t.ex. är  $\rho_{atm}$  ca 0.1 % vid dis (dämpningskoefficient  $\sigma_{ext}=1/km$ ) och ca. 0.003 % vid klart väder ( $\sigma_{ext}=0.1/km$ ). Vi ser alltså att en grindat system verkligen minskar kontrastförlusten i atmosfären.



Figur 122. Bakåtspridningskoefficienten  $\beta$  och kvoten  $\beta/\sigma_{ext}$  som funktion av extinktionskoefficienten  $\sigma_{ext}$ Laservåglängd 1,06  $\mu$ m. Bild från FOI.

#### 9.2.2 Samverkan med andra system/sensorer, flerfunktion

GV systemet integreras på siktesplattform och samverkar med radar, IRST / FLIR och avståndsmätare. Alternativt innehåller utnyttjas samma laser för avståndsmätning och bildgenerering.

#### 9.2.3 Röjningsrisk, belysningstider

För ett kanon LV kommer GV systemet att användas på ett liknande sätt som laseravståndsmätaren. Belysningstiden är flera sekunder. Röjningsrisken dvs att luftmålet detektera lasern finns, frågan är om man kan motverka på ett bra sätt. Via grindfunktionen är GV systemet/avståndsmätningen relativt störsäker. Man behöver dessutom inte sända med helt konstant laser prf.

### 9.2.4 Användning av flera laservåglängder

Man kan även fundera om att utnyttja både 1,06 och 1,5 µm samtidigt eller separat (växla bilder mellan våglängder) för att förstärka möjligheten att se olika delar av målet t.ex. optisk sensorer.

Eventuellt kan man konvertera en del av sändarlasern till andra våglängder för bländning av motståndaren och hans sensorer.

### 9.2.5 NBF-synpunkter

I princip kan man tänka sig att laserbelysningen kommer från en annan plats än mottagarens. Dock torde synkronisering pga. tidsgrindning försvåra detta förfarande. Om "nätverket" tillhandahåller målposition kan man tänka sig bistatiska lösningar. En annab tänkbar utvidgning av konceptet är att lasern målbelyser för en robot med lasermålsökare t.ex. i form av en 3-D FPA sensor.

### 9.2.6 Grundläggande systemparametrar och prestanda

Med de parametrar som finns i tabell 1 kan vi uppskatta räckvidd som funktion av visuell sikt mm. I Figur 123 har vi avsatt räckvidd för SNR=3 och varierande visuell sikt. Vi har varierat laserpulsenergin från 100 mJ till 0.01 mJ/puls. I Figur 124 har vi beräknat räckvidd som funktion av systemfaktor F som är proportionell mot

$$F = \rho_m A_R E_P q$$
$$q = \min(A_{Ta} \cdot 4 / (\pi \theta \cdot R)^2, 1)$$



Figur 123. Räckvidd för ett GV system som funktion av visuell sikt i km. Målet antas ha en tvärsnittsarea  $A_{Ta}=5 \text{ m}^2$  och en diffus reflektionskoefficient  $\rho_m=0,1$ . I övrigt data enligt tabell 1.



Figur 124. Räckvidd för GV system enligt tabell 1 för olika systemfaktorer F och olika visuell sikt i km.

där  $\rho_m$  är målreflektans,  $E_p$  laserpulsenergi,  $A_R$  mottagararea och q överlappsfaktorn mellan målet och strålen. F=1 motsvara data i tabell 1 och  $E_p=1$  mJ. Från Figur 123 och Figur 124 ser vi att möjlig räckvidd för ett 100 mJ system t.ex. kan överstiga de ideala igenkänings- och identifieringsavstånden som uppskattas i tabell 2 (18-34 km för lång gate GV) för en visuell sikt < 10 km. Emellertid är upplösningen turbulensbegränsad speciellt för sneda banor. Figur 123 baseras på beräkning av minsta upplösningvinkel i turbulens via beräkning av Frieds parameter  $r_0$ . Vi har valt avståndet 25 km. Som synes är vinkelupplösningen diffraktionsbegränsad (drygt 10 µrad i detta fall) för målhöjder > 1 km. För 100 meters målhöjd och 25 km avstånd är den turbulensbegränsade upplösningen ca 40 µrad vilket motsvarar ett igenkänningsavstånd av 8,5-17 km och ett identifieringsavstånd mellan 4-9 km beroende på grindlucka (1-32) och bildintegration (1-8 bilder). Antalet fotoelektroner per bild som funktion av avstånd, antalet speckler inom mottagaren och optimalt N för konstant totalenergi *E* ges i detta exempel av Tabell 12 för sikten 20 km. Vi antar här att vi totalt har ca 1000 pixlar.



Figur 125. Turbulensbegränsad upplösningsvinkel som funktion av målhöjd. Turbulens enligt värden i figuren. Målavstånd 25 km.

Avstånd	Antal speckler	K/per frame	K/pixel	N <sub>opt</sub> för konstant
km	inom mottagaren			energi
	М			
42	28,2	1116	1,11	1,4
30	55,6	7817	7,8	2,5
20	125	50822	50,8	3,3
10	500	587376	587	2,3
5	2000	$3,9*10^{6}$	3900	1 (0,99)
1	50 000	$152*10^{6}$	$1,5*10^5$	1 (0,06)

 Tabell 12. Antalet fotoelektroner per bild som funktion av avstånd, antalet speckler inom mottagaren och optimalt N för konstant totalenergi E

Enligt denna uppskattning skulle det möjligen löna sig att använda 30 mJ och integrera 3 bilder för att uppnå goda prestanda mellan 20-30 km i stället för att "skjuta" en puls på 100 mJ. Vi ser att K>1000 fotoelektroner / bild för alla avstånd om vi kräver ett SNR<sub>pixel</sub>>3. Vi befinner oss alltså i det speckledominerande domänen. Om man inte har ett krav på att den totala laserenergin skall vara konstant lönar det sig att integrera många bilder. Hur många bilder som ska integreras begränsas av förmågan till rörelsekompensering som behövs i de fall då målet rör sig under exponeringarna.

Man kan tänka sig att om man kan bemästra rörelsekompenseringen så skulle det vara möjligt att integrera >10 bilder och sänka laserpulsenergin till 10 mJ. En begränsning är också att målet inte bör ändra aspekt eller storlek under medelvärdesbildningen vilket främst uppstår på korta avstånd. Om vi antar kommande eller gående kurs för målet med Mach 1 och 6 meters utsträckning ca 20 km avstånd så motsvarar ändringen i skala ca 1/3 pixel. För sidovy får vi anta att en korrelationstracker eller motsvarande kan hålla följenoggrannheten kring 1 pixel eller mindre.

### 9.2.7 Tekniknivå idag och i framtiden

Idag klarar man att bygga 100 mJ/puls lasrar med 3-5 ns pulslängd. Befintliga rör kan grindas så att 0.5-0.7 meters djupupplösning kan erhållas. Framtida rör kan antas klara 1 ns styrning av gatetiden och tillsammans med kortpulslasrar (ns) medge kanske 15 cm djupupplösning. Detta skulle väsentligt öka informationsinnehållet i bilden och öka igenkänings- och identifieringsavstånden kanske med en faktor 2! (jämför med Tabell 12 ovan).

Vi har i detta LV fall antagit ca 0.3 mrad divergens. Detta är optimalt för det avstånd att loben precis täcker målets yttre kontur. Framtida mikrospeglar eller Spatial Light Modulation (SLM) komponenter kommer att medge dynamisk divergenskontroll som anpassas till detektionsavståndet.

Igenkänings- och identifieringsavstånden verkar bli turbulensbegränsade för låga mål (< 100 m). Målinducerade speckler kan medelvärdesbildas bort i hög utsträckning. En tänkbar kompensering av turbulensen är att applicera en dubbelpulsteknik där den först pulsen probar atmosfären och ger underlag för en adaptiv faskontroll via en SLM. Villkoret att atmosfären kan anses "frusen" mellan probpulsen och den "riktiga" pulsen. Detta kräver att pulsavståndet är mindre än atmosfärens korrelationstid  $\sqrt{\lambda L} / V_{tvär}$  där  $V_{tvär}$  är medeltvärvinden vinklerät mot strålen. Denna tid kan vara i ms område.

Vorontsov och Carhart<sup>44</sup> har nyligen demonstrerat en elegant adaptiv strålkontroll. Denna baseras på att uppskatta intensiteten i mottagarplanet för att kunna reducera laserbelysande lob i målet. Eftersom specklestorleken från målet är  $\lambda L/D_{stråle}$  så skulle en reduktion av  $D_{stråle}$ ge färre specklelober över mottagaren och bättre belysning/koncentration i målet. Metoden är nog bäst lämpad små mål med mycket överspill av laserloben. Exempel på små mål är UAV samt robotar. I det ideala fallet kan man styra fasen genom att minimera kontrasten i det mottagna specklefältet så att man endast få ett fåtal eller en enda specklelob i mottagaren. Detta motsvaras av en koherent retur varvid andra konventionell adaptiva kompensationsmetoder kan tillämpas för att reducera det kvarvarande fasfelet.

Användning av adaptiv optik är emellertid ännu så länge en dyr och komplicerad teknik som bör vägas mot konventionella bildförbättringstekniker.

# 9.3 Fall B/ Spaning, målinmätning från fpl/hkp eller UAV

#### 9.3.1 Användningssätt

Nedanstående diskussion är även till stora delar tillämplig på UAV/UCAV. Under ett attackuppdrag får fpl målangivelse från t.ex. en höghöjds UAV som detekterar mål via radar (t.ex. CARABAS) eller pejlar in emitter via signalspaning. Målet bedöms viktigt att slå ut och JAS får ett attackuppdrag. En tänkbar attackpod kan vara en state-of-the-art pod som Litening från Rafael eller Sniper från Lockheed Martin. Figur 126 visar en genomskärningsbild av den 2,20 m långa och 40 cm breda poden. FLIR används för målspaning och måligenkänning samt laser för målinmätning och utpekning för laserstyrda bomber eller robotar.

Ingående Gen III (3-5micron) FLIR har en 640\*480 pixelarray som opererar i 3-5 µm området. Vidare ingår en CCD/TV sensor. Synfältet kan varieras i steg mellan WFOV: 18,4 x 24,1, MFOV: 3,5x3,5 samt NFOV : 1x1 grader. Poden innehåller en 100 mJ laser som kan emittera vid 1,06 µm samt även vid den ögonsäkra våglängden 1,5 µm. Pulsrepetitionsfrekvensen kan uppgå till ca 20 Hz. Dessutom innehåller den en IR target marker, förmodligen en diodlaser som kan peka ut mål för bildförstärkarförsedda enheter i luften eller på marken. En laser spot tracker i poden tillåter snabb lokalisering av laserutpekade mål från mark eller andra flygande enheter. Vi skall i det följande diskutera hur denna befintliga laser skulle kunna utnyttjas för måligenkänning antingen via grindad avbildning eller på sikt via full 3-D avbildning av målet. Notera att laserbelysning från marken eller annat flygplan även borde kunna utnyttjas av lasermottagaren i fpl för igenkänning.



Figur 126. . T.v. Litening pod III från Rafael. T.h. poden instalerad på en F 16. <u>http://www.defense-</u> <u>update.com/directory/litening.htm</u>.

Vi skall här försöka kommentera en del av problematiken i attackuppdraget:

- Måldetektion
- Målinmätning-målföljning
- Räckvidd och målegenskaper för måligenkänning av t.ex. fordon, LV enheter etc.
- Prestanda för måligenkänning under sämre väder
- Prestanda för måligenkänning i terrängskyl eller kamouflage
- Verkansverifiering

#### 9.3.1.1 <u>Måldetektion</u>

Denna kan ha skett utifrån en annan sensor som länkar (absoluta) målkoordinater till JAS. Beroende på JAS attityd och positioneringsnoggrannhet kan man lokaliserar en tänkbar "målsfär" på gissningsvis 100-200 meters onoggrannet. Om man kan relatera målets position till andra inmätta fixpunkter i terrängen t.ex. vägskäl eller hus kan denna osäkerhet reduceras något. I alla händelse bör målpositionen vara fullt tillräcklig för att kunna rikta in IR eller TV/CCD sensorn för måligenkäning.

För måldetektion från det egna flygplanet måste man använda FLIR sensorn i olika förstoringsgrad och avsöka misstänkt del av terrängen. Detta tar längre tid och kan vara svårt speciellt i en stressande LV-tät miljö.

En detektionsförmåga som kan adderas till systemet är att amvända IR target markern eller Nd:YAG laser tillsamman med en bildalstrande mottagare typ grindbar bildförstärkare för att plocka upp reflexer från optiska siktessystem som följer flygplanet. Detta kan ske på avstånd väl över 10 km och med en bred laserlob (någon grad eller så) som avsöker terrängen efter sådana reflexer. Vid upptäckt kan man tänka sig att blända siktessensorn eller operatören.



Figur 127. Räckvidskravet för framtida attackuppdrag kommer att uppgå till 20 km eller mer för markmål.

Dayton<sup>45</sup> et.al. anvisar en metod för att med en relativt låg energi laser (0,085 mJ/puls) nå markmål över 20 km genom att scanna och foga samman flera delbilder. Man har genom att iterativt korrelera flera överlappande delbilder med varandra en möjlighet att ta bort atmosfärens tilteffekt (image dancing). Detta gjorde vi på ett annat sätt i vår tidigare GV rapport<sup>11</sup>.

### 9.3.1.2 Målinmätning-målföljning

Med laseravståndsmätning och positionering/riktningsbestämning från plattformen kan målet lokaliseras inom 20-40 meter på 10-20 km avstånd under antagande om state of the art avseende positioneringsprestanda. Om målet befinner sig nära vägskäl eller andra kända landmärken kan denna noggrannhet förbättras. Målföljning sker vanligen med passiv EO sensor utnyttjande korrelationsfönster eller centroidföljning i trösklad bild. Båda dessa metoder kan förbättras avseende robusthet mot terrängklotter, snabba målrörelser eller skenmåls /motmedelsinsats (rök,facklor..) genom att addera laserföljning utnyttjande 2-D eller 3-D tidsstyrd avbildning. Ett avståndsfilter förbättrar väsentligt följeprestanda.

#### 9.3.1.3 Måligenkänning med grindad avbildning (gated viewing, GV), attackpod

För måligenkänning av mål av fordons storlek krävs ca 25 cm pixel på målet fört ett typiskt mål av ett fordons storlek. Man kan släppa laserstyrda bomber eller robotar från avstånd på 10 km eller något mer, beroende på vädersituationen. Låt oss försöka uppskatta måligenkäningsavståndet för FLIR kameran. Om vi antar smalt synfält (NFOV) på 1\*1 grad och en arraystorlek på 640\*480 pixlar så erhålles en <u>instrumentupplösning</u> på 27\*36 µrad eller 27\*36 cm<sup>2</sup> stora målpixlar på 10 km avstånd. Om vi antar en optikdiameter på 20 cm erhålles en diffraktionsbegränsning i vinkel på ca  $\lambda D$ = 20 µrad för våglängden 4 µm och diametern 20 cm. Alltså kan vi uppskatta igenkäningsavståndet för fordon på maximalt 10 km förutsatt att:

Målet har en tillräcklig kontrast mot omgivningen, något som möjligen kan ifrågasättas speciellt under vintertid för detta våglängdsområde samt under disiga förhållanden. Målet är separerat från omgivningen på ett urskiljningsbart sätt. Detta kan vara svårt för mål i terräng, mål med starkt klotter som solbelyst terräng, kamoflerade mål etc. Följande laserfunktioner kan förstärka eller möjliggöra måligenkänning på långa avstånd; Avståndsavbildning (2D eller på sikt 3-D) extraherar mål ur bakgund- (segmentering) och kraftigt underlättar mål IK antingen via operatör eller via på sikt via automatik. Samutnyttjande av 1,06 samt 1,5 µm laservåglängd förstärker möjligheten.

#### 9.3.1.4 Måldetektion-målspaning för fordon i skog och i urban miljö

Ett speciellt svårt problem är fordon i <u>terrängskyl</u>. Man kan tänka sig en spaningsfunktion med relativt bred lob där man ställer grindluckan så att man endast avbildar 2-3 m ovanför marknivå. En avståndsmätare kan tracka terränghöjdsvariationer och trigga grindluckans läge. På så sätt skulle man kunna öka förmåga at detektera och känna igen fordon i skog. Denna möjlighet är större med en full 3-D FPA avbildning men även GV kan användas för uppgiften. Man kan tänka sig en spaltformig lob som avsöker terrängen under den flygande plattformen. Med en dynamisk lobformning skulle man även kunna fokusera strålen och få längre igenkänningsavstånd.

I <u>urban miljö</u> är möjligheterna för fordon och andra mål att gömma sig i skuggan av husväggar uppenbara. Miljön ger även en besvärlig klotterbakgrund för IR. Ett GV system kan reducera eliminera inverkan av skuggor och dessutom utnyttja siluett för detektion - här utgör husväggar och gatuplan utmärkta "filmdukar".



Figur 128. Principbild för att se ned i terräng med GV system. Om man avbildar marknivån och lägger grindluckan 2-3 meter ovanför mark bör möjligheten att detektera och känna igen mål öka väsentligt jämfört med att passivt EO system. Bilden under är upptagen med en streakkamera och visar övelappande vyer samt bilder från först och sista eko. Från Gelbart et.al <sup>46</sup>.

# 9.3.2 Röjningsrisk, belysningstider

Med fpl/hkp eller UAV i moln kan man undgå optisk upptäckt, men grindad avbildning ger däremot förmågan att "se ut" från moln. I detta fall måste invisning mot målområdet komma från andra sensorer ("nätet"). Som tidigare sagt kan 200 m osäkerhet vara ett riktmärke. För avståndet 20 km motsvarar detta 10 mrad i lobbredd. Det kan vara av intresse att titta på detektionsprestanda för denna lob. För identifiering kan loben skärpas till 1 mrad eller mindre divergens.

Tyngre luftvärn, stridsfordon kan med stor säkerhet vara utrustade med laservarnare så att en kort belysningstid kort före eventuell vapeninsats eftersträvas. Låt 1-2 sekunders belysning vara ett riktmärke för målklassificering/identifiering.

#### 9.3.3 Grundläggande systemparametrar

För långräckviddsfallet ansätter vi 100 mJ och 20 Hz som basantagande för detta fall. Motiv är bl.a. meranvändning av lasern för målutpekning. Låt en apertur på 15 cm vara riktvärde. I Figur 129 beräknar vi sedan räckvidder för olika lober och väderför-hållanden.

För spanings/måligenkännings-användning från en lågflygande UAV (< 1000 m) kan man minska aperturen till 5-10 cm och laserenergin till storleksordningen 10 mJ. Liksom i de förra räckviddsberäkningarna antar vi att så kort grindlucka används att systemet blir sensorbrusbegränsat.



Figur 129. Räckvidd för ett GV system med 100 mJ/puls och olika lobbredder lämpade för olika flygtillämpningar. Optikdiameter 5-15 cm.

Upplösningsbegränsning till följd av turbulens är betydligt bättre för nedåttittande bana. Som framgår av Figur 130 verkar turbulensen upplösningsbegränsande först under 100 meters flyghöjd för ett målavstånd på 25. Våglängdsinflytandet på upplösningen anges i Figur 131 för olika sensorhöjder med mål på avståndet 25 km.



Figur 130. Upplösningsvinkel  $\lambda r_0$  pga. turbulens för en flygande sensor. Avstånd 25 km.



Figur 131. Upplösningsvinkel (MTF reduceras till 2 %) visavi laservåglängden  $\lambda$ . Angivet finns även sensorhöjd. Turbulens i marknivå är  $C_n^2(1) = 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$  och  $C_n^2(h) = C_n^2(1) h$ -a.

#### 9.3.4 Tekniknivå idag och i framtiden

För flygburna tillämpningar studeras GV intensivt (US Air Force Eraser program samt Combat Eye<sup>47</sup> som tillåter att se genom moln samt använda grindning över målet). I Europa pågår inom programmet Joanna (UK, Frankrike) med krav på långräckviddig måligenkänning av fordon över 20 km avstånd.

Även i det flygburna fallet skulle en avståndsupplösning över målet vara värdefull för att kunna generera full 3-D information. En viktig aspekt för en rörlig flygburen plattform är att kontroller grindluckans läge relativt målet och att kunna glida över målet med konstanta avståndsintervall.

Spaningsfunktionen från lägre höjd med bred lob bör undersökas vidare i form av några enkla experiment. Återigen bör en divergenskontroll av strålen tillåta anpassning för både spaning och måligenkänning/målinmätning.

# 9.4 Fall C/ Användning i fpl/UAV mot andra luftmål

Behov av långräckviddig igenkänning för flygplan mot andra flygplan/UAV. IRST räckvidder ligger över 100 km på hög höjd och dessa avstånd kan matchas med räckviddder från ett GV system. För att kunna identifiera andra flygplan via "bild" på 100 km torde det krävas 3-4 µrad i vinkelupplösning. Detta medför väldigt lång brännvidd och större optikdiameter (>40 cm). En identifiering baserad på avståndsinnehållet i målet vore att föredra så att optiken begränsas i storlek.

En viktig information för en flygförare är att identifiera fientligt flygplan samt om möjligt identifiera vapenlast eller annan last i form av spanings-, attack- eller telekrigspodar. En jaktrobot är kanske är 3 m lång med en diameter av 13 cm och ett fenspann på 60 cm medan en attackrobot kanske är knappt 3 meter och 30 cm diameter. Detta torde innebära ett klassificeringssavstånd kring 10 km med ett GV system med 10 µrad vinkelupplösning.

UAV:er kommer att bli allt vanligare mål– ur denna synpunkt ökar kravet på vinkelupplösning och avståndsupplösning för igenkänning.

# 9.5 Fall D/ Användning i stridsfordon/UGV

## 9.5.1 Användningssätt

På stridsfordon kan ett GV integreras i siktet tillsammans med IR kamera för måligenkäning och målinmätning. Med bred lob kan man förstärka spaningsförmågan dels mot optiska sensorer och dels genom grindfunktionen som tillåter att se in i terräng, bakom visst kamouflage och genom rök och dimma. Normalt invisas GV-systemet av IR-kameran eller det visuella siktet.

För UGV gäller samma som för stridsfordon, möjligen kan systemet användas med lägre prf för att på nära avstånd ge navigeringsunderlag. Om man successivt sveper grindluckan fram och tillbaka kan en 3-D omgivning skapas för fordonet och hinder detekteras och undvikas.

En intressant tanke är att använda GV systemet för att se ut ur sin egen skyddsrök / skyddsdimma. På så sätt skulle fordonet kunna förflytta sig och tom. verka i en hög egenskyddsnivå.

Till skillnad från fallen mark-luft och luft-mark är målavstånden betydligt kortare kanske maximalt 5 km och typiskt 1-2 km.

### 9.5.2 Se in i terrängen

En mycket stark invisning till att ett hot mot det egna fordonet finns i den omkringliggande terrängen är optikreflexer. Dessa kan ses på mycket långa håll. Med en bred lob med viss avsökning skulle skulle en optikvarnare kunna realiseras. Nästa fråga inställer sig då: Kan man identifiera det bakomliggande målet? Reflexer från optik är starka så den måste undertryckas antingen med en kort grinlucka eller spektralt.

Även utan invisande reflex så kan en snabb avståndssvepning avslöja mål i terrängen. Förmåga att se in "i terrängen" med grindad avbildning illustreras i Figur 132 och Figur 133. Här se vi hur den grindluckan successivt flyttas in mot skogsdungen och avslöjar mål inne i dungen (terrängbil). Dessutom visas hur ett fordon bakom ett kamouflagenät avslöjas bl.a. genom de starka reflexer som de släckta strålkastarna ger upphov till.
Denna sökfunktion borde kunna automatiseras och mål bör kunna upptäckas via endimensionell avståndsbehandling av avståndsfördelningen för en delbild av scenen. Metoden lämpar sig bäst för full 3-D men borde kunna fungera för 2-D med kort gatelucka. Förutsättningen för att detta skall lyckas är att målet tar upp en relativt stor del av denna delbild.



Figur 132. Bilder med ett GV system där vi ser hur grindluckan successivt flyttas in mot skogsdungen och avslöjar mål inne i dungen (terrängbil). Dessutom visas hur ett fordon bakom ett kamouflagenät avslöjas bl.a. genom de starka reflexer som de släckta strålkastarna ger upphov till. Bild FOI<sup>48</sup>.



Figur 133. Penetrering i skogsridå som i detta fall uppgår till drygt 50 meter.

#### 9.5.2.1 <u>Rök o dimma</u>

Enkla överslag tyder på att den totala dämpning s marginal för att ge bilder genom rök och dimma med ett smalt lobbredd är 30-60 dB beroende av målavstånd. För bredare lob reduceras dämpningsmarginalen som  $1/\theta^2$ .

Om målet befinner sig inne i röken reduceras målkontrasten inom grindluckan beroende på rökens täthet och luckans längd. Multipelspridning måste förmodligen behandlas för att få en rättvisande bild av prestanda för detta fall.

Om avståndet mellan mål och rökridå är väsentligt större än grindluckan /

medelspridningslängden i röken så är problemet enklare och kan beskrivas med som ett rent dämpningsproblem. På FOI har begränsade prov med rök och dimma utförts. Vattendimma är mycket tät och har gjort det svårt att se mål inne i dimman. Om målet har en retroreflex så kan den ses trots dimman, se Figur 136.



Figur 134. Dämpningsmarginal för ett GV system, en ökning av lobbredden med en faktor 100 ger 40 dB i sänkning av dämpningsmarginalen.



Figur 135. Tillämpningar för GV I stridsfordon nämligen optikspaning och måligenkänning. Rökfallen A och B torde vara ge bättre möjlighet till måligenkänning än fall C där målet är inne i röken. Bild från FOI



Figur 136. Tv. GV bild av en liten punktreflektor (målarea  $A_{\Delta}=100 \text{ m}^2/\text{sr}$ ) bakom tät vattendimma (dämpning totalt ca 60 dB). T.h. en bild av en stridsvagn mättad av den starka reflektorn. Ref. 34.

#### 9.5.2.2 Användning i UGV

I USA pågår utveckling av ett kostnadseffektivt målinmätnings-system för UGC kallat CETS (Figur 137). Detta använder okyld IR och laser för avståndsmätning och måligenkänning.



Figur 137. CETS. Till vänster användning av spaning och måligenkänning/avståndsmätning med okyld IR, Laser och grindad kamera för 1,5 µm. Till höger användningssekvens. Från föredrag OPTRO 2000<sup>49</sup>.

För UGV kan man tänka sig at använda laser för navigering och hinderindikering. I ett sådant system är det möjligt att kombinera full 3-D genom att scanna i närzonen samt målbelysa på längre avstånd. En tänkbar laserkälla är en mikrochiplaser av det slag som t.ex. tillverkas av Cobolt i Sverige. Denna typ av laser kan ge ns pulser upp till 10-tals kHz i ett mycket kompakt utförande.



Figur 138. Mikrochiplaser, 5 mikroJ/puls, prf 10 kHz, 3 ns pulslängd. <u>http://www.optoscience.com/pdf/cobolt/tango.pdf</u>

Om vi antar 5 mJ och 10 kHz prf kan man med dagens Intevac kamera fånga maximalt  $n=10\ 000/17 = 589$  bilder per frame motsvarande en integrerad energi på ca 3 mJ/bild. Om vi för enkelhetens skull antar oberoende exponeringar så ökar SNR per pixel med en faktor  $n^{1/2}$ . I Figur 139 visar vi räckvidds prestanda för ett hög prf system.



Figur 139. Räckviddsdiagram för ett GV system med en mikrochiplaser med 10 kHz prf och 5 µJ/puls. Övriga data i figuren.

#### 9.5.3 Röjningsrisk, belysningstider

I markfallet är kanske kravet på kort belysningstid ännu mer uttalad än för övriga fall. Om multifunktion med avståndsmätning, och vapenstyrning så talar mycket för att använda en laser med prestanda typiska för avståndsmätare. Om dessa multifunktionsaspekter och röjningsrisker kan värderas lägre så kan en hög-prf laser vara ett alternativ. Mikrochiplasrar är speciellt attraktiva pga. kompakthet och korta pulser. För UGV användning kan denna lasrar scannas nära fordonet för att erhålla hinderindikering.

#### 9.5.4 Tekniknivå idag och i framtiden

GV studeras för stridsfordon samt för UGV bl.a. i form av CETS systemet. Adaptiv strålkontroll (divergens och scanning, låsning) skulle utöka användningsområdet från spaning till målinmätning och kanske hinderdikering.

Signalbehandling för automatisk detektion av mål i terrängskyl behöver utvecklas liksom prov och undersökningar av skymda mål i rök/dimma och kamouflage.

Målidendifiering samtidigt med en kraftig reflex från optik i målet behöver utredas för att reducera inverkan blooming som stör bilden.

### 9.6 Fall E/ Handhållen korthållskikare

#### 9.6.1 Användingssätt

Bildförstärkare finns i en mängd handhållna utföranden. Om man kunde integrera ett GV rör med en pulsad laser skulle man kunna få ett mycket kraftfullt hjälpmedel för den enskilde soldaten. Samtidigt som man har en passiv konventionell bildförstärkare / dagsljuskikare så skulle man kunna utnyttja grindfunktionen för att spana och upptäcka/identifiera samt mäta in mål.



Figur 140. Simrad KN200 and KN250 bildförstärkare som clip-on till dagljus-kikare som ger mörker och dagkapacitet i samma utblick. <u>http://www.simrad-optronics.no/Night/default.htm</u>

Många av de resonemang som förts ovan beträffande fordonsanvändningen kan överföras till den handhållna tillämpningen nämligen att se in i terräng, bakom kamouflage och bakom rök. En annan intressant tillämpning är att se in i byggnader och genom fönster. Persienner, glasrutan eller skuggor gör det mycket svårt att detektera personer och objekt inne i ett icke upplyst rum. Med ett aktivt system förbättras denna möjlighet väsentligt. Via grindfunktionen kan kraftiga reflexer från fönster och persienner undertryckas så att man lättare kan se in.



Figur 141. T.v. fönster på FOI byggnaden utan samt med lite öppna persienner (ca 3 mm), i mitten en termisk IR bild och t.h. en GV bild som tydligt visar en person bakom de delvis nedfällda persiennerna.

# 9.7 Fall F/ Fartygsanvändning

Vid sidan av den uppenbara LV-siktesanvändningen skulle ett GV system vara ypperligt för måligenkäning av små ytmål och fartyg på långa avstånd. Inte minst bidrar den mycket låga reflektionen från vattenytan till en mycket god kontrast, illustrerat i Figur 142. Identifiering av terrorhot i form av små snabba civila sportbåtar kan nämnas i detta sammanhang.



Figur 142. Registrering av segelbåt på 1-2 km avstånd med LIVAR systemet. Se <u>http://www.intevac.com/mil\_imaging/products.asp?ConID=102</u>

# **10 Diskussion**

## 10.1 Val av våglängd samt mål- och bakgrundsdata

GV tekniken har undersökts experimentellt med prov vid 0,53 µm våglängd. Taktiska system för tillämpningar i luft-mark kommer att operera vid en ögonsäker våglängd (1,55 µm). Grön våglängd är inte heller lämplig pga. hög röjningsrisk. För många tillämpningsfall kommer 1,55 µm att ge bättre prestanda både för långräckviddig måligenkänning liksom för igenkänning av mål i viss klottermiljö.

Vid 1,55 µm är mål-bakgrundskontrasten hög för mål sedda mot en bakgrund av vatten eller snö och kan vara hög för vissa vegetationstyper. Om kort grindlucka används erhålles målbakgrundssegmentering automatiskt. Reflektionskontrasten kan då hjälpa om vegetation ligger på eller i omedelbar anslutning till målet.

Turbulensinflytandet och atmosfärsdämpningen är lägre vid 1,55 jämfört med 0.55  $\mu$ m – däremot kan högre upplösning erhållas vid kortare våglängd om avbildningen inte är atmosfärsbegränsad. Om ögonsäkerhetsproblemet inte är primärt i den taktiska tillämpningen kan man överväga att mäta både vid 1,06 och 1,55  $\mu$ m eventuellt alternera mha av ett optisk filter så att extra spektral information erhålles.

De flesta fordonsmål förefaller ha reflektionsfaktorer mellan 20-50 %, något som styrks av de spektrala reflektionskurvorna av militärt relevanta gröna färger som vi hade tillgång till.

De erhållna exemplen från bakgrunder i sommarterräng verkar ge reflektionsvärden av samma storleksordning som de klassmedelvärden som indikerats i litteraturen. Snö och vatten ger mycket låga reflektionsvärden (kring någon % eller lägre beroende på infallvinkel).

#### 10.1.1 Hög-låg prf-bildintegration

Rent teoretiskt kan man simulera effekten av speckle och Poissonbrus (vid mycket låga fotonnivåer) i bilder samt förbättring vid bildintegration. *K* definieras som antal fotoelektroner per bild och *N* antal integrerade bilder SNR definieras för en viss spatiell frekvens *f*.

Av simuleringsexemplen framgår bl.a. :

- Bästa bildkvaliteten verkar föreligga för lägre integrationstal *N* och högre exponering (större *K*).
- Det behövs ett  $SNR > 10^{1/2} \approx 3$  och en motsvarande hög spatiell frekvens för att få en bild som ger god mönsterigenkänning.
- Det behövs en något lägre totalenergi (=*N*\**K*) för att realisera bra bilder under goda intensitetsförhållanden (högre *K*).
- Det är viktigt att definiera SNR för given önskad upplösningsförmåga, dvs ett SNR för den Fouriertransformerade bilden för att illustrera SNR till bildkvalitet.
- Vid hög totalenergi (högt *NK*, speckledominerande fallet) lönar det sig att integrera många bilder.
- För låg exponering (Poissonbrusdominerande fallet) och *NK* konstant lönar det sig sämre att integrera många bilder.
- SNR-värdet beror naturligtvis starkt av *NK*. Gränsen för optimalt *N* kan beräknas till:

$$N_{opt} \approx \frac{NK}{M^2} = \frac{E}{M^2}$$
(10.1)

Där där *E*=*NK* är totalenergin och *M* antalet specklelober som faller inom mottagaraperturen.

En viktig praktisk begränsning vid bildintegration är:

- Förmåga till rörelsekompensering av de enskilda bilderna vid sammanlagring.
- Atmosfärens koherenstid. Om den är mindre än tiden mellan två laserexponeringar erhålles inga statistiskt oberoende intensitetsvariationer.
- Röjningsrisk hur länge vågar man belysa målet?
- Absolut räckvidd man vill nog få en bra bild inom någon eller några tiondels sekunder från det att laserbelysningen börjat.
- Man vill förmodligen utnyttja befintliga lasrar för avståndsmätning och laserbelysning för semiaktiva system vilket begränsar laserns prf till maximalt 10-20 Hz.

En annan viktig aspekt är om måligenkäningsuppgiften skall lösas automatiskt eller med operatör. Simuleringar av specklebilder från USA (NVESD) tycks inte belöna integration av många bilder för fallet relativt lång lucka (TV liknande bild). Vid kort lucka som medger 3 D rekonstruktion av målet kan igenkänningen förmodligen göras mindre specklekänslig. Detta behöver utredas.

# 10.2 Teoretisk simuleringsmodell

Modellen tar hänsyn till alla viktiga effekter för ett GV system och kan användas för att simulera olika scenarier med olika mål, bakgrunder, avstånd, väderförhålandem och systemparametrar. Modellen visar sig ge realistiska bilder vid jämförelse med riktiga upptagningar. Modellen behöver testas vidare och förmodligen justeras någor avsende speckle-atmosfärsmodell samt kompletteras med kraftiga reflektorer (lyktor, optiska sensorer etc.). Modellen kan t.ex. användas för att jämföra 3 D FPA och GV-system eller för att generera ett stort antal mål-bakgrundsfall (inklusive delvis dolda mål) för algoritmutveckling.

# 10.3 Processering av GV bilder

I enklaste fallet sker bara en pålysbild med relativt lång lucka som väl innefattar mål samt viss bakgrund (t.ex. 1000 ns/150 m). För detta krävs bara 1-10 pulser.

I ett mer avancerat fall används en lucka på 1-3 meter som löper framför och över målet samt avslutar med en siluettbild. Detta kräver kanske 5-15 pulser beroende på bildkvalitetskrav samt noggrannhet i avståndsmätning för val av rätt startpunkt för luckan.

I ett ännu mer avancerat fall görs full 3 D rekonstruktion med 1-2 ns (15-30 cm upplösning) samt en avslutande siluettbild. Detta kräver kanske 30-50 pulser.

Om man relaterar detta till krav på absoluta räckvidder och väderprestanda kan man ansätta lämplig laserpulsrepetitionsfrekvens.

Signal- och bildbehandlingstekniker för bildförbättring finns utvecklade och torde kunna implementeras för realtidstillämpning. Metoder för rörelsekompensering finns och har prövats. Metoder för klassificering och identifiering, speciellt för 3 D rekonstruerade mål behöver förfinas och prövas. En viktig aspekt är operatörens nytta av bildförbättring och 3 D representation.

### 10.4 Systemtillämpningar

Följande tillämpningar har diskuteras:

A/ Luftvärn-måldetektion, målföljning av luftmål utnyttjande grindad avbildning.

B/ Långräckviddig måligenkänning från fpl/hkp eller UAV.

C/ Användning i fpl tillsammans med IRST/radar för ingenkänning, följning av andra luftmål.

D/ Användning i stridsfordon/UGV för att identifiera andra fordon/markmål.

E/ Handhållen korthållskikare för spaning och måligenkänning.

F/ Marina tillämpningar.

Ett lasersystem ger potentiellt mer information jämfört med ett passivt system. För GV är det relevant att tala om intensitet och avståndsinformation. Om vi kan bortse från turbulensbegränsningar kan man teoretiskt uppskatta klassificerings och igenkänningsavstånden enligt Tabell 13:

System	Avstånd igenkänning (klass.) [km]	Avstånd identifiering [km]
8-12 μm kamera	3,4	1,8
3-5 µm kamera	10,5	5,6
GV, lång	28,1	15,1
avståndslucka 1 bild		
GV, lång	34,4	18,5
avståndslucka 8 bilder		
GV, kort	48,6	26
avståndslucka 1 bild		
GV, kort	56,2	30,1
avståndslucka 8 bilder		

Tabell 13. Uppskattade igenkännings- och identifieringsavstånd för IR kamera och GV system. Obs ingen turbulensbegränsning antagen.

Turbulens begränsar dessa värden speciellt för marknära strålbanor.

I nedanstående tabell har vi försökt sammanfatta värdet och möjligheten med GV relativt passiv IR. Ett passivt system är taktiskt alltid att föredra pga. reducerad röjningsrisk. Dock "vinner man inget krig" genom att alltid vara passiv.

Tillämpningsfall	Passiv IR	GV	Andra fördelar GV
Luftvärn	Finns, klass: 3-10 km, ID 2-5 km av 5 m <sup>2</sup> mål	Klass 25-50 km ID 15-30 km <u>Begränsning för</u> <u>låga mål dagtid</u> (< 100 m) till ung. IR värden	GV även för förbättrad följning. Även viss förmåga mot mål i moln! Siluettbild mot moln! Förmåga till klass/ID mot mål (UAV robotar). Störning EO.
spaning, inmätning markmål	klass: 3-10 km, ID 2-5 km av 5 m <sup>2</sup> mål.	Mal pos. via nätverket-bred- smal lob?	<ul> <li>Battre formaga svara mai, 1</li> <li>rök, terräng, kamouflage.</li> <li>Optikdetektion-störning.</li> <li>Utv. program:</li> <li>Eraser, Combat Eye, Joanna</li> <li>(UK, Frankrike) med krav på</li> <li>långräckviddig måligenkänning</li> <li>av fordon över 20 km avstånd.</li> </ul>
I fpl/UAV för luft-luft	IRST Detektion hög höjd ~100 km	GV kräver 40 cm (3-4 μrad) optik för att ge klass. på 100 km. Laser kan ge 1 D profil långt håll och 2D-3 D på kortare håll	GV intressant för klassificerig av vapenlast (robotar etc.)- Kan ske på 10 km. Även klass/ID av små luftmål (UAV, kryssningsrobotar.)
Stridsfordon/UGV	FLIR	Svåra mål av störst intresse eftersom målavstånd på max. 3-5 km är aktuella. Även multifunktion.	Svåra mål, se in i terräng, genom rök/dimma. 3 D mål- info mkt intressant. Optikspaning-störning. Multifunktion spaning, målinmätning, klass, ID. Bred-smal lob önskvärt. Även nav.hinderindikering UGV.
Handhållen korthållskikare	Bf finns	Även för målnmätning, se in i byggnader, i i terräng, optikspaning etc.	Kräver kompakthet. Hög prf laser?
Marina tillämpningar.	Finns för LV och ytmål.	LV plus ytmål långa avstånd. Även optikspaning mm nära land.	Terror från små båtar-ID samt viss motverkan genom bländning.

Tabell 14. Sammanfattning av värdet av och möjligheten med GV relativt passiv IR.

### 10.5 Förslag till fortsatt inriktning

Nu finns en hel del verktyg på FOI (datainsamling, metodik, modeller etc,) för att pröva och värdera den fulla kapaciteten hos ett ögonsäkert GV system (1,55 µm våglängd).

Nedanstående punkter kan tjäna som ett underlag för framtida diskussioner om prioriteringar och program.

- Anskaffa/hyr in 1,5 µm kamera (alt LIVAR system).
- Studera och fastställ de mest prioriterade tillämpningsbehoven
- På basis av denna prioritering gör kompletterande mätningar avseende t.ex.
  - o Vinterförhållanden
  - Komplettera mål-bakgrundsinfo t.ex. för våta mål/terräng (regn)
  - o Vegetationspenetreringsförmåga
  - o Mål IK långa avstånd
  - o Ytmål på sjön
  - Se genom rök/dimma-systematiska prov för olika fall
- Komplettera simuleringsmodell. Genomför avancerad tillämpningssimulering
  - o T.ex. se in i skog, utnyttja ILRIS data för mål och skog
  - o Generera data för 3-D processering av många vyer
  - Förfina modell och jämför med Cameosim
  - Komplettara med starka reflexer
- Utveckla signal/bildbehandling för senare implementering i demonstrator.
  - o 2 D samt 3 D metoder.
- Utveckla en "demonstrator",
  - o laser för avståndsmätning o GV
  - o IR kamera
  - Kombinerad signal o bildbehandling för IR/laser.
  - Full system demonstration

Det är vidare önskvärt för en gemensam handlingsplan för GV och 3-D användningutveckling. Denna bör innefatta olika etapper och ge ledning för både system och teknikutveckling samt forskning.

# **11 REFERENSER**

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> L. Klasén, O. Steinvall, G. Bolander, M. Elmqvist, "Grindad avbildning - Inledande prov på långa avstånd", FOI-R--0302--SE, Dec 2001.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Scintec AG, User manual BLS900/BLS2000, Nov 2002

<sup>3</sup> T. Svensson et al., "Prov i Kvarn med passiva och aktiva optroniska sensorsystem", FOI-R--0740--SE, Totalförsvarets forskningsinstitut, Dec 2002

<sup>4</sup> L. Klasén, "Provprogram för fälförsök grindad avbildning (E3889) och optroniska sensorsystem (E3036)", Apr 2002, d-nr: 04-187

<sup>5</sup> L. Klasén, "Provprogram för fälförsök i Älvdalen oktober 2002, grindad avbildning (E3889) och optroniska sensorsystem (E3036)", Okt 2002, d-nr: 04-188

<sup>6</sup> L. Klasén, "Provprogram för fältförsök grindad avbildning II (E3889) i Bondeby Kvarn, 2003-02-17--19", Feb 2003, dnr: 03-568.

<sup>7</sup> T. Carlsson, "Provprogram för konceptdemonstration i Kvarn juni 2003 inom projektet optroniska sensorsystem (E3036) samt kompletterande mätningar inom projektet fördjupad studie av grindad avbildning (E3889)", Jun 2003, d-nr: 04-189

<sup>8</sup> L. C. Andrews, R.-L. Phillips and C. Y. Hopen, "Laser Beam Scintillation with Applications", SPIE Press, 2001.

<sup>9</sup> N. Kopeika, "A System Engineering Approach to Imaging", SPIE Press, Bellingham, USA, 1998.

<sup>10</sup> D.Sadot, S. Shamriz, I. Sasson, I. Dror, and N.S. Kopeika, "Prediction of overall atmospheric MTF with standard weather parameters: comparison with measurements with two imaging systems," Optical Engineering, Vol. 34, pp. 3239-3248. , Nov. 1995

<sup>11</sup> O. Korotkova and L. C. Andrews, "Speckle Propagation through Atmospheric Turbulence: Effects of Partial Coherence of the Target", Proc. SPIE Vol. 4723, *Laser Radar Technology and Applications VII*, Orlando, 1-5 Apr 2002.

<sup>12</sup> D. Edouart, P. Churoux, P. H. Flamant, "Burst illumination imaging lidar: intensity correlation function in the image plane", Proc. SPIE Vol. 4723, *Laser Radar Technology and Applications VII*, Orlando, 1-5 Apr 2002.

<sup>13</sup> J. W. Goodman, "Statistical properties of laser speckle patterns", J.C. Dainty Ed., Springer Verlag, New York, 1975.

<sup>14</sup> J. W. Goodman, "Some effects of target-induced scintillation on optical radar performance", Proc. IEEE, Vol. 53, No 11, pp. 1688-1700, Nov 1965.

<sup>15</sup> F. Goudail, N. Roux and P. Refregier, "Performance parameters for detection in low-flux coherent images", Optics Letters, Vol. 28, No. 2, Jan 2003.

<sup>16</sup> R. D. Fiete and T. Tantalo, "Comparison of SNR image quality metrics for remote sensing systems," SPIE Journal of Optical Engineering 40, p. 574, Apr 2001.

<sup>17</sup> P.S. Idell, A. Webster, "Resolution limits for coherent optical imaging: Signal-to-noise analysis in the frequency domain", JOSA, Vol. 9, no.1, pp. 43-56, Jan. 1992.

<sup>18</sup> M. Vaidyanathan, T. P. Grayson, R. C. Hardie, L. E. Myers and P. F. McManamon, "Multispectral laser radar development and target characterization," Proc SPIE. Vol. 3065, *Laser Radar Technology and Applications II*, Orlando, 23-25 Apr, 1997.

<sup>19</sup> D. H. Pollock (ed.), "Countermeasure systems" in *The infrared and electro-optical handbook*, Vol.7, page 45-49, SPIE Optical Engineering Press, 1993.

<sup>20</sup> G. J. Zissis (ed.), "Sources of Radiation" in *The infrared and electro-optical handbook*, Vol.1, SPIE Optical Engineering Press, 1993

<sup>21</sup> Ö Staaf FOA, personal comm. See also: A-S Forsberg and Ö. Staaf, "Signature adaption for hardened structures-an overview" (in Swedish), FOA-R–98-000950-311–SE, Dec. 1998.

<sup>22</sup> G. Waldham and J. Wootton, "Electro-optical systems performance modeling", Artech House Inc., ISBN 0-89006-541-1, 1993.

<sup>23</sup> O. Steinvall, "Effects of target shape and reflection on laser radar cross sections", FOA-R--99-01201-408,612--SE, Sep. 1999.

<sup>24</sup> J. C. Leachtenauer, J./M. Leachtenauer "Resolution requirements and the Johnson criteria revisited ", Paper nr 5076-01 Proc. SPIE Orlando, Apr 2003.

<sup>25</sup> M. Friedman, D. Tomkinson, L. Scott, B.O. Kane och J.D. Agostino, "Standard night vision thermal modeling parameters", in *Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling and Testing, III*, Proc. SPIE vol. 1689, pp. 204-212, 1992.

<sup>26</sup> R. C. Harney, "Information-based approach to performance estimation and requirements allocation in multisensor fusion for target recognition", Opt. Eng. Vol. 36, No.3, pp. 789-798, 1997.

<sup>27</sup> US Unmanned Aerial Vehicle Road Map, US DoD, 2001.

<sup>28</sup> J. C. Leachtenaue, W. Malila, J.Irvine, L. Coburn och N. Salvaggio, "General Image Quality Equation: GIQE," Appl. Optics, Vol. 36, No. 32, pp. 8322-8328, Nov. 1997.

<sup>29</sup> L. Klasén, "Image Sequence Analysis of Complex Objects – Law Enforcement and Defence Applications", Linköpings Universitet, Thesis no. 762, Okt 2002.

<sup>30</sup> L. Klasén, O. Steinvall, G. Bolander, and M. Elmqvist. "Gated Viewing in the Atmosphere – a Study of Performance Limits" in *Laser Radar Technology and Applications VII, Proceedings of the International Society for Optical Engineering*, SPIE Press, 2002.

<sup>31</sup> P. Andersson et al. "Long Range Gated Viewing and Applications to Automatic Target Recognition", *Proceedings SSAB '03*, pp. 89-92, March 2003.

<sup>32</sup> Pierre Andersson, "Automatic Target Recognition From Laser Radar Data – Applications to Gated Viewing and Airborne 3D Laser Radar", FOI-R--0829--SE, Swedish Defence Research Agency (FOI), 2003 <sup>33</sup> Q. Zheng, S.Z. Der and H.I. Mahmoud, "Model-Based Target Recognition in Pulsed Ladar Imagery", *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 10, No. 4, pp. 565-572, April 2001

<sup>34</sup> M.R. Wellfare, et al., "Identification of Vehicle Targets from Low-Cost Ladar-Seeker Imagery", *Proc. SPIE*, vol. 2748, pp. 272-282, *Laser Radar Technology and Applications*, 1996.

<sup>35</sup> M.R. Wellfare, K. Norris-Zachery, "Characterization of Articulated Vehicles Using Ladar Seekers", *Proc. SPIE*, vol. 3065, pp. 244-254, *Laser Radar Technology and Applications II*, 1997

<sup>36</sup> C. Carlsson (now Grönwall), "Vehicle Size and Orientation Estimation Using Geometric Fitting", Linköping Studies in Science and Technology, Lic. Thesis No. 840, 2000

<sup>37</sup> Klasén et al, "Methods for Aided Target Recognition from 3D laser radar data. Submitted to SPIE D&S 2004

<sup>38</sup> O Steinvall et. al., "Laser Based 3-D Imaging – New Capabilities for Optical Sensing", FOI-R--0856--SE, Swedish Defence Research Agency (FOI), 2003

<sup>39</sup> C. Grönwall et al., "An Overview of Methods for Recognition of Natural and Man-made Objects Using Laser Radar Data", Submitted to SPIE D&S 2004

<sup>40</sup> F. Näsström et al., "Intelligenta Verkanssystem, slutrapport av genomförda aktiviteter år 2002", FOI-R--0746--SE, Feb 2003.

<sup>41</sup> Labshere, "Calibration Certificate", Report Numbers 34597-1-1, 34597-2-1, 34597-3-1, 34597-4-1, December 3, 2001

<sup>42</sup> T. Carlsson, O. Steinvall och D. Letalick, "Signature simulation and signal analysis for 3 D laser radar", FOI-R- 016 SE, Jul 2001.

<sup>43</sup> J. L. Miller, J. Kelly, R. J. Ireand and J. Byars, "Performance of a gimballed fiber optic coupled spotlight and active television", Opt. Eng., Vol. 37, Nr. 10, pp 2703-2709, 1998.

<sup>44</sup> M.A. Vorontsov, G.W. Carhart, "Adaptive phase distorsion correction in strong specklemodulation conditions", Optics letters, Vol. 27, No. 24, 2155-57, 2002.

<sup>45</sup> D. Dayton, S. Browne, J. Gonglewski, S. Sandven, J. Gallegos och M. Shilko, "Long-range laser illuminated imaging: Analysis and experimental demonstrations", Opt. Eng. Vol. 40, no. 6, 1001-1009, Jun 2001.

<sup>46</sup> A. Gelbart, B. C. Redman, R. S. Light, C. A. Schwartzlow, and A. J. Griffis, "Flash lidar based on multiple-slit streak tube imaging lidar", Proc. of SPIE Vol. 4423, *Laser Radar Technology and Applications VI*, 2002.

<sup>47</sup> P. McManamon, Muntlig extrainsatt presentation om *Combat Eye*, Laserradarsessionen, SPIE Aerosense, Apr 2003.

<sup>48</sup> O. Steinvall, H. Olsson, G. Bolander, C. Carlsson, and D. Letalick, "Gated viewing for target detection and recognition," in *Laser Radar Technology and Applications IV*, *Proceedings of the International Society for Optical Engineering*, vol. 3707, pp. 432–448, SPIE, Apr 1999.

<sup>49</sup> *Multisensor, Multispectral Developments*, Sensors for Army Transformation, Dr Milton, Night Vision and Electronics directorate, Fort Belvoir Viginia, föredrag på OPTRO Paris, 2002.

<sup>50</sup> I. Renhorn, T. Svensson, G. Carlsson, S. Letalick, H. Larsson, O. Steinvall, "Försök med multispektrala/passiva sensorer", Dec 2001, FOI-R--0290--SE.