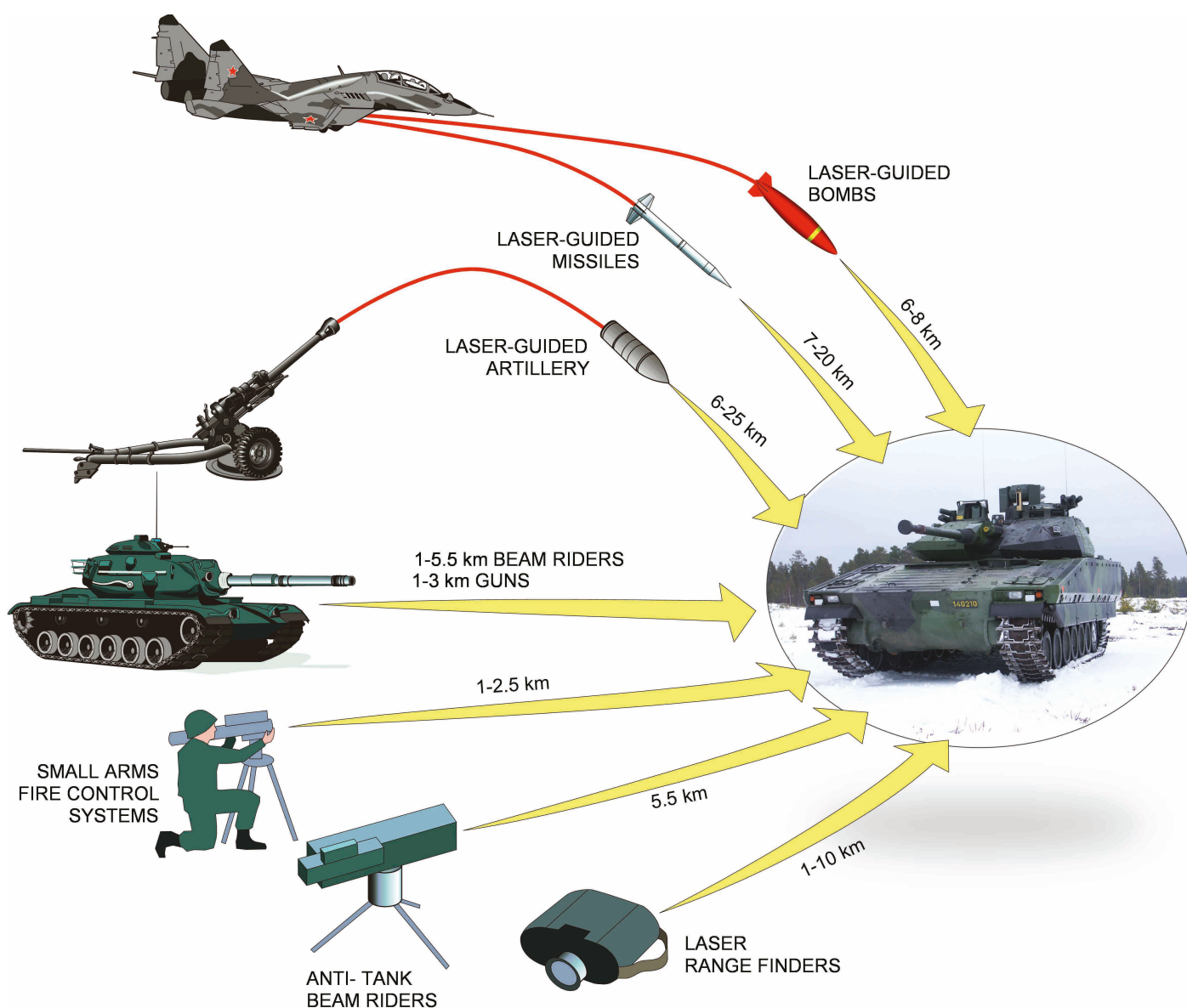


Upptäckt av och röjningsrisk med aktiva lasersystem

JULIA HEDBORG, MARKUS HENRIKSSON,
MAGNUS PETTERSSON, LARS SJÖQVIST



Julia Hedborg, Markus Henriksson, Magnus
Pettersson, Lars Sjöqvist

Upptäckt av och röjningsrisk med aktiva lasersystem

Titel	Upptäckt av och röjningsrisk med aktiva lasersystem
Title	Detection of and risk of giving away position with active laser systems
Rapportnr/Report no	FOI-R--3938--SE
Månad/Month	September
Utgivningsår/Year	2014
Antal sidor/Pages	40 p
ISSN	1650-1942
Kund/Customer	Försvarsmakten
Forskningsområde	9. Telekrig
FoT-område	Telekrig
Projektnr/Project no	E54549
Godkänd av/Approved by	Martin Rantzer
Ansvarig avdelning	Sensor- och TK-System

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk. All form av kopiering, översättning eller bearbetning utan medgivande är förbjuden.

This work is protected under the Act on Copyright in Literary and Artistic Works (SFS 1960:729). Any form of reproduction, translation or modification without permission is prohibited.

Sammanfattning

Användning av laser blir allt mer vanligt i militära sammanhang. Frågor som uppkommer är hur stor risken att bli upptäckt är då man använder sig av laser samt hur man kan upptäcka en fiende som använder laser? Efter en genomgång av olika typer av militära lasersystem, sensorsystem och atmosfärs effekter dras i rapporten några slutsatser för olika situationer.

Det finns två fall som ger stor risk att röja sin position, belysning med pulsad laser mot en plattform som har laservarnare samt långa belysningstider med laservåglängder kortare än 900 nm som kan upptäckas med en bildförstärkare. Övrig laseranvändning är inte riskfri, men för upptäckt krävs i princip att positionen redan är under övervakning.

För att upptäcka att den egna plattformen blir belyst är laservarnare den enda metod som ger hög sannolikhet för upptäckt och kan arbeta autonomt. En SWIR-kamera kan sedan användas för att bestämma den exakta positionen som belysningen kommer ifrån, framförallt för belysarlaser. Då strålningen sprids i stora vinklar i lasersystemets optik behöver kameran inte vara nära den belysta plattformen, utan spridningen upptäcks i vinklar om tiotals grader från laserstrålen. Med en bildalstrande sensor finns det en liten, men långt ifrån försumbar, möjlighet att upptäcka fientlig laseranvändning. För att inse vad det är som belyser sensorn vid en kort exponering kan det vara viktigt att ha bekantat sig med hur en laser ser ut i sensorn.

Nyckelord: laser, laservarnare, upptäckt, röjningsrisk

Summary

Military use of lasers is becoming more and more common. Questions about the risks of discovery when using lasers, and how enemy lasers can be detected, are therefore relevant. After a review of different types of military laser systems, sensor systems and atmospheric effects, some conclusions are given for different situations.

There are two situations where the use of lasers causes a great risk of giving away your position. The first is when illuminating a platform equipped with a laser warning system with pulsed lasers. The second is long illumination times with lasers at wavelengths shorter than 900 nm that can be discovered with night vision devices. Other use of lasers is not without risk, but discovery basically demands that the position is already under surveillance.

To detect that a platform is illuminated, laser warning devices are the only method that gives high probability of detection and autonomous operation. A SWIR-camera can then be used to determine the exact position of the illuminating laser, especially for laser designators. As the radiation is scattered at large angles by the optics of the laser the camera does not need to be close to the illuminated platform, the scattered radiation can be detected at tens of degrees from the laser beam. With an imaging detector there is a small, but not negligible, possibility to detect enemy laser usage. To realize what is illuminating the sensor at short exposure to laser radiation it may be important to have experienced how a laser looks with the sensor.

Keywords: laser, laser warning sensors, detection, discovery

Innehållsförteckning

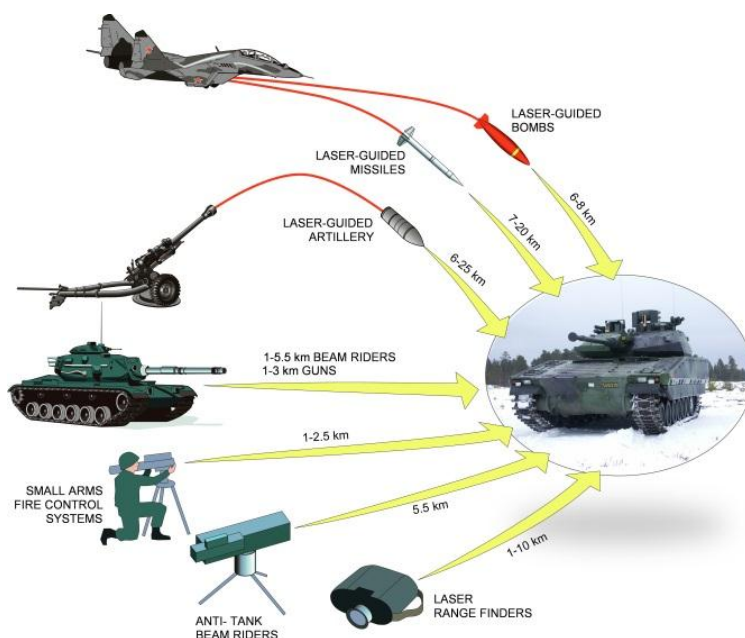
1	Inledning	7
2	Lasersystem för försvarstillämpningar	9
2.1	Laseravståndsmätare	9
2.2	Laserbelysare.....	10
2.3	Ledstrålesystem	12
2.4	Optikspanare	13
2.5	Laserpekare/scenbelysare/vapenlampa	14
3	Optiska sensorer för upptäckt av laserstrålning	15
3.1	Laservarnare	15
3.2	Ögat	17
3.3	Bildförstärkare	18
3.4	Kameror	19
3.4.1	CCD och CMOS.....	19
3.4.2	SWIR (Short-Wave InfraRed)	20
3.5	Egna System.....	21
3.5.1	Laservarnare	21
3.5.2	Spaningssystem.....	21
3.6	Hotsystem	21
4	Atmosfärs effekter	22
4.1	Atmosfärsspridning och dämpning.....	22
4.1.1	Spridning i aerosoler	23
4.1.2	Molekylspridning	23
4.1.3	Absorption	24
4.1.4	Dämpning och siktförhållande	24
4.2	Turbulens	25
4.2.1	Strålvandring	25
4.2.2	Intensitetsfluktuationer (scintillationer).....	26
4.2.3	Strålbreddning	26
5	Upptäckt av laser i olika situationer	27
5.1	Laservarnare	27
5.2	Bildalstrande sensorer	29
5.2.1	Laser belyser sensor, sensorn riktad mot laser	29
5.2.2	Sensor riktad mot laser, men utanför laserlob	30
5.2.3	Lasern belyser sensor, men sensorn riktad åt annat håll	31
5.2.4	Sensor riktad mot samma punkt som laser belyser	31
5.2.5	Sensorsynfält korsar laserlob i luften	32

6	Diskussion	35
6.1	Upptäckt av hotlaser	35
6.2	Undvika upptäckt vid användning av laser	35
7	Slutsats och rekommendationer	36
8	Referenser	37

1 Inledning

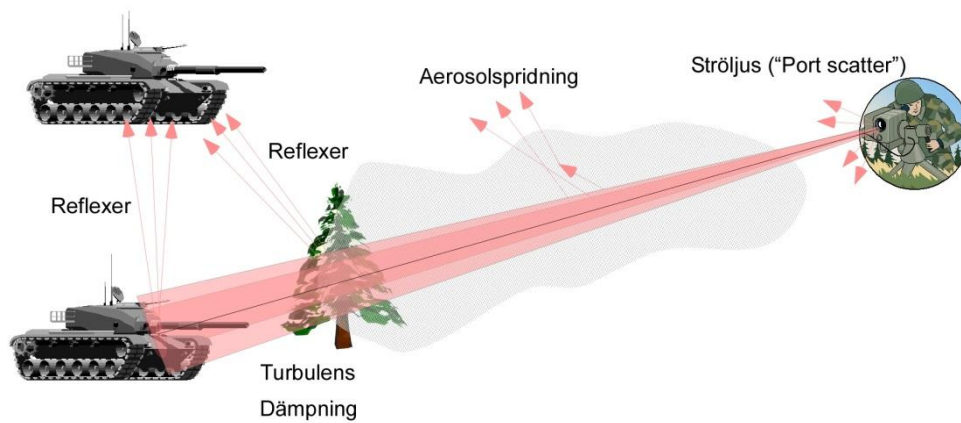
En fråga som ofta uppstår vid användning av laserbaserade system är hur stor risken att bli upptäckt är. Olika typer av sensorer kan användas för att detektera laserstrålning där ögat är den mest uppenbara för synligt ljus, men elektro-optiska (EO) sensorer behövs för strålning i våglängdsområden utanför det synliga. För detektion av laserstyrda vapensystem eller lasersensorer som stöttar andra vapen (t.ex. avståndsmätare) finns speciella varnarsensorer (laservarnare) framtagna för att skydda plattformar (Figur 1). Utöver laservarnare är det också av stort intresse att allmänt analysera risken att bli röjd då laser används.

Syftet med den här rapporten är att ge en översikt över de lasersystem som Försvarmakten (FM) använder sig av samt att beskriva risken att röja sin position eller bli upptäckt då systemen används. För att skapa en bättre förståelse för upptäcktrisen beskrivs även de upptäckande system som en fiende skulle kunna tänkas använda sig av, i form av olika typer av kameror och laservarnarsystem. Även den motsatta tillämpningen, där det är FM som ska upptäcka motståndarens användning av lasrar diskuteras.



Figur 1 Typiska hotssystem som en laservarnare kan detektera och varna för.

Ett aktivt system är ett optiskt system som inte bara passivt observerar utan även sänder ut elektromagnetisk strålning, ofta i form av laserstrålning (Figur 2). Det finns många fördelar med att använda aktiva system, såsom belysning för att se bättre i mörker eller att kunna peka ut och mäta avståndet till ett fiendligt objekt samt styra vapen. En nackdel med aktiva system är dock att den strålning som sänds ut kan upptäckas eller detekteras av andra och man riskerar då att röja sig själv och sin egen position.



Figur 2 Effekter som kan detekteras vid användning av aktiva (laserbaserade) system. I exemplet visas ett målbelysningsystem.

Många moderna militära plattformar är idag utrustade med olika typer av laservarnarsystem. Spaningssensorer i form av kameror och bildförstärkare som täcker våglängdsområden även utanför det visuella är också vanliga. Det gör att risken att bli upptäckt vid användning av laser kan vara stor. Genom att öka kunskapen om hur de laserbaserade aktiva system som idag används inom FM fungerar kan röjningsrisken minska. Den här rapporten syftar till att beskriva problematiken, diskutera möjligheter för upptäckt samt att föreslå metoder för att minska risken för upptäckt.

2 Lasersystem för försvarstillämpningar

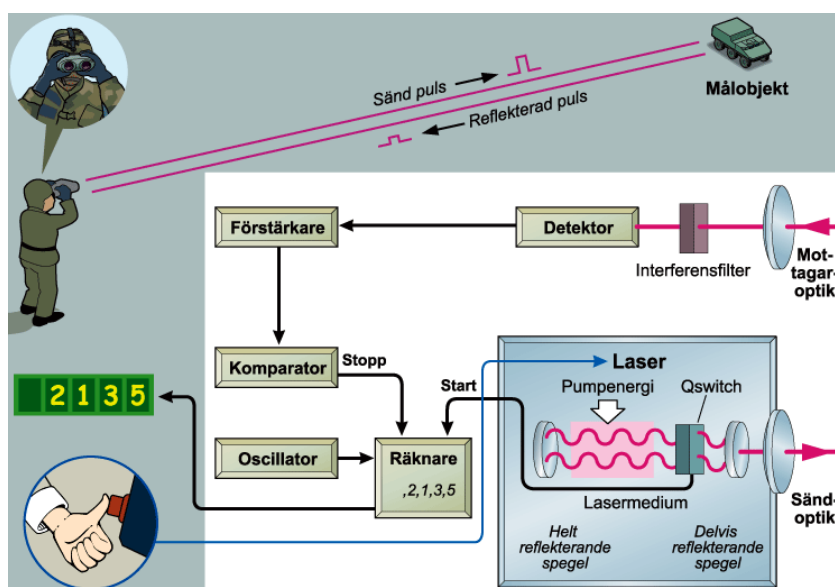
I det här kapitlet ges en översikt över olika lasersystem som FM kan tänkas använda sig av. De flesta system som beskrivs används eller har använts operativt men även system som kan komma att användas inom en snar framtid beskrivs. Avståndsmätning är den vanligaste tillämpningen av laser, medan t.ex. optikspanare ännu inte används. Informationen om de olika lasersystemen nedan bygger på öppen information, huvudsakligen från tillverkaren eller Försvarsmakten själv.

Det pågår utveckling av andra typer av lasersystem som kan komma att införas inom en rimlig framtid, och i vissa fall redan finns i operativ användning i andra länder. Några exempel är system för långgräckviddig tvådimensionell (2D)- och tredimensionell (3D) avbildning för spaning och målklassificering, synliga lasrar för varning och bländning och system med IR-lasrar för störning och bländning av sikten och målsökare. Avbildande system är de mest relevanta här och använder lasrar liknande de för avståndsmätning, eller för 2D-avbildning scenbelyslasrar som ger kontinuerlig strålning.

2.1 Laseravståndsmätare

En laseravståndsmätare används för att med hög noggrannhet bestämma avståndet till ett objekt och används i många sammanhang inom försvaret, t.ex. för målinmätning. Avståndsmätning är den vanligaste tillämpningen av laser inom FM och laseravståndsmätare finns i många olika varianter, t.ex. kan de vara små handhållna (Figur 4) eller större och placerade på vapensystem.

En laseravståndsmätare har en sändare och en mottagare. En eller flera korta laserpulser sänds ut mot det valda objektet och avståndet beräknas utifrån tiden det tar för laserljuset att reflekteras i objektet och sedan detekteras i mottagaren igen. Mottagardetektorn består vanligtvis av en fotolavindiod. Laserenergin måste vara ganska hög eftersom endast en liten del av den utsända strålen sprids tillbaka i samma riktning som den sändes ut från och därmed träffar detektorn. Ett sikte eller en kamera används för att rikta lasern mot det objektet som avståndet ska mätas till.



Figur 3. Principen för hur en laseravståndsmätare fungerar. Laserpulsen sänds ut genom sändaroptiken och reflexen från objektet fångas upp av mottagaroptiken.



Figur 4. En handhållen laseravståndsmätare från Vector.

Tabell 1. Egenskaper hos laseravståndsmätare.

Allmänt		
Allmänt om lasrar som ofta används vid avståndsmätning	Laservåglängd (typ)	1,5 μm , 1,06 μm (Nd:YAG), 0,9 μm
	Laserpuls	Kort (5-50 ns), enstaka pulser eller pulståg. Enstaka pulser kräver högre energi än pulståg.
	Effekt/energi	Hög, $\sim 1\text{MW}$, 5-200 mJ
	Divergens	0,1-1 mrad
	Räckvidd	2-20 km

Nedan listas ytterligare några system som är utrustade med laseravståndsmätare

- Stridsvagn 122
- Vapenstation 01 (Terrängbil 16)
- Korvettsikte
- Helikopter 14
- Sophie-L IRV-kamera
- Eldobservationsinstrument, EOI
- LDP
- Stridsfordon 90.

2.2 Laserbelysare

Ett laserbelysarsystem kan användas för att öka precisionen hos vapensystem som robotar, glidbomber, raketer och artillerigranater, genom att dessa styr med hjälp av reflexen från en laserstråle som riktas mot målet. Belysare kan monteras på stativ eller på rörliga plattformar (t.ex. flygplan, helikoptrar och stridsfordon) där belysningslasern tillsammans med en kamera används för att identifiera ett mål och sedan följa det med hjälp av laserreflexen. Laserbelysare av den här typen benämns även designatorer.

Precis som för en laseravståndsmätare utnyttjar belysarsystem laserns reflex i målobjektet. Reflexen detekteras av en målsökare i vapenhuvudet och på så sätt kan vapnet lokalisera målet och sedan följa det genom att styra så att laserreflexen hela tiden hamnar mitt på detektorn. Hög lasereffekt krävs för den här tillämpningen eftersom endast en liten del av det reflekterade ljuset når detektorn. Operatören eller systemet som belyser målet behöver

inte finnas på samma plattform som vapnet. Laserbelysare placerade på rörliga plattformar kombineras ofta med ett sikte som kan låsa på och följa målet så att lasern hela tiden belyser mitten av siktets synfält.

Tabell 2. Egenskaper hos laserbelysare. Figuren visar LDP för Gripen.

Allmänt		
Allmänt om lasrar som ofta används	Lasertyp	Ofta Nd:YAG-laser (1,06 μm)
	Laserpuls	Korta pulser med låg pulsrepetitionsfrekvens
	Effekt	Hög, ~1 MW
	Divergens	Smal stråle, ~0,1 mrad
Sjömålsrobot 17		
Lasern placeras på tripod. Vanligen nyttjas CLAD ("Compact Laser designator") men även andra kan användas.	Laservåglängd (typ)	1,06 μm
	Laserpuls	Frekvenskodad, d.v.s. specifikt frekvensmönster
	Lasereffekt	Hög
	Räckvidd	10 km
"Laser designator pod" (LDP) för Gripen. (Även kallad laserpekkapsel)		
Multifunktionssystem som används bl.a. för att belysa och följa mål. Belysarlasern används för styrning av bomb GBU-12. Bomben kan även styras med laser från marken då den avfyras från JAS39 Gripen.	Laservåglängd	1,06 μm
		
LF 28A		
Laserbelysare för styrning av t.ex. bomb GBU-12 från marken.	Laservåglängd	1,06 μm
	Energi	>70 mJ
	Räckvidd	10 km



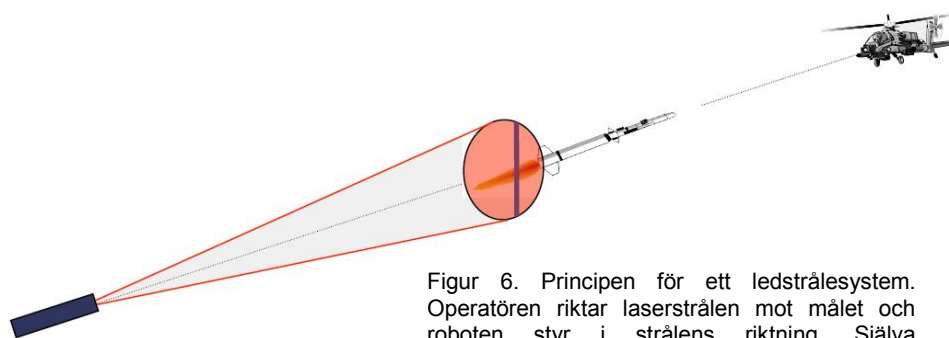
Figur 5. Principen för ett laserbelysarsystem. Målet belyses med en laser från ett flygplan och roboten som har avfyrats styr mot den reflekterade laserstrålningen.

2.3 Ledstrålesystem

Ett ledstrålesystem används för styrning av pansarvärns (PV)- och luftvärns (LV)-robotar genom att målet pekats ut med en laserstråle. Till skillnad från ett belysarsystem där vapenhuvudet detekterar reflexen från målet detekteras en ledstråle i robotens bakre del. Det är alltså inte reflexen utan laserstrålen direkt som roboten styr efter. Detta gör att en ledstrålelaser inte behöver ha lika hög effekt som en belysarlaser. Laserstrålen är kodad vilket gör att roboten kan veta var i laserstrålens ljuskägla den befinner sig och hela tiden styra mot dess mitt.

Tabell 3. Egenskaper hos laserledstrålesystem.

Allmänt		
Allmänt om lasrar som används i ledstrålesystem	Laservåglängd (typ)	0,8-1,1 μm , många olika kan användas, t.ex. GaAs, Nd:YAG,
	Effekt/energi	Låg
	Divergens	Varierar ofta under skjutförloppet. Kodat lasertvärnsnitt eller spalt som sveps över målet är två olika varianter.
	Räckvidd	3-10 km
Robotsystem 70 (RBS 70).		
Används framför allt mot hot i form av flygplan och helikoptrar. Robotskytten riktar laserledstrålen mot målet och roboten styr efter denna.	Laservåglängd	-
	Laserpuls	Korta pulser med frekvens i kHz-området.
	Räckvidd	6-7 km

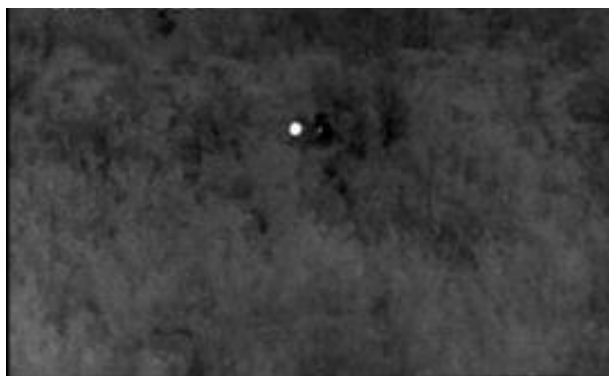


Figur 6. Principen för ett ledstrålesystem. Operatören riktar laserstrålen mot målet och roboten styr i strålens riktning. Själva laserstrålen kan vara kodad så att roboten vet precis var i strålloben den befinner sig.

2.4 Optikspanare

En optikspanare används för att spana efter och detektera optik som passivt spanar från långa avstånd. Försvarsmakten har idag inga operativa optikspanare men det är möjligt att optikspanare kommer att användas i framtiden.

En laser belyser en scen och optik från sensorer som träffas av lasern kommer då att ge upphov till en retroreflex (se appendix) som är stark i förhållande till reflexer från andra objekt och lätt kan upptäckas. Retroreflexen kommer tillbaka i samma riktning som belysningslasern och detekteras av en mottagardetektor, t.ex. en känslig kamera eller bildförstärkare. Lasern som används kan antingen ha en stor lob för att kunna belysa ett stort område, eller en smalare lob som istället skannas snabbt över ett större område. Optiken som ska detekteras måste ha transmission och vara fokuserad för laservåglängden för att kunna ge upphov till en retroreflex. Till exempel måste man använda en infraröd laser för att kunna upptäcka infraröda sensorer. Då retroreflexer är starkare än diffusa reflexer krävs inte lika hög lasereffekt som vid avståndsmätning.



Figur 7. Exempel på hur en scen belyst med en optikspanare kan se ut. Optiken syns som en ljus prick på grund av retroreflexen.

Tabell 4. Allmänna egenskaper hos optikspanare.

Allmänt		
Lasern kan scanna ett stort område eller belysa med stor lob. Kan kombineras med kamera för visuell identifiering.	Laservåglängd (typ)	Våglängd anpassas till hotsensorns känslighetsområde, oftast används 800-900 nm för upptäckt av visuella sikten utan att lasern är synlig för ögat.
	Laserpuls	Pulsad
	Divergens	Beroende på teknik, t.ex. $3 \times 4^\circ$ eller smal spalt.
	Räckvidd	1-10 km

2.5 Laserpekare/scenbelysare/vapenlampa

Laserpekare används för att peka ut mål i olika sammanhang. Det finns både små handhållna/hjälmonterade system större lasrar monterade på vapensystem. Vissa laserpekare kan ställas om till stor divergens och fungerar då som scenbelysare istället, t.ex. för att se bättre med bildförstärkare (NVG) i mörker. Dessa lasrar kallas ibland för laserbelysare men ska inte förväxlas med de laserbelysare/designatorer som används för att öka precisionen hos vapensystem och beskrivs i avsnitt 2.2. Vapenlampor kan också utgöras av lasrar och fungerar då på samma sätt som en scenbelysare.

Tabell 5. Egenskaper hos laserpekare och belysningslasrar.

Allmänt		
Allmänt om lasrar som ofta används för utpekning.	Laservåglängd (typ)	Varierar, t.ex. $0,85\mu\text{m}$ (syns i NVG) eller $0,65\mu\text{m}$ (synligt). Det förekommer även laserpekare i det infraröda våglängdsområdet.
	Laserpuls	Kontinuerlig eller modulerad (Hz)
	Divergens	Liten för pekare, stor för belysare
	Räckvidd	>10 km
Vapenstation 01 (Protector)		
	Laservåglängd	Visuell och NIR.
Ak 5/T		
Laserutpekare som fästs på automatkarbin 5. Används i kombination med bildförstärkare.	Laservåglängd	NIR
	Divergens	$\sim 0,4$ mrad
	Effekt	<5 mW
	Räckvidd	Ca 400 m (begränsas av bildförstärkaren)

3 Optiska sensorer för upptäckt av laserstrålning

I detta kapitel beskrivs system som på olika sätt kan upptäcka laserstrålning. Laserstrålning kan dels detekteras med olika typer av varnarsystem men också med avbildande spaningssystem av olika slag.

3.1 Laservarnare

Laservarnare är passiva system vars uppgift är att detektera och varna för laserstrålning. Då majoriteten av de hotssystem som skall detekteras sänder ut korta laserpulser designas laservarnare normalt för att endast detektera pulsad strålning. Att detektera kontinuerlig laserstrålning kräver en annan utformning och ställer helt andra krav på varnaren. Det finns dock system som klarar av att upptäcka kontinuerlig strålning under mörker, t.ex. för upptäckt av IRSL ("Infrared Searchlight").

Laservarnare är sedan många år tillbaka en etablerad varnarsensor som återfinns på en stor mängd plattformar såsom stridsfordon, helikopter, flyg och fartyg, men även manburna varianter och system för ubåtar förekommer. I Sverige sitter laservarnare på Helikopter 16 samt är under införande på Helikopter 14 och korvett. Figur 8 visar ett antal exempel på laservarnare. Ett system består normalt av två till åtta sensorenheter.



Figur 8. 1. Saab Avitronics, LWS 310 för fordon, flyg och fartyg, 2. Elbit, E-laws för fordon och fartyg, 3. Goodrich, 318s för fordon, 4. Zenit, TShU-1-1 för stridsfordon, 5. ATK (BAE), AN/AAR-47(v)2 kombinerad MAW och laservarnare för flyg, 6. Saab Avitronics laservarnare för ubåt, 7. OLO för flyg (SU-35), 8. Aselsan, LIAS för helikopter och flyg.

Prestanda för laservarnare varierar beroende på system och generation. Generellt gäller att system utvecklas för att möta den hotbild som fanns när systemen utvecklades. Vidare anpassas systemet till aktuell plattform så att hela eller vitala delar av plattformen skyddas.

Att bygga en varnare som med hög sannolikhet detekterar ett visst hot i en given riktning är enkelt. Att bygga en laservarnare som detekterar alla förekommande hot oberoende av infallsvinkel är däremot mycket svårt. Laservarnare bygger på en kompromiss mellan prestanda, utformning och pris. Vissa krav är plattformsrelaterade men generellt gäller att en laservarnare förväntas:

- Täcka ett stort våglängdsområde.
- Ha hög känslighet och stor dynamik.
- Ha stor vinkeltäckning (typiskt 360° i sidled, 90° i höjdlid).
- Ha en hög inisineringsnoggrannhet.
- Detektera och upplösa korta pulser.
- Fungera i fullt solljus.
- Ha låg falsklarmsfrekvens.

Ovanstående krav genererar i sig en stor mängd tekniska krav på varnarsystemet. Några begränsningar som tillåts utan att det ger betydande avkall på prestanda är t.ex. en begränsning av våglängdsband. Majoriteten av dagens hotssystem sänder i våglängdsbandet 0,8-1,6 μm , några få i 0,5-0,7 μm och enstaka vid längre våglängder. En varnare som designas för att täcka in våglängdsbandet 0,5-1,6 μm svarar bra mot dagens hotbild. I framtiden kommer nya hotvåglängder tvinga fram en utökad våglängdstäckning hos varnarsystemen, t ex i bandet 2-3 μm . Tillverkare av detektorer för laservarnare studerar alternativa detektorer för att få utökad våglängdstäckning.

Kravet på hög känslighet för detektion av exempelvis ledstrålestyrda robotsystem och andra smygande system i kombination med en låg falsklarmsfrekvens ställer höga krav på systemets utformning. I vissa system styrs tröskelnivåer av mängden bakgrundsljus vilket medför att detektionssannolikheten varierar beroende på ljusförhållanden i scenen. En ledstråle för robotstyrning är t.ex. lättare att detektera i mörker.

Vissa avvikelser avseende prestanda beroende på plattform förekommer, men bortsett från manburna varnare och varnare för ubåtar är systemen relativt lika. Manburna system är vanligtvis väldigt enkla i sin utformning då de måste vara små, lätta och energisnåla. De ger normalt bara en indikation på belysning. Spridningen av manburna system är i dagsläget relativt begränsad. Ubåtar kan utrustas med laservarnare för detektion av grön laser vid ytnära uppträdande.

Laservarnare för fordon, helikopter, flyg och fartyg är vanligen utformade för att upptäcka och klassificera ett antal olika hot och hottyper. En varnare skall normalt detektera och gärna klassificera nedanstående hot.

- Laseravståndsmätare singelpuls
- Laseravståndsmätare multipuls
- Laserbelysare
- Laserledstrålestyrd robot kortpuls
- Laserledstrålestyrd robot modulerad
- Pulsad bländ- och verkanslaser
- Olika typer av spaningssystem (tidsstyrd aktiv avbildning, optikspaning m.m.).

I princip alla varnare detekterar traditionella laseravståndsmätare (singelpuls) och laserbelysare. De flesta uppges även detektera ledstrålestyrda robotsystem. I detta fall varierar prestanda kraftigt mellan olika system, det finns idag några system med god detektionsförmåga mot dessa system och ett stort antal system med begränsad förmåga. Beroende på hur ledstrålesystemet är uppbyggt kommer detektion kunna ske i olika faser av skjutförloppet, många varnare har inte tillräcklig känslighet att detektera ledstrålen i ett tidigt skede av skjutförloppet då irradiansen vid varnaren är låg. Möjligheten att detektera andra typer av system med låg sändardeffekt och pulsad bländlaser varierar mellan olika system. Kontinuerlig laser som används för bländning och målutpekning detekteras normalt inte.

I Tabell 6 nedan ges typiska prestanda för en modern laservarnare. Detektionsavstånd för laseravståndsmätare och laserbelysare är normalt längre än hotsystemens räckvidd.

Tabell 6. Typiska värden för en laservarnare.

Parameter	Värde
Detekterbara hot	Avståndsmätare, belysare, laserledstråle, bländlaser (pulsad), spaningsystem m.m.
Detektorer	Kisel i kombination med InGaAs eller Germanium.
Våglängdstäckning	0,5-1,6 μm (Hela eller delar av detta band.)
Vinkeltäckning	Sidled: 360° med flera sensorenheter Höjdled: 60 -180° beroende på tillämpning.
Invisningsnoggrannhet avståndsmätare, belysare	1-15° (typvärde) 1° för de mest avancerade.
Invisningsnoggrannhet ledstråle m.m.	Sektor 15-90° (typvärde) 1-3° för de mest avancerade
Känslighet avståndsmätare, belysare	1-20 W/m^2 (typvärde)
Känslighet ledstråle m.m.	0,1 W/m^2 (typvärde) 3-50 mW/m^2 för mer avancerade.
Pulslängder	1-200 ns samt 20-150 μs
Detekterbara prf:er	Singelpuls-50 kHz
Detektionstid	0,1 s (upptäckt), 0,5-1 s (klassificering)
Falsklarmsfrekvens	1/24 h operativt (typvärde)

3.2 Ögat

Det mänskliga ögat är anpassat för ljus i intervallet 380-750 nm. Människan har två olika typer av synceller, tappar och stavar. En normalseende person har tre varianter av tappar (röda, gröna och blå) som vardera uppfattar olika våglängdsband vilket ger ett färgseende. Tapparna är huvudsakligen koncentrerade runt gula fläcken, detta medför att färgseendet huvudsakligen finns i de centrala delarna av synfältet. Tapparnas maximala känslighet ligger runt 550 nm vilket innebär att ögat har goda förutsättningar att uppfatta t ex grön laser. Normalt brukar den övre gränsen för vilka våglängder ögat uppfattar anses ligga runt 700-750 nm. En viss känslighet finns dock vid längre våglängder vilket innebär att höga irradianser från exempelvis diodlasrar vid 800-830 nm kan uppfattas av ögat, dessa uppfattas då som mörkt röda.

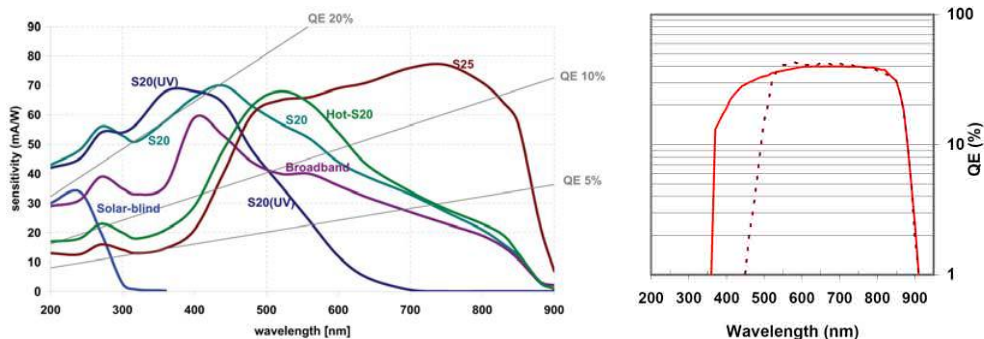
De betydligt känsligare stavarna är mera jämnt fördelade över näthinnan och svarar därmed för det perifera seendet och rumsuppfattningen. Det är också stavarna som ger oss mörkerseende vilket förklarar att vi inte uppfattar färger på samma sätt i mörker. Ett mörkeraptrat öga är mindre känsligt för längre våglängder.

En kikare förstärker infallande ljus från omgivningen i motsvarande grad som eventuell laserstrålning förstärks, vilket innebär att kikaren i princip inte påverkar möjligheten att upptäcka en laserstråle då kontrasten relativt bakgrunden förblir oförändrad.

3.3 Bildförstärkare

Bildförstärkare utnyttjar det lilla ljus som finns tillgängligt under mörka förhållanden och förstärker det så att det blir möjligt att se. På 1970-talet introducerades bildförstärkare benämnda generation 2 (Gen 2), sedan dess har tekniken utvecklats och förfinats men grundprincipen är densamma. Moderna bildförstärkare består i grunden av tre huvudkomponenter, fotokatod, mikrokanalplatta (MCP) och fosforskärm. Fotokatoden består av ett ljuskänsligt material som omvandlar infallande ljus (fotoner) till elektroner, dessa multipliceras (förstärks) i efterföljande mikrokanalplatta. Den förstärkta elektronströmmen träffar sedan en fosforskärm som genom fluorescens omvandlar elektronerna till ljus (fotoner). I bildförstärkare förekommer ett antal olika fosfortyper som fluorescerar vid olika våglängder. Bilden som genereras på fosforen kan betraktas med ögat eller via optik kopplas till en kamera som är känslig vid den våglängd som fosforen emitterar. Valet av fosfor styr hur bilden uppfattas men har ingen koppling till vilka våglängder bildförstärkaren kan detektera.

Den del av bildförstärkaren som huvudsakligen är intressant avseende möjligheten att upptäcka laseremitterande system är materialet i dess fotokatod. Bildförstärkare benämnda Gen 2 bygger på multialkalimaterial benämnda S20 medan bildförstärkare benämnda Gen III bygger på materialet GaAs som har högre känslighet i NIR-området (800-900 nm). Det förekommer även varianter benämnda Gen2+ eller super gen (S25) som fortfarande bygger på multialkali men med utökad våglängdstäckning i NIR-området som liknar den för Gen 3. Figur 9 nedan visar typiska känslighetskurvor för bildförstärkare av Gen 2 (S20), Gen2+ (S25) och Gen 3.



Figur 9. T.v typiska känslighetskurvor för bildförstärkare av typ Gen2 (S20) och Gen2+ (S25), källa Photonis. T.h typisk känslighetskurva för en Gen 3 bildförstärkare, källa Stanford Photonics.

Traditionella Gen 3 bildförstärkare har en skyddsfilm (jonbarriär) som hindrar joner att förstöra fotokatoden, denna reducerar känslighet och prestanda varför det pågår utveckling av bildförstärkare utan denna skyddsfilm, så kallade filmless (Gen 4). Dessa har visat sig mycket ömtåliga och är i nuläget inte operativa i någon större omfattning. Dock förekommer varianter med ytterst tunn skyddsfilm (benämnda Gen 3+, Gen 3 ultra, Gen 3 extreme m.fl.). Känsligheten för dessa är bättre men bör våglängdsmässigt ha en känslighetskurva motsvarande traditionella Gen 3 bildförstärkare.

Gen 3 bildförstärkare tillverkas förutom i USA även i Ryssland sedan 15-20 år tillbaka, i Kina och möjligen ytterligare något land. I Europa tillverkas för tillfället enbart bildförstärkare av Gen 2 även om prestanda för dessa närmar sig Gen 3. Bildförstärkare av Gen 2 och Gen 3 är idag standardutrustning vid strid i mörker och flertalet av dessa har tillräckligt hög känslighet för att upptäcka pekklasar, belysningslasrar och spaningssystem som arbetar i våglängdsbandet 0,8-0,9 μm .

3.4 Kameror

Det finns en stor mängd kameratyper som har möjlighet att detektera laserstrålning. Här ges en översikt och några typexempel. Prestanda kan variera och känsligheten vid olika våglängder varierar beroende på sensorns uppbyggnad, dopning och eventuella optiska filter.

En kameras möjlighet att detektera laserstrålning beror av en rad faktorer, den mest centrala är naturligtvis att detektormaterialet är känsligt för den aktuella våglängden. För att lasern ska synas krävs också att nivån är tillräckligt stark relativt kamerabrus och bakgrundsljus. Förhållandet till kamerabruset bestäms av detektorkänslighet och optik, medan signal till bakgrundsförhållandet är svårare att styra. Under dagtid är det normalt bakgrunden som är begränsande för möjligheten att detektera laserstrålning. Vid mörker och därmed en tillräckligt låg bakgrund kommer istället detektorn vara den begränsande faktorn. Detta innebär att det generellt är lättare att upptäcka laserbelysning när bakgrundsljuset är lågt.

Oberoende av detektortyp i kameran kommer kamerans optik i kombination med detektorns pixelstorlek att styra respektive pixels synfält och därmed hur mycket bakgrundsljus som träffar pixeln. På långa avstånd påverkar detta till exempel möjligheten att upptäcka en liten laserfläck om denna inte fyller hela pixelns synfält.

Traditionell kamerateknik bygger på en fast bildtakt. Exponeringstiden styrs sedan av aktuellt ljusförhållande. Det innebär att kameran endast kommer att exponeras för omgivningen under en del av tiden, vilket medför att korta laserpulser mycket väl kan missas. På samma sätt kommer energin från flera efterföljande pulser att summeras om de träffar kameran under samma exponering. För att uppnå hög upptäcktssannolikhet mot lasrar med kort puls vill man reducera exponeringstiden för att erhålla ett högt SNR relativt bakgrunden. Med denna teknik krävs en hög bildtakt för att sannolikheten att helt missa pulsen inte skall vara alltför hög. Normala kamerasystem för spaningsändamål är inte optimerade för upptäckt av laserstrålning varför det endast är ljusets bakgrundsnivå som styr exponeringen. Utläsningselektroniken är ofta konstruerad så att kameran kan exponeras för omgivningen maximalt halva tiden. Sannolikheten att helt missa en enstaka puls är därmed minst 50%.

3.4.1 CCD och CMOS

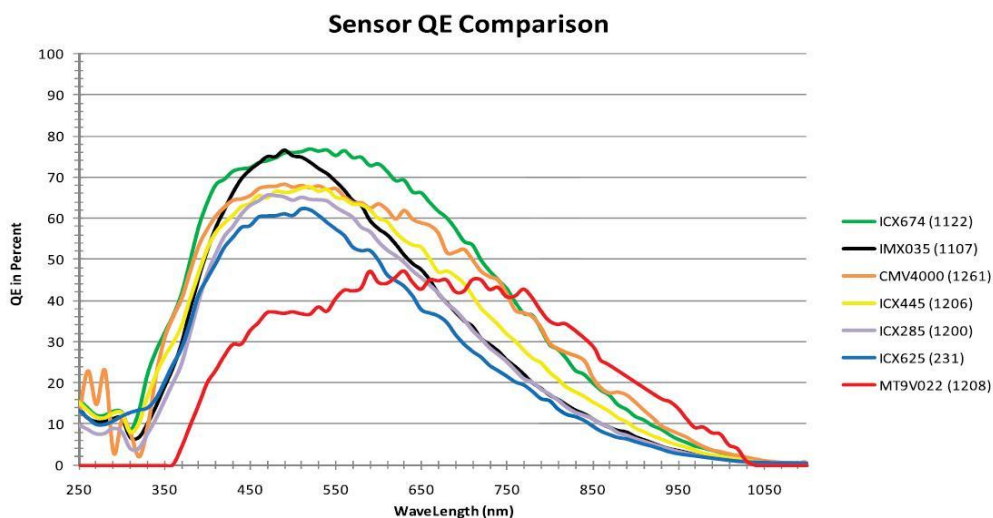
CCD- och CMOS-detektorer är två olika tekniker för bildalstrande sensorer med delvis olika egenskaper, men de används i stor utsträckning för samma ändamål. Teknikerna utvecklades parallellt under 1970-talet men med dåtidens tillverkningsprocesser var det svårt att producera CMOS med hög kvalitet varför CCD kom att bli helt dominerande och är den vanligaste detektortypen i vanliga digitalkameror. Under senare tid har dock CMOS blivit populära samtidigt som nya processer möjliggjort tillverkning med hög kvalitet till lågt pris. CMOS har fördelen att den förbrukar mycket mindre ström än CCD vilket medfört att CMOS har blivit populärt i bland annat handburna applikationer och för små UAV:er.

Färgkameror är vanligt förekommande både militärt och civilt. De kan användas för spaning och upptäckt av laserstrålning i det synliga våglängdsbandet. En kvalitativ färgkamera är vanligen känslig i intervallet 0,4-0,7 μm . Här är det inte detektorn utan de framförvarande optiska färgfiltren som begränsar känsligheten.

Beroende på kamerans uppbyggnad kan den dock vara känslig i ett större våglängdsband. Ibland utökas känsligheten uppåt i våglängd för att erhålla bättre känslighet eller helt enkelt för att man sätter in enkla filter som inte blockerar strålning över 0,7 μm .

I monokroma (svartvita) kameror utnyttjas normalt hela detektorns känslighetsband utan filtrering. En monokrom kamera ger i och för sig ingen färginformation men ger i gengäld bättre spatiell upplösning och hög känslighet. Vilket våglängdsband en monokrom kamera

är känsligt i styrs i viss utsträckning av detektorns design. I grunden används kisel som detektormaterial men beroende på bland annat dopning kan detektorer känsliga i delvis olika våglängdsband skapas. Figur 10 nedan visar exempel på känslighetskurvor för ett antal vanligt förekommande detektorer.



Figur 10. Exempel på känslighetskurvor (kvantverkningsgrad) för ett antal vanligt förekommande standarddetektorer [Point Grey Research, Inc.]

Det tillverkas även detektorer för kameror med utökad våglängdstäckning i NIR-området. De har en typisk våglängdstäckning upp till 1,2 μm även om känsligheten vid de längre våglängderna är begränsad. Beroende på val av detektor i kameran kan en monokrom kamera mycket väl upptäcka laserstrålning i NIR-området vid höga belysningsnivåer (även 1,06 μm t.ex. Nd:YAG som används i laserbelysare).

Känsliga kameror avsedda att användas vid låga ljusförhållanden brukar benämnas LLLTV ("Low Light Level Television Camera"). Detta är ett samlingsnamn för flera olika tekniker och talar egentligen bara om att de har hög känslighet och är avsedda för denna tillämpning. Olika varianter är vanligt förekommande, bland annat i Ryssland. Typiskt används olika kombinationer av bildförstärkare som optiskt kopplas till en CCD. Känsligheten för dessa blir något lägre än för traditionella bildförstärkare då endast typiskt 5-50% av bildförstärkarens ljus träffar den bakomvarande CCD:n.

En annan variant är så kallade EMCCD ("Electron Multiplying CCD"). Här sker en förstärkning av de från det infallande ljuset genererade elektronerna före detektorns utläsningselektronik vilket innebär att denna typ av kameror inte begränsas av detektorns utläsningsbrus på samma sätt som traditionella CCD:er. Känsligheten för dessa kan vara i storleksordningen 100-1000 gånger högre än traditionella CCD:er. På senare tid har liknande varianter baserade på CMOS-teknik utvecklats.

3.4.2 SWIR (Short-Wave InfraRed)

Utvecklingen av känsliga kameror baserade på materialet InGaAs har varit stor under senare år. Nya detektorer med bättre upplösning och dynamik i kombination med tillförlitligare tillverkningsprocesser har gjort dessa kameror populära i en rad militära tillämpningar även om de fortfarande är relativt dyra. Kamerorna har typiskt en våglängdstäckning i intervallet 0,9-1,7 μm men det förekommer varianter med utökad våglängdstäckning i hela det synliga spektret ned till 0,4 μm . Potentiellt är det också möjligt att öka våglängdstäckningen så att längre våglängder runt 2 μm kan detekteras.

Den här typen av kameror har möjlighet att upptäcka en stor mängd lasrar i NIR-området då känsligheten är mycket hög.

3.5 Egna System

I det här kapitlet ges några exempel på system som kan detektera eller upptäcka laserstrålning. Många siktesystem är även utrustade med IR-kameror och laseravståndsmätare men de diskuteras inte här.

3.5.1 Laservarnare

Helikopter 16 är utrustad med laservarnare. Helikopter 14 kommer i närtid att utrustas med laservarnare och på korvett (Visby- och Göteborgsklass) är laservarnare under införande.

3.5.2 Spaningssystem

Siktet på korvett och minröjare (9LV) är utrustat med radar, IR, laseravståndsmätare samt en videokamera. Videokameran består av en SI-Vidicon vilken är baserad på ett kamerarör istället för CCD. Detta är en äldre teknik och bildkvaliteten kan diskuteras men den har hög känslighet i NIR-området vilket innebär att den kan detektera laserstrålning med våglängder upp till 1,1 μm . Kamerans synfält är dock litet vilket ger god identifieringsförmåga men begränsar upptäckts- och avsökningsförmågan.

Siktesplattformen Protector (Vapenstation 01) som bl.a. återfinns på Terrängbil 16 innehåller färgkamera, IR-kamera och laseravståndsmätare. Den visuella sikteskameran (CCD) genererar normalt färgbilder och är känslig i våglängdsbandet 320-650 nm. Vid användande i skymning och mörker finns ett mörkerläge, då färgfiltret kopplas ur och den spektrala känsligheten ökas till intervallet 320-1000 nm. Hur hög känsligheten är vid de längre våglängderna är dock oklart. Kameran är försedd med en optisk zoom där synfältet kan justeras från mycket stort ned till ca. 2°.

Den optiska spaningsenheten till hkp 14 består förutom IR och laseravståndsmätare av en svartvit CCD. Optiken består av en $\times 10$ zoom som ger ett synfält på 1,9° x 1,4° med högst förstoring.

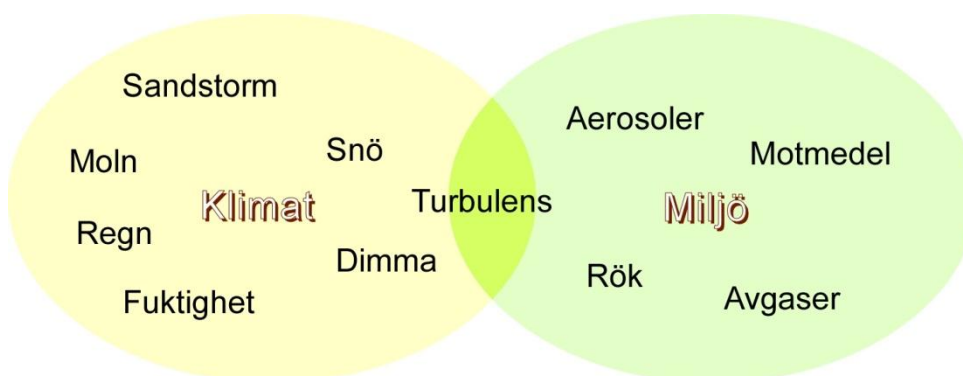
Bildförstärkare finns i ett flertal versioner och generellt kan sägas att de har goda möjligheter att upptäcka laserstrålning med våglängder inom det visuella samt NIR upp till 0,9 μm .

3.6 Hotsystem

Det finns ett stort antal hotsystem som kan upptäcka laserstrålning, generellt har de liknande prestanda som våra egna system men med vissa tillägg. Till exempel är LLLTV vanligt förekommande i ryska system. De bygger ofta på bildförstärkarteknik och har i grunden samma spektrala känslighet som en bildförstärkare. En annan variant som beskrivits tidigare är så kallade EMCCD. I moderna system börjar SWIR-kameror dyka upp i olika tappningar. Användningen och spridningen av dessa i olika tillämpningar förväntas öka dramatiskt i en nära framtid.

4 Atmosfäreffekter

Flera olika atmosfärsfenomen påverkar en laserstråles utbredning i atmosfären. Vanligtvis beror atmosfäreffekter på ett flertal parametrar kopplade till miljö och klimat (Figur 11). Även artificiella effekter så som olika typer av aerosoler kan vara närvarande under taktiska förhållanden och därmed vara av intresse. Atmosfäreffekter påverkar laserstrålen i form av spridningsfenomen, absorption samt turbulens. Spridning sker mot partiklar i atmosfären som har en storlek av samma storleksordning som laserstrålningens våglängd. Turbulenseffekter orsakas av stokastiska förändringar i luftens brytningsindex. I avsnittet nedan beskrivs översiktligt atmosfäreffekter samt hur de kan påverka möjligheter att upptäcka laserstrålning.



Figur 11. Atmosfäreffekter som kan påverka möjligheter att upptäcka laserstrålning som utbreder sig i atmosfären.

4.1 Atmosfärsspridning och dämpning

Atmosfärsspridning beror på partiklar (aerosoler) och molekyler i luftmassan där laserstrålen utbreder sig. Beroende på relationen mellan partikel/molekylstorlek och den studerade laserstrålningens våglängd kan spridningseffekter delas upp i aerosol- och molekylspridning. Utöver spridningseffekter påverkar molekylabsorption möjligheter att detektera laserstrålningen. Vanligtvis uttrycks dessa effekter i termer av en total dämpningskoefficient som kan relateras till siktsträcka. Den totala dämpningen av laserstrålen ges av Beers lag enligt

$$\Delta I = -\sigma_{tot} I \Delta z \quad (1)$$

där σ_{tot} är den totala extinktionskoefficienten, I laserirradiansen samt Δz utbredningssträckan. Den totala extinktionen består av tre delar

$$\sigma_{tot} = \sigma_{aerosol} + \sigma_{Rayleigh} + \sigma_{absorption} \quad (2)$$

som beskrivs mer i detalj nedan. Från den totala extinktionskoefficienten kan transmissionen T beräknas enligt

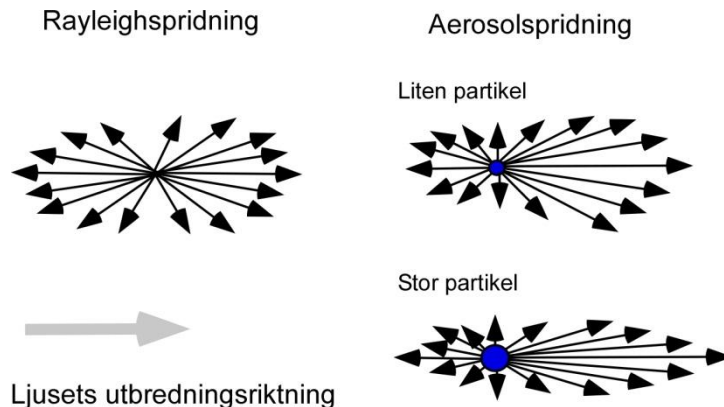
$$T \propto \exp\left(-\int_0^L \sigma_{tot}(z) dz\right) \quad (3)$$

där L är utbredningssträckan. I första hand påverkar transmissionen systemräckvidden, men den har naturligtvis även betydelse för upptäcktsräckvidder inom laserns lob.

4.1.1 Spridning i aerosoler

Aerosolpartiklar finns i varierande storlekar i atmosfären och teorier för elektromagnetiska spridningsfenomen finns väl beskrivna i litteraturen[1-3]. Spridningsegenskaper beror på en rad olika parametrar som våglängd, partikeltyper, fördelning av partiklar samt sammansättning. Vanligtvis är aerosolpartiklarna av samma storleksordning som laservåglängden, vilket gör att en viss typ av fysikaliska spridningsprocesser blir viktiga. Spridningsfenomenet orsakar en dämpning (extinktion) av strålningen som kan beskrivas med en extinktionskoefficient $\sigma_{aerosol}$. Spridningen kan beskrivas i termer av enkel- och multipelspridning där den förstnämnda oftast är dominerande. Den teori som oftast tillämpas vid spridning i aerosoler är Miespridning. Mieteori redogör för spridning av elektromagnetisk strålning mot en ideal sfär. En viktig del här är spridningens vinkelberoende som beskrivs med den s.k. fasfunktionen. En genomgång av spridningsteori är för omfattande för den här rapporten och läsaren hänvisas till ref.[4] för en introduktion.

Eftersom fasfunktionen ger vinkelberoendet hos spridningen kan ”off-axis”-effekter uppskattas vilket är viktigt för att förstå laservarnarfunktioner. Beroende på aerosolernas sammansättning och egenskaper fås olika spridningsegenskaper vid sidan av laserstrålens lob. I Figur 12 illustreras spridningseffekter av ljus mot molekyler (Rayleighspridning) och aerosolpartiklar. Enkelt uttryckt sprider små partiklar ljuset i fler riktningar jämfört med större partiklar där tydliga spridningslobar kan uppskattas via Mieteori. Följaktligen kommer aerosolinnehåll och fördelning att påverka hur mycket laserstrålning som sprids vid sidan av huvudlobens axel och därmed möjligheten att detektera laserstrålning bredvid den punkt till exempel en avståndsmätare är riktad mot. Utöver enkelspridning behöver även multipelspridningseffekter beaktas men då blir beskrivningen mer komplex. Vanligtvis försummas multipelspridningseffekter då ”off-axis”-effekter studeras.



Figur 12. Illustration av spridningseffekter av ljus mot molekyler (Rayleigh) och aerosolpartiklar.

Aerosolegenskaper kan bestämmas från meteorologiska förhållanden och parametrar. Här finns olika modeller tillgängliga. Typiska aerosoler som måste beaktas inkluderar naturligt förekommande fenomen som dimma, regn och snö samt artificiella partiklar som t.ex. rök, avgaser och luftföroreningar. I ref.[4] finns olika aerosolmodeller beskrivna.

4.1.2 Molekylspridning

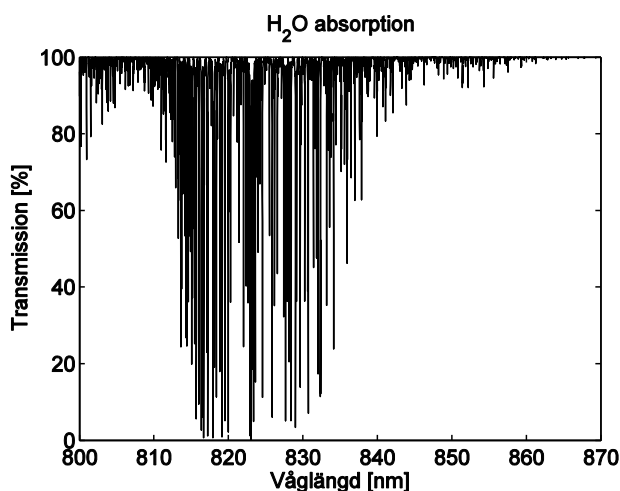
Molekylspridning, eller Rayleighspridning, beskriver fenomenet då elektromagnetisk strålning sprids mot en enskild molekyl. Här är storleken på molekylerna betydligt mindre än laservåglängden. Rayleighspridningen är elastisk och inducerar dipolmoment i molekylerna. Extinktionskoefficienten för molekylspridning ($\sigma_{Rayleigh}$) är oftast betydligt

mindre än aerosolextinktionen vilket medför att dämpningen från den tidigare kan försummas.

4.1.3 Absorption

Molekylabsorption av laserstrålning i atmosfären orsakas av luftbeståndsdelar som t.ex. syre, kväve, koldioxid, vatten och andra gasmolekyler. Strålningen absorberas genom excitationer i molekylen då energi upptas, huvudsakligen genom vibration- och rotationsprocesser. Hur effektiv processen är beskrivs vanligtvis med tvärsnittsmått och kan till en första approximation definieras av Beers lag, se ekv. (1).

Effekter från alla närvarande molekyler inkluderas genom att summera individuella tvärsnitt och integrera ett effektivt tvärsnitt längs utbredningssträckan. Absorptionen i vissa våglängdsområden kan vara ganska kraftig så vid analys av laserstrålning, som vanligtvis har en begränsad spektral bandbredd, så måste absorptionsprocesser analyseras och läget på absorptionslinjer bestämmas. Miljöegenskaper och klimat har stor inverkan på absorptionseffekter och en detaljerad analys kan vara besvärlig. Ett exempel är marin miljö där laservarnare finns installerade på större plattformar.



Figur 13. Absorptionslinjer för vattenmolekyler i våglängdsområdet 800-870 nm för en utbredningssträcka på 1 km under antagande att atmosfären var sub-arktisk sommar beräknat från HITRAN-databasen.

Molekylabsorptionen för en specifik våglängd kan beräknas med program som HITRAN som bygger på experimentella databaser[5]. Figur 13 visar ett exempel där vattenabsorption beräknats för en 1 km lång utbredningssträcka under antagandet att modellen för atmosfären är sub-arktisk sommar. Här ser vi tydliga smala absorptionslinjer i våglängdsområdet 815 till 835 nm.

4.1.4 Dämpning och siktförhållande

Dämpning av optisk strålning i atmosfären kan relateras till siktförhållande där R_v definieras som siktsträcka enligt

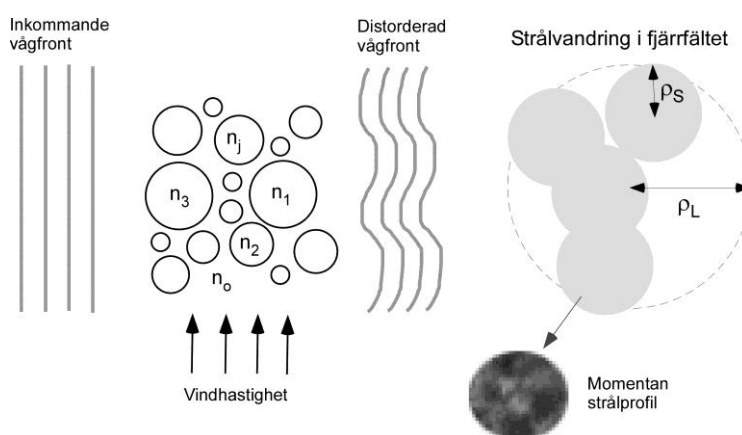
$$R_v = \frac{3.912}{\sigma_v} \quad (4)$$

med σ_v som medel dämpningsfaktorn i våglängdsområdet 0,38 till 0,72 μm . En typisk siktsträcka en solig dag med klart väder är 20 km medan den kan minska till 3-5 km i lätt dimma eller dis. Motsvarande dämpningsfaktor är av storleksordningen 0,1 till 2 km^{-1} .

Ekvation (4) kan även modifieras för att gälla andra våglängder än de ovan specificerade[6].

4.2 Turbulens

Turbulenseffekter i atmosfären uppkommer på grund av stokastiska variationer i luftens brytningsindex som orsakar fenomen som strålvandring, strålbreddning och intensitetsfluktuationer (scintillationer) hos laserstrålningen[7]. Brytningsindexvariationerna uppstår pga. temperatur- och tryckförändringar i luftmassan och orsakar fasdistorsioner hos laserstrålningens vågfront (Figur 14). Effekter från turbulens har både rumslig och temporal inverkan på laserstrålen. En viktig parameter är vindförhållanden som till stor del styr temporala effekter. Enkelt uttryckt så kan man säga att turbulensen är starkast nära marken en varm solig dag och avtar med höjden. Styrkan hos turbulensen kan till viss del förutsägas med modeller som beror på miljö och metrologiska parametrar.



Figur 14. Schematisk bild som visar hur vågfronten distorderas pga. turbulens i atmosfären samt illustration av strålvandring i fjärrfältet.

4.2.1 Strålvandring

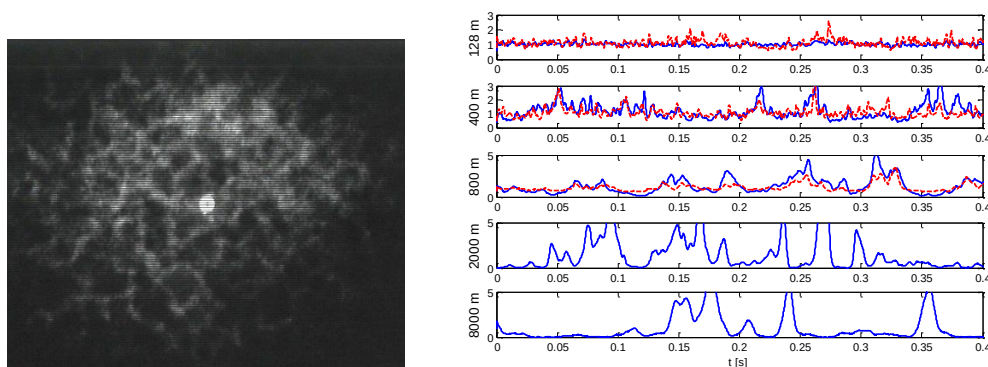
Strålvandring är ett storskaligt fenomen där tyngdpunkten hos hela laserstrålen flyttar på sig pga. av turbulensen i atmosfären. Om vi tänker oss att turbulensen orsakar områden med olika storlek och brytningsindex så kommer en laserstråle som passerar genom området att ändra riktning enligt Snells brytningslag. Hur stora riktningsförändringarna blir bestäms av storleken på turbulenscellerna (kan i en enkel modell liknas som linser) och laserstrålens dimensioner. I Figur 14 illustreras strålvandring i fjärrfältet där den momentana strålradien har storleken ρ_S och den medelvärdesbildade (över en längre tidsperiod) har strålradien ρ_L . Den momentana strålprofilen kan även vara distorderad och uppvisa intensitetsfluktuationer. Hastigheten hos strålvandringen påverkas av tvärvinden som förflyttar turbulenscellerna.

Strålvandringen bestäms till största delen av turbulensegenskaper dvs. turbulensstyrka och geometriska förutsättningar som dimensioner hos laserstrålen. En kraftigt divergent laserstråle förväntas uppvisa betydligt mindre strålvandring jämfört med en kollimerad. Våglängden har endast svagt inflytande på strålvandringseffekter. Vanligtvis är strålvandringen i normal atmosfär och inte för stark turbulens begränsad. Typiska värden kan ligga i intervallet 5 till 30 μ rad i medelvärde. Effekten på möjligheten att upptäcka en laser är därför begränsad, däremot kan systemets prestanda påverkas.

4.2.2 Intensitetsfluktuationer (scintillationer)

Den viktigaste turbulenseffekten är intensitetsfluktuationer hos den momentana strålprofilen s.k. scintillationer. Scintillationer orsakar en uppbrytning av strålprofilen och är beroende av parametrar som våglängd, turbulensstyrka, utbredningssträcka och aperturstorlek. Vid kortare våglängd blir effekter från scintillationer betydligt värre än vid längre våglängder i det mellan- och långvågiga IR-området. Scintillationerna ökar också som funktion av utbredningssträckans längd upp till ett avstånd då mättnad sker och ingen ytterligare försämring av strålprofilen kan observeras. Intensitetsfluktuationerna varierar också i tiden och här beror förändringarna på tvärvind, aperturdimension samt storlek hos turbulenscellerna.

I Figur 15 visas ett exempel på hur ett stråltvärsnitt kan se ut efter utbredning genom en turbulent atmosfär. Typiska temporala förändringar visas också i exemplet där man kan se att vid kraftig turbulens och långa avstånd kan signalen ibland bli väldigt svag. Variationerna beror också på dimensionen hos aperturen som används för att registrera signalen. Om aperturen är stor i förhållande till turbulenscellerna sker en medelvärdesbildning som minskar intensitetsvariationerna. Temporala förändringar sker vanligtvis på tidskalan 2-3 till 10 ms.



Figur 15 Exempel på scintillationer då en laserstråle utbreder sig nära marken. Avståndet var 1300 m och våglängden 1,06 μm . Den intensiva fläcken i mitten härrör från en hörnkub som används för att rikta in lasern (vänster). Exempel på signalfuktuationer som funktion av tiden orsakade av turbulens för olika utbredningssträckor och våglängder (röd streckad 850 nm, blå heldragen 1535 nm, höger).

Intensitetsfluktuationer kan påverka möjligheten att identifiera pulssekvenser eftersom pulser som är lika starka integrerat över hela laserloben kan ge skillnader i signalstyrka på flera storleksordningar för en detektor i en punkt. Detta kan vara ett problem till exempel vid identifiering av kodningen för ett ledstrålesystem med en laservarnare. Effekten på lasersystemens prestanda är dock ofta större än effekten på möjligheten att upptäcka lasern.

4.2.3 Strålbreddning

En annan effekt av atmosfärsturbulens är att strålens tvärsnitt ökar pga. strålvandringen och stråluppbrytning som beskrivits ovan. Om integrationstiden hos sensorn som används för att studera strålprofilen är längre än tidskalan för strålvandring/uppbrytning kommer en medelvärdebildad strålprofil att fås (se Figur 14). Följaktligen minskar medelirradiansen vilket påverkar räckviddsberäkningar.

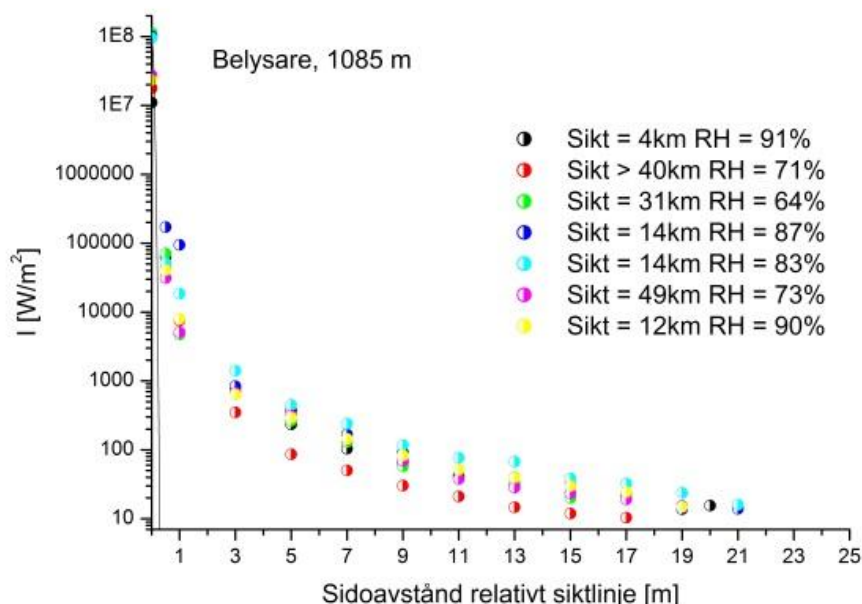
5 Upptäckt av laser i olika situationer

I detta kapitel beskrivs hur olika typer av sensorer och varnare fungerar och dess möjligheter att upptäcka laserstrålning i olika situationer.

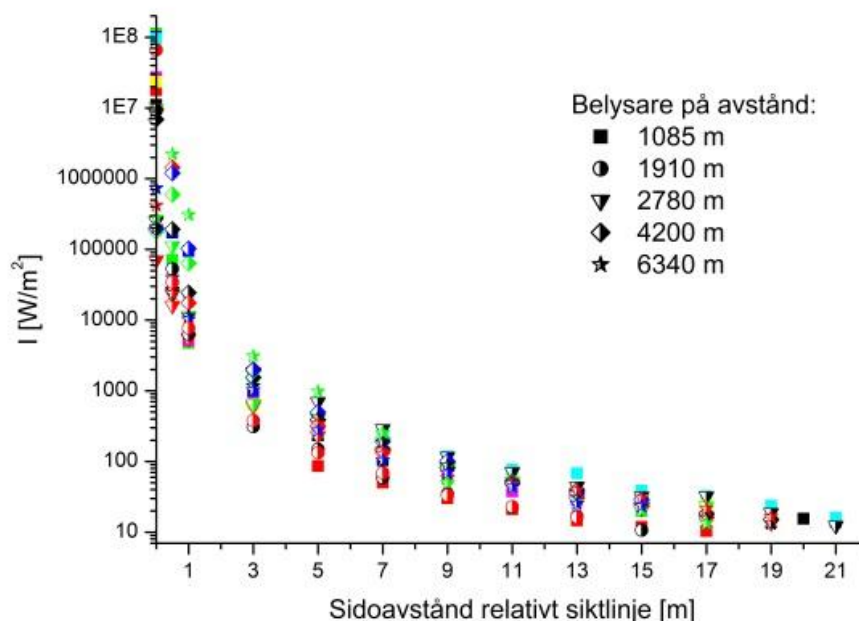
5.1 Laservarnare

Laservarnare kommer i princip alltid upptäcka pulsade lasrar som är riktade rakt mot laservarnarsensorn. I alla system som beskrivs i kapitel 2, förutom ledstrålesystem, så ska den reflekterade laserstrålningen användas. Eftersom bara en liten del av effekten reflekteras mot mottagaren så kommer irradiansen (effekt per yta) vid den belysta plattformen vara högre än för mottagaren i det system som ska använda lasern och därför kunna upptäckas även med en mindre känslig sensor på plattformen.

På grund av atmosfärsspridningen och på grund av att en laserstråle även om den är smal inte är punktformad så kommer laserpulser upptäckas även om lasern riktar något vid sidan av sensorn. Hur stort avstånd i sidled laserstrålen kan detekteras på beror på hur stark spridningen i atmosfären är och sträckan laserstrålen propagerar. Spridning orsakad av partiklar och av turbulens diskuterades i mer detalj i avsnitt 4. Generellt innehåller luften mer spridande partiklar över saltvatten, och därför är avståndet i sidled extra stort för fartyg. Ett bidrag som är mer konstant fås också från spridning i optiken på lasersystemet. Hur signalen kan variera med avståndet mellan den punkt där sensorn sitter och lasern pekas visas i Figur 16 och Figur 17. Det finns teoretiska och empiriska modeller för "off-axis"-spridning som kan användas för att beräkna upptäcktsmöjligheten med laservarnare i den vetenskapliga litteraturen, till exempel [9-11].



Figur 16. Bilden visar hur irradiansen från en laser varierar utanför huvudloben i olika väderförhållanden. Notera hur irradiansen sjunker väldigt snabbt från direkt belysning i mitten av strålen till den spridda strålningen bara någon meter i sida som kan vara upp till fem storleksordningar lägre. Spridningen i atmosfären gör att pulsen sedan kan mätas 20 m från strålens centrum även om irradiansen vid utbredning i vakuum sjunker till mycket låga nivåer inom mindre än en meter för den laser som användes vid proven (tunn svart linje väldigt nära y-axeln).



Figur 17. Exempel på mätningar av spridning av laserstrålning för olika avstånd mellan laser och sensor. Varje symbol finns i flera färger som representerar mätningar vid olika tillfällen. Notera att effekten av avståndet är mycket liten och framförallt finns för små avstånd från siktlinjen.

Laservarnare reagerar på snabba ändringar av irradiansen och är därför bra på att detektera till exempel pulssade avståndsmätare och laserbelysare. System som använder kontinuerliga lasrar eller lasrar med mycket hög pulsrepetitionsfrekvens (MHz) upptäcks ofta inte av laservarnare eftersom de är svåra att skilja från variation i bakgrundsljus.

Reflekterad strålning från omgivningen eller närliggande objekt kan detekteras av en laservarnare även om reflexen är diffus, förutsatt att irradiansen från lasern är tillräckligt hög. Detta är normalt fallet med t.ex. laserbelysare och kraftfullare laseravståndsmätare. Sändaren i laserledstrålestyrda robotar och andra spaningssystem sänder normalt med så låg effekt att diffust reflekterad strålning inte detekteras. Det finns dock en ytterst liten chans att en laservarnare reagerar när laserstrålen från dessa system belyser en helt annan punkt. Det som då krävs är att lasern reflekteras mot en speglade yta och råkar träffa just den punkt där laservarnaren är placerad. Till exempel kan glas eller metallytor ge denna effekt, men sannolikheten att laserstrålen ska reflekteras just mot laservarnaren är mycket liten.

Samma effekt kan med högre sannolikhet fås om man riktar en egen laser mot något retroreflekterande objekt, till exempel vid mätning av avstånd mot en trafikskylt. Vid integration på plattformar är detta ofta löst genom att laservarnarna inaktiveras när de egna lasrarna används. Laservarnaren är generellt mindre känslig än avståndsmätarens mottagare eftersom laservarnaren måste klara många olika typer av lasrar, men signalen från ett retroreflekterande objekt är så mycket högre än den diffusa reflexen från en vanlig yta att den kan trigga laservarnaren. Även sikten, kikare och andra optiska system skulle kunna ge retroreflexer som triggar laservarnaren när avståndsmätaren riktar mot dem. Att göra detta medvetet ska undvikas då den starka reflexen kan skada mottagaren i en avståndsmätare.

5.2 Bildalstrande sensorer

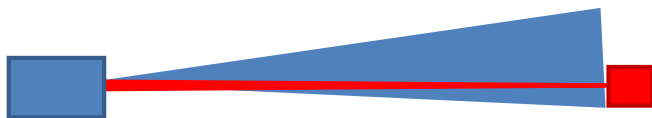
Här diskuteras upptäckt av laserstrålar med de andra sensortyper, förutom laservarnare, som beskrivs i kapitel 3. Några saker som är gemensamt för dessa sensorer är att de har begränsade synfält och därför inte alltid observerar den riktning lasern kommer ifrån. De är också begränsade i våglängdsområde, även om det finns olika sensorer för alla våglängder där det finns lasrar. Kameror har också oftast en begränsad integrationstid och det är möjligt att en laserpuls kommer mellan kamerabilderna och därför missas. Upptäckt av lasrar direkt med ögat som sensor behandlas inte eftersom det är få lasrar i det synliga våglängdsområdet som används i militära sammanhang, dock gäller i stort samma egenskaper som för en kamera.

En fördel med bildalstrande sensorer jämfört med laservarnare är att de bättre kan upptäcka kontinuerliga lasrar eftersom det är möjligt att se fördelningen i rummet och inte bara tidsvariationer.

Nedan beskrivs de olika scenarier som är möjliga då en bildalstrande sensor tittar mot en laser från olika håll.

5.2.1 Laser belyser sensor, sensorn riktad mot laser

Om en laser belyser en kamerasensor från en position inom kamerans synfält så kommer den insamlade effekten vara mycket hög jämfört med vanlig avbildning. Även en ganska svag laser på långt avstånd kommer blända kameran, och risken för att skada sensorn är betydande med främst pulsade lasrar. Bländningseffekten gör att det ofta är svårt att identifiera personer eller objekt nära lasern eller vid stark belysning ens avgöra positionen på lasern eftersom en stor del av bilden blir mättad. Ett exempel på en bild från ett fartygssikte belyst av en diodlaser visas i Figur 19. Med kontinuerliga eller repetitivt pulsade lasrar kan kamerans integrationstid och förstärkning i princip sänkas tills laserbelysningen bara blir en punkt, men då dämpas ofta även bakgrunden ut så att lasern blir svår att lokalisera.



Figur 18. Illustration av hur lasern (röd) sänder ut en laserstråle rakt mot en sensor (blå), samtidigt som sensors synfält är riktat mot laserns position.

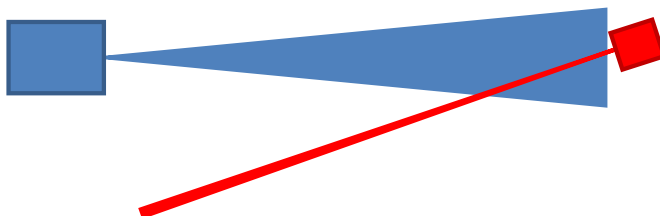
Enstaka korta laserpulser kan fortfarande missas om de kommer utanför kamerans aktiva integrationstid. Ofta är integrationstiden mindre än halva tidsavståndet mellan bilder, så denna risk är relativt stor. I stark belysning dras integrationstiden ner, så förutom att signal till bakgrundsförhållandet blir mindre så ökar också risken att kameran inte är aktiv när laserpulsen avfyras. För att lasern ska synas i bilden krävs också att våglängden stämmer med kamerans känslighetsområde. Sensorn kan skadas även av våglängder utanför känslighetsområdet och av pulser som kommer när kameran inte är aktiv eller ens påslagen.



Figur 19. I ett fartygssikte syns en diodlaser riktad mot fartyget tydligt. I det här fallet är irradiansen så svag att bara en liten del av bilden bländas ut. Positionen kan bestämmas men den närmaste omgivningen till lasern är svår att se, och därmed är det svårt att identifiera om laserbelysningen utgör ett hot eller inte.

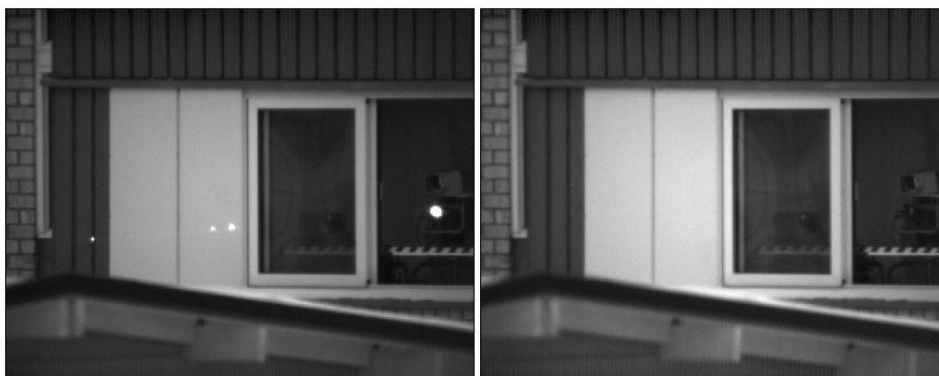
5.2.2 Sensor riktad mot laser, men utanför laserlob

Spridningen av laserstrålning i glas är inte försumbar. Eftersom lasersystem oftast har en lins eller ett fönster som skyddar mot smuts i öppningen så kommer strålning spridas i alla riktningar. Lasern kan därför upptäckas med en känslig kamera även om laserstrålen inte är riktad ens i närheten av kameran, vilket illustreras i Figur 21. Att upptäcka lasern är naturligtvis lättare i mörker när kontrasten mot bakgrunden blir kraftigare, men spridningen från optiken kan vara stark nog att upptäcka även i dagsljus. Spridningen är vinkelberoende och ju närmare laserloben man befinner sig desto starkare är signalen.



Figur 20. Illustration av hur lasern (röd) sänder ut en laserstråle mot en annan position än där sensorn (blå) är placerad, samtidigt som sensorns synfält är riktat mot laserns position.

Möjligheten att spana efter lasrar när man själv inte är belyst kan användas för att upptäcka fientliga styrkor som använder lasrar. Pulsade ljuskällor som till exempel belysarlaser syns ofta väldigt tydligt i rörliga bilder och möjligheten att spana efter lasrar vid 1 och 1.5 μm är en viktig funktion som kan fås med SWIR-kameror.

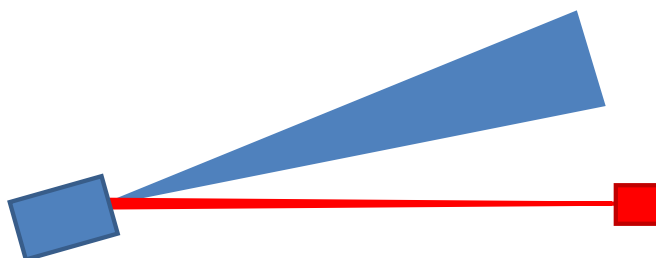


Figur 21. Två bilder som visar en avståndsmätarlaser placerad i ett öppet fönster med och utan laserpuls. Spridningen i optiken syns som en kraftig ljuspuls. De tre svagare punkterna som ligger på en linje i vänstra delen av bilden är spridning i snöflingor. Bilderna är tagna med en SWIR-kamera i tidig skymning med kameran 130 meter från lasern.

Genom att använda ett tomt rör runt laserstrålen en sträcka efter den sista glasytan som strålen går igenom kan den vinkelsektor som spridningen är synlig från minskas. Detta kan vara viktigt för till exempel framskjutna observatörer som utför målutpekning.

5.2.3 Lasern belyser sensor, men sensorn riktad åt annat håll

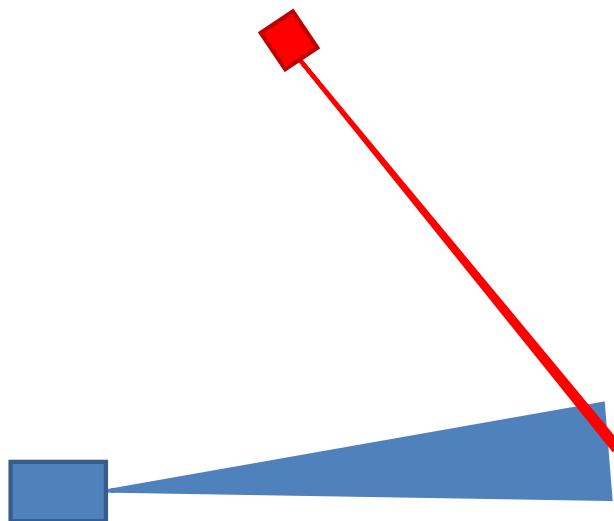
När en laser belyser en kamera från en position utanför kamerans synfält så kommer laserstrålning spridas från optiken och framförallt reflekteras av den mekaniska infattningen till linserna i objektivet. Därför blir sensorn kraftigt belyst och bilden delvis utbländad. Ofta skapas halvcirkel- eller bågformade strukturer i bilden. På grund av detta är det möjligt att upptäcka att man blir belyst med laser även om kameran inte tittar mot laserkällan, men riktningen kan inte bestämmas.



Figur 22. Illustration av hur lasern (röd) sänder ut en laserstråle rakt mot en sensor (blå), samtidigt som sensorns synfält är riktad mot en annan position än där lasern är placerad.

5.2.4 Sensor riktad mot samma punkt som laser belyser

Reflektionen när en laserstråle träffar en yta kan ses i en kamera. Detta används vid aktiv avbildning och målutpekning. Med en kamera riktad mot den egna positionen kan man därmed även upptäcka om man är belyst med laser. Dock är det svårt att få tillförlitlig information om vilken riktning man blir belyst från genom att titta på den spridda reflexen. Ett exempel på hur man på avstånd kan se att ett mål är utpekad av en laserbelysare visas i Figur 24. Eftersom laserbelysare ger ett mönster av pulser framträder de ofta väldigt tydligt i videosekvenser.



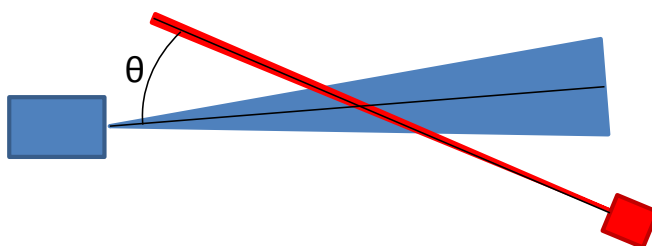
Figur 23. Illustration av hur lasern (röd) sänder ut en laserstråle mot ett mål, samtidigt som en sensor (blå) observerar samma mål.



Figur 24. När en belysarlaser belyser ett mål syns en tydlig reflex i en SWIR-kamera. I detta fall är kameran ca 5 km från det belysta målet. Mönstret av pulser i en videosekvens gör att belysningen framträder väldigt tydligt.

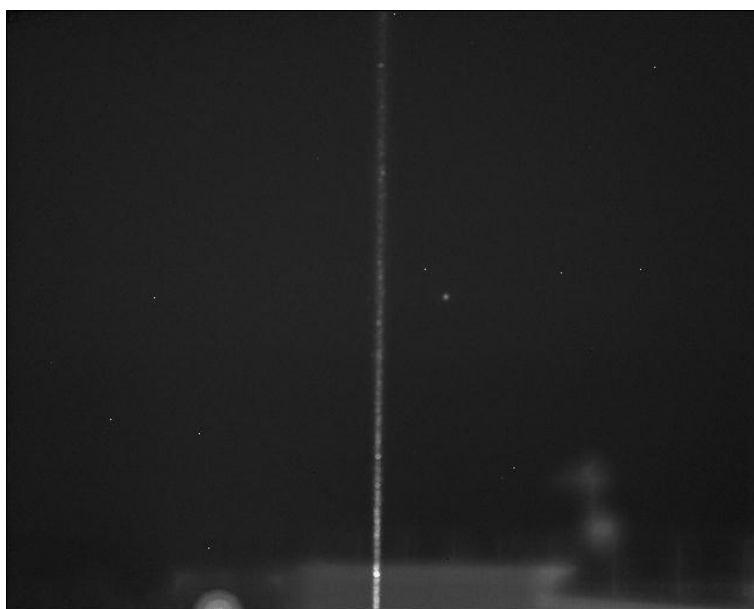
5.2.5 Sensorsynfält korsar laserlob i luften

Att upptäcka en laserstråle enbart från spridningen i luften är det för sensorn mest utmanande fallet vi diskuterar. I dagsljus räcker den spridda effekten normalt inte till för att synas mot bakgrunden. I mörker är det möjligt att detektera en avståndsmätare för spridningsvinklar upp till minst 45° om korsningspunkten mellan laserstråle och kameran synfält är max ett par hundra meter från kameran i klar luft. Spridningsvinkeln är definierad som θ i Figur 25.



Figur 25. Illustration av hur lasern (röd) sänder ut en laserstråle rakt mot ett mål och en sensor (blå) spanar i en annan riktning, så att sensorns synfält och laserstrålen korsar varandra i luften.

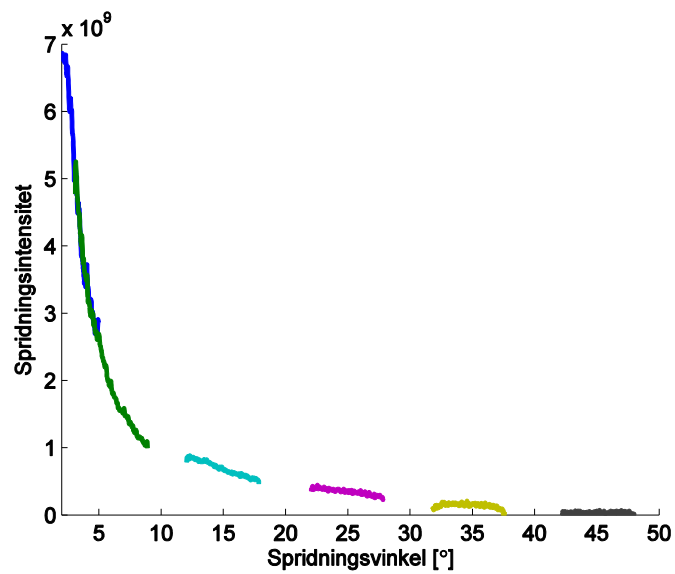
Ett exempel på hur en laserstråle kan se ut i en kamerabild visas i Figur 26. För en pulsad laser kommer strålen bara synas i vissa fall beroende på att kamerans integrationsperiod och laserpulsen inte alltid kommer samtidigt.



Figur 26. Exempel på hur en avståndsmätarpuls kan se ut med en SWIR-kamera när laserstrålen korsar kamerans synfält. Mätningen är gjord i mörker, med snäv vinkel och med korsningspunkten ca 100 m från kameran. Lasern är riktad uppåt och syns därför som ett vertikalt streck i bilden.

Spridningen i atmosfären är olika stark i olika riktningar, med störst spridning för små spridningsvinklar. Resultatet av mätningar på FOI presenterade i Figur 27 visar hur den spridda intensiteten sjunker med ökande vinkel, men att mätbar strålning fanns ut till 35° spridningsvinkel.

Om det är mycket damm, rök, dimma, regn eller snöfall kommer spridningen vara mycket kraftigare och det blir lättare att upptäcka laserstrålen. I förhållanden med mycket partiklar i luften kan lasern synas även i dagsljus. Ett exempel på hur snöflingor lyser upp visas i Figur 21.



Figur 27. Spridningen i atmosfären sker främst genom små ändringar av strålningens riktning. Den spridda intensiteten avtar därför snabbt med ökande vinkel, men i försöket kunde strålningen mätas ut till ca 35° vinkel relativt laserstrålens riktning.

6 Diskussion

Här sammanfattas och diskuteras det som har tagits upp i rapporten med avseende på hur hotlasrar kan upptäckas samt hur upptäckt kan undvikas vid användning av laser i militära sammanhang.

6.1 Upptäckt av hotlasrar

Laservarnare, som många plattformar idag är utrustade med, kan detektera flera olika hotlasrar som lyser rakt mot dem eller reflekteras in i dem. Detta gäller framför allt avståndsmätare och laserbelysare som sänder ut pulser med hög effekt. Ledstrålesystem som har jämförelsevis låg medeleffekt är svårare för laservarnare att upptäcka. Även laseravståndsmätare som utnyttjar hög prf för att få ner pulsenergin kan vara svåra att detektera. Kontinuerlig strålning upptäcks normalt inte av laservarnare.

Laserpekare kan upptäckas med bildförstärkare, SWIR-sensorer eller visuella kameror då dessa lasrar ofta ligger i det visuella eller nära infraröda området. Det som främst kan upptäckas är spridningen i laserns utgångsfönster eller själva laserfläcken. Nattetid kan även själva strålen detekteras genom att den sprids av partiklar i atmosfären. Detektion av dessa lasrar kan underlättas om de är modulerade och då uppfattas som blinkningar i en bildalstrande sensor. Även laserbelysare kan upptäckas på motsvarande sätt och är ofta lättare att upptäcka då lasereffekten är högre. För avståndsmätare är antalet pulser oftast så få att risken att de missas i en videosekvens är stor, antingen för att de kommer när kameran är inaktiv mellan integrationstiderna, eller för att de bara finns i en bild och då inte upptäcks av en operatör.

Med en kamera (t.ex. visuell eller SWIR) som bevakar den egna positionen kan t.ex. belysare, avståndsmätare eller laserpekare detekteras, men möjligheterna till en motmedelsinsats blir begränsade jämfört med en varning från en laservarnare, eftersom en kamera inte ger information om varifrån hotet kommer eller vad det är för typ av hot. En bildalstrande sensor kräver också en aktiv övervakning vilket vanligen inte är praktiskt möjligt under längre tidsperioder.

6.2 Undvika upptäckt vid användning av laser

Det bästa sättet att undvika upptäckt är naturligtvis att inte använda sig av laser i onödan och om man måste använda den att belysa under så kort tid som möjligt.

För att minska risken att t.ex. en kamera detekterar laserljus som sprids i utgångsfönstret (avsnitt 5.2.2) kan strålen skärmas av den första sträckan, vilket kraftigt minskar vinkeln från vilken spridningen syns.

Att använda sig av okonventionella våglängder är ett sätt att undvika upptäckt. Sensorer för våglängder $>1,6 \mu\text{m}$ är ovanligt. I t.ex. aktiva spaningssystem kan det vara fördelaktigt att använda sig av våglängder $>1 \mu\text{m}$ då dessa inte syns i bildförstärkare, som är standardutrustning vid mörkeroperationer.

Vad gäller laseravståndsmätare går teknikutvecklingen framåt och de senaste typerna av avståndsmätare använder sig ofta av pulståg med hög prf vilket möjliggör lägre energi i varje puls jämfört med typer som sänder ut en puls i taget (singelpuls). Den låga effekten gör dem svårare att upptäcka för laservarnarsensorer.

Något som det forskas på idag är fotonräknande detektorer, dvs. detektorer som känner av om de träffas av en enda foton. Denna typ av detektorer gör det möjligt att konstruera laseravståndsmätare med ännu lägre laserpulsenergi då väldigt lite reflekterat ljus behöver nå detektorn. Dock används många pulser och lasern är synlig i en kamera.

7 Slutsats och rekommendationer

Sammanfattningsvis kan sägas att lasrar i allmänhet bör användas med försiktighet för att man ska undvika att röja sin position. Laserbaserade system är dock kraftfulla verktyg vid militära operationer och kan, rätt använda, ge stora fördelar. Det är viktigt att följa med i teknikutvecklingen och försöka ligga steget före sina motståndare vad gäller nya tekniker och våglängdsområden som kommer på sikt.

Då avståndsmätning är den vanligaste tillämpningen av laser inom FM är s.k. smygande avståndsmätning där fotonräknande detektorer utnyttjas ett område som är högst aktuellt att följa utvecklingen inom. I dagsläget skulle även system vid till exempel 2,1 μm våglängd kunna användas med mycket lite risk för upptäckt, men om användningen blev utbredd så skulle laservarnare utvecklas även för våglängder de inte täcker idag.

Avancerade plattformar bör utrustas med laservarnare då det idag är den enda tekniken som inte kräver aktiv övervakning. Laservarnaren kan också klassificera och identifiera hoten för effektiv motverkan. Det skall dock noteras att tidsaspekten är kritisk och tidsförloppen korta. Även om t.ex. motståndaren har laservarnare är sannolikheten stor att effektiva och snabba motmedel saknas. Invisningsnoggrannheten är ofta inte tillräckligt bra för direkt moteld. För t.ex. en framskjuten grupp med laserbelysare gäller att belysa under kortast möjliga tid samt att lämna platsen snabbt efter genomförd insats. Självklart skall laser användas sparsamt om man misstänker att motståndaren har varnarsystem.

Vid mörker är det viktigt att inte använda laserpekare och scenbelysare i onödan. Dessa upptäcks enkelt med bildförstärkare. Ett alternativ i vissa fall är att i stället använda SWIR-kameror med aktiv belysning som unyttjar våglängder utanför bildförstärkares och kiseldetektorers känslighetsområde.

SWIR-kameror skulle också kunna göra nytta vid spaning efter motståndarens användning av lasersystem, då de flesta militära lasersystem ligger inom det våglängdsområde som täcks av SWIR-kameror, till exempel laserpekare vid 0,8 μm , laserbelysare vid 1,06 μm och avståndsmätare vid 1,5 μm . Det som då främst detekteras är spridningen i optiken på lasersystemen. Dock krävs att sensorn tittar mot lasersystemet just när det används, och därmed är det framförallt för lasersystem med långa belysningstider som möjligheten att upptäcka dem med en kamera är användbar. För en enstaka puls från en avståndsmätare så är det mer en slump om man råkar upptäcka den.

Som beskrivits i rapporten är det fullt möjligt att upptäcka laserstrålning med olika typer av kamerasystem. Risker skall dock inte överdrivas då sannolikheten trots allt är begränsad om man inte redan är upptäckt och under bevakning. I situationer där man förväntar sig att övervakning kan finnas så är det framförallt spridningen från optiken i lasern och reflektionen av laserstrålen mot ytor som kan upptäckas. Spridning från luften är mycket svagare, men kan uppfattas under för upptäckt gynnsamma förhållanden med mycket partiklar och låg bakgrund.

8 Referenser

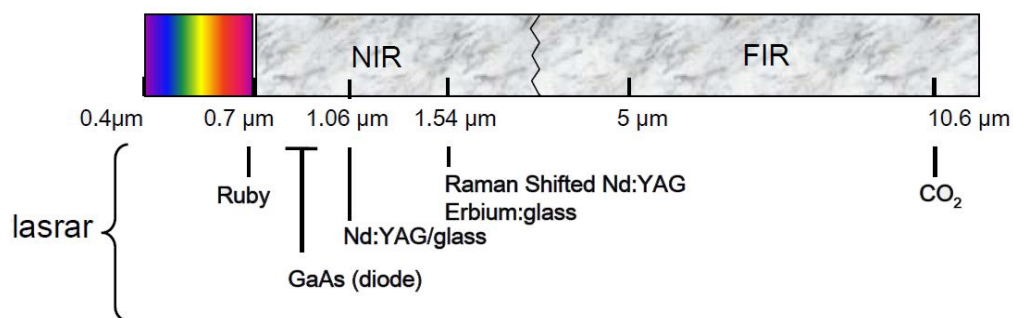
- [1] S. K. Friedlander, *Smoke, Dust, and Haze: Fundamentals of Aerosol Dynamics*: Oxford University Press, 2000.
- [2] A. A. Kokhanovsky, *Aerosol Optics: Light Absorption and Scattering by Particles in the Atmosphere*: Praxis Pub., Chichester, UK, 2008.
- [3] S. Twomey, *Atmospheric aerosols*: Elsevier Scientific Pub. Co., 1977.
- [4] F. G. Smith, *The infrared and electro-optical systems handbook, Atmospheric propagation of radiation* vol. 2: SPIE, 1996.
- [5] L. S. Rothman, I. E. Gordon, A. Barbe, D. C. Benner, P. F. Bernath, M. Birk, V. Boudon, L. R. Brown, A. Campargue, J. P. Champion, K. Chance, L. H. Coudert, V. Dana, V. M. Devi, S. Fally, J. M. Flaud, R. R. Gamache, A. Goldman, D. Jacquemart, I. Kleiner, N. Lacome, W. J. Lafferty, J. Y. Mandin, S. T. Massie, S. N. Mikhailenko, C. E. Miller, N. Moazzen-Ahmadi, O. V. Naumenko, A. V. Nikitin, J. Orphal, V. I. Perevalov, A. Perrin, A. Predoi-Cross, C. P. Rinsland, M. Rotger, M. Simecková, M. A. H. Smith, K. Sung, S. A. Tashkun, J. Tennyson, R. A. Toth, A. C. Vandaele, and J. Vander Auwera, "The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database", *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, vol. 110, pp. 533-572, 2009/7//.
- [6] T. Kaurila, A. Hågård, and R. Persson, "Aerosol extinction models two sites in Sweden", *Appl. Opt.*, vol. 45, p. 6750, 2006.
- [7] L. C. Andrews and R. L. Phillips, *Laser beam propagation through random media*: SPIE Press, 2005.
- [8] N. Roy, "Off-axis laser detection model in coastal areas", *Optical Engineering*, vol. 47, p. 086002, 2008.
- [9] J.-P. Cariou, "Off-axis detection of pulsed laser beams simulation and measurements in the lower atmosphere", *Proc. SPIE*, vol. 5086, 2003.
- [10] F. Hanson, I. Bendall, C. Deckard, and H. Haidar, "Off-Axis Detection and Characterization of Laser Beams in the Maritime Atmosphere", *Appl. Opt.*, 2011.
- [11] A. M. J. van Eijk, J. S. deGrassie, C. C. Davis, S. M. Hammel, and A. K. Majumdar, "Modeling off-axis laser scattering: effects from aerosol distributions", vol. 8517, p. 85170V, 2012.

Appendix– Begreppsförklaringar

Här beskrivs parametrar som kan variera för olika typer av lasrar och lasertillämpningar och som är relevanta för rapporten. Även en del begrepp som förekommer beskrivs närmare.

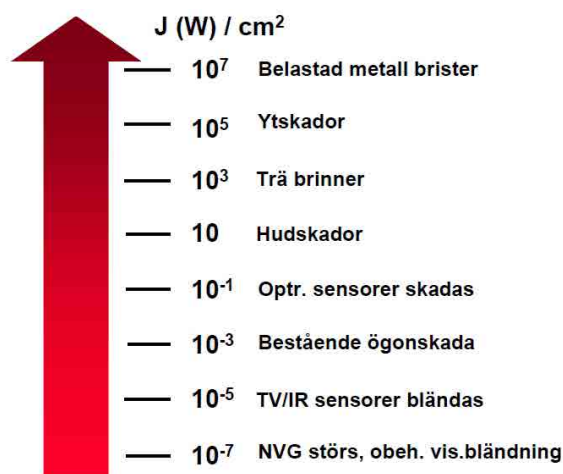
En laser sänder ut koherent, monokromatiskt elektromagnetisk strålning vilket betyder att fotonerna har samma fas och våglängd när de sänds ut. Detta gör att spridningen kan bli väldigt liten och mycket hög effekt koncentrerat till en mycket liten area kan åstadkommas.

Våglängd (λ [μm]) och frekvens(ν [Hz]): Ljus är elektromagnetisk strålning och kan beskrivas som vågor. Våglängden är längden mellan två vågtoppar, ofta uttryckt i nm (10^{-9} m) eller μm (10^{-6} m). Synligt ljus har våglängder mellan 400 nm (blått) och 700 nm (rött). Ljus med längre eller kortare våglängd syns inte med blotta ögat. Ljusets våglängd kan också uttryckas i frekvens (ν) med enheten Hz. Våglängd och frekvens relaterar till varandra enligt $\nu = \frac{c}{\lambda}$, där c är ljusets hastighet.



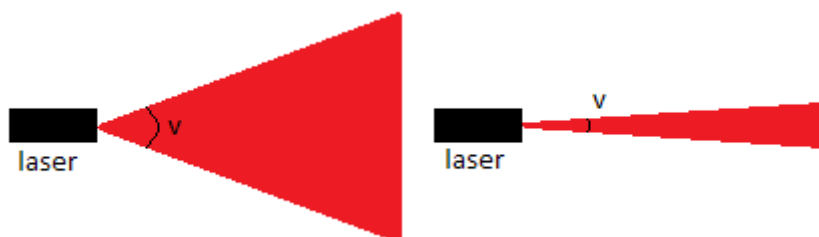
Figur 28. De synliga och infraröda våglängdsområdena samt exempel på lasrar som emitterar vid dessa våglängder. NIR står för "near infrared" och FIR för "far infrared".

Effekt (P[W]) och energi (E[J]): En lasers styrka beskrivs oftast i effekt, alltså hur mycket energi per sekund den sänder ut i strålning. Är lasern pulsad kan det vara mer relevant att prata om hur mycket energi en puls innehåller oberoende av dess längd. En ftons energi (E) är proportionell mot frekvensen ν enligt $E = h \cdot \nu$, där h är Plancks konstant. Effekten och energin beror alltså på laserns våglängd och på hur många fotoner som sänds ut samtidigt.



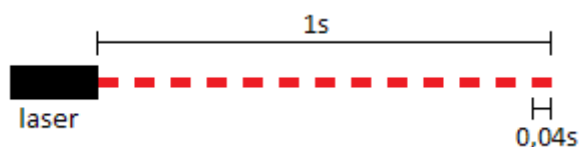
Figur 29. Exempel på vilka skador olika laserenergies eller effekter per cm^2 kan orsaka.

Divergens och synfält: Divergensen är laserstrålens spridning och mäts i grader eller radianer. Lasrar har generellt mycket liten divergens (<1 mrad) men den kan även göras större med hjälp av optik beroende på användningsområde. Ska t.ex. en scen belysas krävs en stor divergens. Divergensen kan sägas vara laserns synfält. Är strålen inte helt rund kan divergensen/synfältet beskrivas med två vinklar.



Figur 30. Divergensen bestäms av vinkeln, v , med vilken strålningen lämnas laserkällan. Vänster: stor divergens, höger: liten divergens.

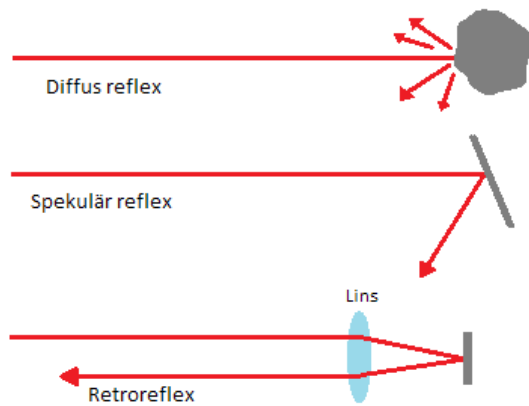
Pulslängd och PRF (pulsrepetitionsfrekvens): En pulsad laser sänder korta ljuspulser som repeteras i en viss takt, till skillnad från en kontinuerlig laser som sänder ut strålning hela tiden (engelska: cw = continuous wave). Pulslängden anger pulsens längd i tid (s). Pulsrepetitionsfrekvensen anger hur många pulser per sekund som skickas ut (icke att förväxla med själva fotonernas frekvens/våglängd). Pulsfrekvensen kan vara densamma även om pulslängden varierar. En följd av pulser från en pulsad laser kallas för **pulståg**.



Figur 31. Pulslängd (här 0.04s) och PRF (antalet pulser/s, här 13Hz).

Reflektion: En diffus reflex uppkommer då lasern träffar en ojämn yta och den reflekterande strålningen sprids i många olika riktningar, till skillnad från en spekulär reflex där ljuset träffar en blank yta och reflekteras i en riktning med samma vinkel från ytans normal som den infallande strålningen. En reflex som kan uppkomma då laserljus

träffar optik som fokuserar på en reflektiv yta, t.ex. detektorn i en kamera, eller streckplattan i ett sikte kallas för retroreflex. Ljuset reflekteras tillbaka exakt i samma riktning som det kom från och detta utnyttjas bl.a. till optikspaning.



Figur 32. Olika typer av reflexer som uppkommer då en laser träffar olika ytor.

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



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
164 90 Stockholm

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

www.foi.se