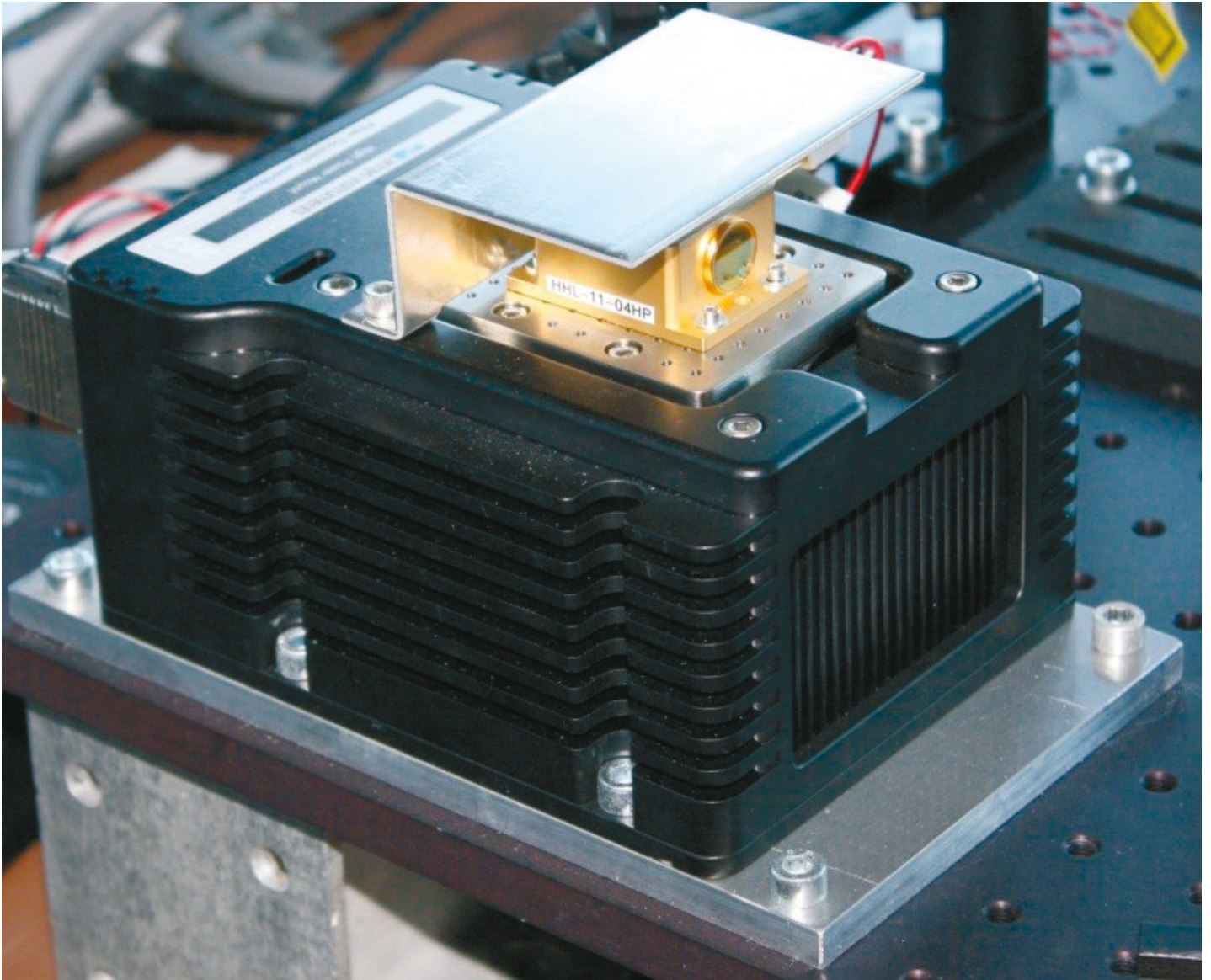


MARKUS HENRIKSSON, LARS SJÖQVIST



Markus Henriksson, Lars Sjöqvist

Laserteknologier för telekrigstillämpningar

En översikt av teknikutvecklingen

Bild/Cover: En kvantkaskadlaser för störning och bländning i IR-området. Foto:
FOI

Titel	Laserteknologier för telekrigstillämpningar. En översikt av teknikutvecklingen.
Title	Laser technologies for electronic warfare. A technical review.
Rapportnr/Report no	FOI-R--4089--SE
Månad/Month	Juni
Utgivningsår/Year	2015
Antal sidor/Pages	45 p
ISSN	1650-1942
Kund/Customer	FM
Forskningsområde	9. Telekrig
FoT-område	Telekrig
Projektnr/Project no	E54579
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

Den här rapporten ger en översikt av hur teknikutvecklingen inom laserområdet kommer att påverka framtidens telekrigssystem. Området är stort, och därför är innehållet varken heltäckande eller detaljerat från en teknisk synvinkel. Syftet har varit att ge en översikt av området och de viktigaste trenderna.

Rapporten är uppdelad i tillämpningsområden, funktioner och teknik, med hyperlänkar mellan nivåerna. Tanken är att den inte ska läsas från pärm till pärm utan att läsaren ska följa de teman som känns intressanta och relevanta genom länkarna.

Något av det viktigaste, och mest spektakulära, som händer just nu är att taktiska laservapen för användning som luftvärn med räckvidd ut till någon kilometer testas som fullskaleprototyper. En annan viktig utveckling som pågår är att bra kompakta lasrar i det infraröda (IR) området börjar bli tillgängliga och kommer göra motmedelssystem mot IR-baserade målsökare och sikten tillgängliga för fler tillämpningar. En teknik som ännu inte är fullt utvecklad, men som har potential att förändra laserbaserade system i grunden, är optiska antenner. Den här tekniken som motsvarar fasstyrda gruppantenner för radar ger möjlighet att rikta laserstrålar utan mekanisk rörelse och därmed skulle lasrar för bländning och andra motmedelstillämpningar kunna monteras på ytan på fordon istället för i ett vridbart pek huvud.

Rapporten är skriven i projektet "Laser i Telekrigstillämpningar" inom området FoT Telekrig.

Nyckelord: Laser, Taktiska laservapen, bländning, motmedel, optiska antenner, fotonräkning

Summary

This report reviews the technical progress of lasers and related technology and the impact on future electronic warfare systems. This is a large field, and thus the report is neither comprehensive nor technically detailed. The aim has been to give an overview of the field and the most important trends.

The report is divided in application areas, functions and technology, with hyperlinks between the levels. The intention is not that it should be read from cover to cover, but that the reader should follow interesting and relevant themes using the links.

One of the most important, and most spectacular, trends at the moment is that tactical laser weapons for air defence applications with effective range up to a few kilometres are being tested as full scale prototypes. Another important development is that high performance compact infrared lasers are becoming available and will make countermeasures against infrared seekers and sights available for more applications. A technology that is not yet fully developed, but that has a potential to fundamentally change laser systems, is optical antennas. This technology, which corresponds to phased array antennas for radar, provides the possibility to aim laser beams without mechanical movement and thus lasers for dazzling and other countermeasure applications could be mounted on the surface of a vehicle instead of in a pointing turret.

The report has been written in the project “Laser i Telekrigstillämpningar” within FoT Telekrig.

Keywords: Laser, tactical laser weapons, dazzling, countermeasures, optical antennas, photon counting

Innehållsförteckning

1	Inledning och sammanfattning	7
1.1	Syfte	7
1.2	Sammanfattning av de viktigaste trenderna	7
1.3	Rapportens uppbyggnad.....	8
2	Tillämpningsområden	9
2.1	Skydd av fasta installationer	9
2.2	Egenskydd för flygande plattformar	10
2.3	Fartygsbaserade system.....	11
2.4	Skydd av stridsvagn/stridsfordon/konvoj	13
2.5	Manburna system.....	14
2.6	Rymd.....	15
3	Funktioner	17
3.1	Optikspaning	17
3.2	Laservarnare	18
3.3	Smygande sensorer – avståndsmätare	19
3.4	Högupplöst avståndprofilering.....	19
3.5	Aktiv 2D-avbildning	20
3.6	3D-avbildning	21
3.7	Mätning av sensorprestanda.....	22
3.8	Bländande laser för att försvåra skott - synligt och IR	23
3.9	Bländning av satelliter	24
3.10	DIRCM	25
3.11	Störning av sjömålsrobot	26
3.12	Vilseledning.....	26
3.13	Mättnad med falska mål.....	27
3.14	Sensorförstörande lasersystem	27
3.15	Laservapen C-RAM	28
4	Nya komponenter och tekniska koncept	30
4.1	Högeffektsfiberlaser	30
4.2	Diodpumpade fastatillståndslasrar med hög effekt.....	31
4.3	Fiberförstärkare för koherent strålkombinering.....	31
4.4	VCSEL	32
4.5	Gröna lasrar	32
4.6	Optiska parametriska oscillatorer (OPO)	32

4.7	Nya lasermaterial.....	33
4.8	Superkontinuumlasrar	34
4.9	GaSb-diodlasrar.....	35
4.10	Kvantkaskadlasrar QCL.....	35
4.11	UV-lasrar och dioder.....	36
4.12	Fotonräknande detektorer	36
4.13	Strålförmining	37
4.14	Strålkombinering.....	38
4.15	Faslåsta matriser av lasrar - optiska antenner	39
4.16	Aktiv och adaptiv optik.....	40
4.17	Flödeskontroll för aerooptik	41
	Referenslista	43

1 Inledning och sammanfattning

1.1 Syfte

Den här rapporten syftar till att sammanfatta teknikutvecklingen inom laserområdet och vilken påverkan det kan ha på militära tillämpningar, och då framförallt inom ett brett definierat telekrigsområde. I vissa delar är gränsen mellan telekrig och sensorer diffus, och därför inkluderas en del funktioner som oftast räknas till sensorområdet. Rapporter med det här syftet skrivs med ojämna mellanrum i olika format och med olika avgränsningar. Några tidigare exempel är [1-4]. Den här gången har vi valt att definiera både telekrigstillämpningar och laserteknologier väldigt brett, och kan i gengäld varken vara detaljerade och heltäckande.

Telekrigstillämpningar definieras som metoder

- för att upptäcka, identifiera och verka mot optiska hot.
- för att hindra fienden när de försöker spana eller verka mot egna installationer, plattformar eller trupp.
- För att med laser skydda egna positioner, till exempel laservapen i luftvärnstillämpningar.

Optiska hot inkluderar till exempel optiska sikten, vapen styrda med optiska eller elektro-optiska (EO) sensorer och målsökare samt EO spaningssensorer. Till laserteknologier räknas inte bara lasrar i sig, utan även optiska system, detektorer och annat som används tillsammans med lasrarna. Vi har valt att inte ta med indirekt användning av laser, som till exempel optiska klockor, lasergyron, laser för sampling av mikrovågssignaler med mera.

Rapporten är skriven i projektet *Laser i telekrigstillämpningar* inom samlingsbeställningen i FoT Telekrig (AF.9220812 Telekrig 15).

1.2 Sammanfattning av de viktigaste trenderna

Laserbaserade system används idag i flera militära telekrigstillämpningar, till exempel för funktioner som målinmätning, precisionsbekämpning, skydd av flygande plattformar mot värmesökande luftvärnsrobotar samt bländning/optisk varning. Blickar vi lite framåt kan vi se system för upptäckt av och verkan mot optiska och elektro-optiska sensorer samt taktiska laservapen. En annan trend är smygande system som utnyttjar fotonräknande tekniker vilket kommer att reducera upptäcktsrisker. Andra teknologitrender inkluderar lasrar med nya våglängdsområden, reducering av vikt, volym och effektförbrukning, styrbara aperturer bestående av multipla lasersändare, elektriskt drivna lasrar med höga uteffekter samt system där aktiv/adaptiv optik används för att förbättra prestanda.

Något av det mest spektakulära som är på gång, och därmed det som får mest uppmärksamhet i media, är att laservapen nu 55 år efter att den första lasern demonstrerades och tanken på laservapen genast föddes börjar närma sig praktiska tillämpningar. Drivande inom området är idag inte enbart USA utan tekniken har även demonstrerats i Europa.

Utvecklingen av laserkällor i IR-området, framförallt av kvantkaskadlasrar, har gjort att kompakta och effektiva laserkällor nu finns i både 3-5 och 8-12 μm . Detta gör att motmedel mot IR-målsökare och sikten kan användas även på mindre plattformar och i andra situationer där effektförbrukning eller kostnad är begränsande.

En mer framåtblickande möjlighet där tekniken ännu inte är färdig för praktisk användning är optiska antenner. Denna teknik som motsvarar fasstyrda gruppantennor för radar skulle ge möjlighet att rikta laserstrålar utan rörliga mekaniska delar. I framtiden kan det med optiska antenner bli möjligt att montera lasrar för bländning och andra motmedelstillämpningar på ytan av ett fordon istället för i ett vridbart pekhuvud.

1.3 Rapportens uppbyggnad

Rapporten är inte uppbyggd för att läsas rakt igenom, utan använder en ”top-down”-struktur från tillämpningsområden via funktioner till tekniker. I varje artikel finns hyperlänkar som leder ner till mer detaljerad nivå och tillbaka till tillämpningar där funktionen eller tekniken hör hemma. Ofta kan man nå samma artikel längs flera vägar eftersom funktionen kan finnas på olika typer av plattformar och komponenten behövs för olika funktioner. För att kunna distribueras som en pdf-fil så ligger tillämpningsområdena i avsnitt 2, funktionerna i avsnitt 3 och komponenter och tekniska koncept i avsnitt 4.

De tillämpningsområden vi har tittat på är:

[Skydd av fasta installationer](#)

[Egenskydd för flygande plattformar](#)

[Fartygsbaserade system](#)

[Skydd av stridsvagn/stridsfordon/ konvoj](#)

[Manburna system](#)

[Rymd](#)

2 Tillämpningsområden

2.1 Skydd av fasta installationer

Med fast installation menar vi i den här rapporten camper i samband med internationella insatser, flygbaser, fasta ledningsplatser, mindre utposter och kritiska infrastrukturobjekt (Figur 1). Det särskiljande är att det är en anläggning som under en längre tid finns på samma plats och som har kontinuerlig bevakning.

Om någon riktar ett optiskt system, som en kikare, en kamera eller ett sikte mot anläggningen så är detta ett potentiellt hot eftersom det kan följas av beskjutning. Ett [optikspaningssystem](#) upptäcker och lokaliserar retroreflexen från det hotande optiska systemet. Med fast placering kan en hög grad av autonomi uppnås för ett optikspaningssystem eftersom fasta objekt som skulle trigga systemet kan sorteras bort. Optikspaning är givetvis bara en av ett antal sensorer som bör finnas, andra exempel kan vara kameraövervakning i det synliga och infraröda våglängdsområdet, radar för luftvärn och akustiska matriser för lokalisering av skott och andra plötsliga ljud.

När någon av dessa sensorer med ett stort övervakningsområde ger en indikation så kan ett högupplöst optiskt system riktas in för att klassificera eller identifiera det potentiella hotet. Den mest uppenbara metoden är att visa bilder från högupplösta kameran sensorer i olika våglängdsband för en operatör. För att få bättre identifieringsmöjligheter nattetid eller mot hot dolda i skuggor eller innanför fönster kan man [belysa scenen med en laser](#). Nästa steg i prestandaförbättring tas med användning av ett system för grindad avbildning, där slutartiden är så kort att bara laserstrålning som har reflekterats av objekt på ett visst avståndintervall samlas in. Ytterligare förbättringar kan fås med ett system för [högupplöst 3D-avbildning](#), där varje pixel i sensorn mäter avståndet till objekt inom pixelns synfält. Genom att visa bilden i en annan riktning, till exempel uppifrån, än den samlades in kan fordon och personer då ofta enkelt kännas igen, även om de är delvis dolda bakom vegetation. En alternativ metod som kan användas för att klassificera retroreflexer som upptäckts med ett optikspaningssystem är [högupplöst avståndsprofilering](#).



Figur 1. Flygbaser och andra fasta installationer behöver skyddas mot beskjutning med raketer, artilleri och granater. Här en containerbaserad flygbas i Bodø, Norge. Foto Försvarmakten.

När det har konstaterats att ett hot har upptäckts behöver någon motverkansåtgärd genomföras. Förutom klassiska metoder som att låta personal söka skydd eller själv skjuta så kan [bländlaser](#) användas för att försena och försvåra skott från hotet. Belysning med synlig laser kan också användas för att upplysa om att vi vet att ni är där genom s.k. optisk varning. Eftersom det är en icke-skadande metod så kan den användas även mot osäkra hotindikationer för att vinna tid till andra åtgärder. En annan fördel är att en laser endast förbrukar ström och det inte finns någon ammunition som kan ta slut.

Ett problem vid internationella insatser har varit beskjutning av camper med raketer och granater. Dessa projektiler och andra hot på avstånd på upp till någon kilometer, som till exempel UAV:er, kan bekämpas med [taktiska laservapen](#). Ofta pratas det om C-RAM för "Counter Rocket, Artillery and Mortar" efter den typ av hot de laservapen som är under utveckling idag designas för. Laservapen ska i det här sammanhanget ses som ett luftvärn för kortare räckvidder men med stor precision och uthållighet.

Mot mer kvalificerade motståndare är laserstyrda bomber ett hot mot fasta installationer. [Laservarnare](#) kan upptäcka användningen av laserbelysare och även peka ut belysarens riktning. Motmedel kan vid större anläggningar vara laservapen mot bomben, [vilseledningssystem](#) som styr målsökaren till en annan punkt, eller bländning av laserbelysarens sikte. En annan form av vilseledning mot attackflyg är att med laser skapa [falsa indikationer på robotavfyrningar](#) i fiendens robotskottvarnare och laservarnare [5]. Detta är främst effektivt för att mätta motmedelssystemen så att de inte hinner hantera de verkliga luftvärnsrobotar som skjuts. Metodiken kan potentiellt också leda till undanmanöver och avbrutna operationer.

Både laservarnare och optikspaningssystem är begränsade i hur stort område de kan skydda. Därför behövs vid en större camp eller flygplats flera sensorer. Även bländning kräver i princip att lasern finns inom synfältet för hotsensorn. Denna typ av system behöver därför finnas utspridda med vissa mellanrum runt perimeteren. Taktiska laservapen däremot är inte riktningberoende och behöver bara ha fri sikt mot det hot som ska bekämpas.

[Tillbaka till start](#)

2.2 Egenskydd för flygande plattformar

I internationella insatser har ett stort hot mot transportflygplan (Figur 2) och helikoptrar i luften varit MANPADs (manburna värmesökande luftvärnsrobotar), eftersom de finns spridda och är lätta att använda. På större transportflygplan finns sedan ett antal år lasersystem för att störa IR-baserade målsökare, [DIRCM-system](#) ("Directed InfraRed CounterMeasures"). Systemen krymper nu i storlek så att de kan användas på mindre flygplan och helikoptrar. Dessutom blir det fler och fler tillverkare som erbjuder system vilket gör att tillgången inte längre i lika hög grad begränsas av exportrestriktioner i USA. DIRCM-system ger ett bra skydd mot robotar med retikelbaserade målsökare och har fördelar över infraröda facklor som att de inte kan ta slut och inte är brandfarliga.



Figur 2. Flygtransporter kan utnyttja laserbaserade motmedel för att skydda sig mot robotar med elektrooptiska målsökare. Foto Försvarsmakten, fotograf Kurt Pettersson

Moderna målsökare, framförallt på jaktrobotar, är bildalstrande och svåra att störa med ett DIRCM-system, även om viss effekt kan finnas genom blinkande bländning av sensorn. Internationellt diskuteras därför nu nästa generation DIRCM i form av [sensorförstörande laservapen](#) för flygplan. Med en laser i våglängdsområdet $2\ \mu\text{m}$ så transmittas strålningen troligen genom domen även om den inte alltid når själva sensorn. Med tillräcklig effekt fås uppvärmning av delar i målsökaren så att bruset ökar och komponenter möjligtvis till sist lossnar eller smälter och funktionen störs.

Robotskottvarnare (MAWS, "Missile Approach Warning System") är bildalstrande sensorer känsliga i våglängdsområdena UV eller IR som detekterar strålningen från robotmotorer och i IR-fallet även snabbt flygande ankommande objekt på grund av uppvärmningen från luftfriktionen. MAWS är grunden i de flesta motmedelssystem på flygande plattformar. En utveckling som kan komma här är att man även kan detektera och varna för mynningsflammar på ballistiska vapen vid flygning på låg höjd. Andra tänkbara sensorer för upptäckt av hot är [laservarnare](#) som upptäcker inmätning med avståndsmätare och belysning med laser för laser- eller ledstrålestyrda vapen. Man kan också tänka sig användning av [optikspanare](#) för att upptäcka att ett sikte riktas mot plattformen redan före skott.

Projektiler som inte har en målsökare i nosen kan inte störas med DIRCM-system eller sensorförstörande laservapen. Här är det istället det optiska riktsystemet vid avfyrningsplatsen som behöver störas. Detta kan göras med [bländlaser](#). Eftersom relativt höga effektnivåer kan krävas så måste smala laserstrålar användas. Därför behövs en [optikspaningsfunktion](#) för att bestämma den exakta positionen på siktet. Bländlasrarna behöver använda flera olika våglängder för att vara effektiv både mot hot som använder visuella sikten och IR-kameror.

[Tillbaka till start](#)

2.3 Fartygsbaserade system

Ett av de stora hoten mot fartyg är sjömålsrobotar. Dessa har ofta IR-målsökare och därmed en optisk detektor som kan påverkas med laser. Man kan tänka sig två nivåer på

laserbaserade motmedelssystem. Antingen en [stör laser](#) i målsökarens känslighetsområde som ofta är LWIR ("Long Wave Infrared") eller ett [sensorförstörande laservapen](#) i det kortvågiga IR-området som genom uppvärmning av målsökarens delar höjer brusnivån i sensorn och i bästa fall förstör komponenter. I USA pågår även demonstratorprogram där man sätter [taktiska laservapen](#) med verkan mot strukturer på fartyg. Fördelen är att man då även kan bekämpa projektiler, mindre flygande farkoster och mindre båtar. Bedömningen är dock att den här tillämpningen kräver större fartyg än de svenska korvetterna (Figur 3).



Figur 3. Korvetterna skulle kunna använda lasersystem för att skydda sig mot robotar med elektrooptiska målsökare och laserstyrda vapen. Foto: Combat Camera / Forsvarsmakten, Swedish Armed Forces, fotograf David Gernes

[Laservarnare](#) är en viktig sensor för att upptäcka inmätning av fartyget eller hot från laser- eller ledstrålestyrda vapen. På grund av det höga aerosolinnehållet i luften över havsytan så kan en laservarnare på ett fartyg upptäcka belysning av en del av fartyget som är ganska långt från sensorpositionen. Därmed kan hela fartyget täckas in med ett fåtal sensorer. Vid belysning med laserbelysare för laserstyrda vapen är en tänkbar motåtgärd att [vilseleda genom att skapa ett skenmål](#) en sträcka från fartyget.

Eftersom även motståndaren kan ha laservarnare så är det intressant att använda [smygande avståndsmätarteknik](#) för att inte röja sin position. Samma teknik ger också en [avståndprofil](#) av målet som kan användas för att avgöra målets storlek eller känna igen det mot ett hotbibliotek. Nyttan med avstånd profiler av små båtar har diskuterats i ett annat FOI-projekt[6].

Avståndsmätare, konventionella eller smygande, kan förutom att mäta avståndet till mål även användas till att mäta egenskaper hos atmosfären som transmission och spridning. Atmosfären påverkar [prestanda för sensorsystem](#) som till exempel räckvidden för IR-kameror och målsökare.

Att upptäcka hot på land från ett fartyg kan vara besvärligt. Kamerasystem, framförallt i IR-området, kan vara till viss hjälp. Ett [optikspaningssystem](#) kan upptäcka om någon siktar eller riktar optiska sensorer mot fartyget. Om motståndaren inte förväntas ha laservarnare eller om man inte är rädd för att de får veta att man betraktar dem så kan system för [grindad avbildning](#) eller [3D-avbildning](#) användas för målklassificering.

Om varning fås med optikspanare eller laservarnare så kan [bländlaser](#) användas för att belysa sikten och försvåra skott, t.ex. mot kommandostyrda robotar. Eftersom avstånd på sjön kan vara långa krävs någon form av [optikspaningsfunktion](#) som detekterar retroreflexen som hjälp för inriktningen av bländlasern.

[Tillbaka till start](#)

2.4 Skydd av stridsvagn/stridsfordon/konvoj

Inom det här tillämpningsområdet tänker vi oss att ett eller flera fordon förflyttar sig framåt längs en väg (Figur 4). Det första steget är då att upptäcka att något misstänkt finns framför oss eller vid sidan av färdvägen. För att göra det kan man tänka sig att en obemannad farkost, en UAV, flyger framför konvojen med spaningssensorer. Man kan också tänka sig att fordonet i sig, eller om det är en konvoj, att ett av fordonen är sensorbäraren. I detta fall är man mindre begränsad i vikt och volym för sensorerna än om de placeras på en UAV. Med en UAV kommer dock sensorerna upp på höjd och kan också ge förvarning genom att UAV:n flyger något framför konvojen.



Figur 4. Fordonskonvojer behöver under förflyttning vara vaksamma mot bakhåll och andra hot. Laserbaserade sensorer kan ge stöd för detta på flera olika sätt. Foto Försvarsmakten, fotograf Marcus Åhlén.

Med ett [optikspaningssystem](#) kan man upptäcka om optiska hotsystem i form av kikare, kameror eller sikten är riktade mot plattformen. Eftersom signal fås bara inom synfältet på hotsensorn så bör ett optikspaningssystem vara placerat på en av plattformarna som ska skyddas. Med en UAV som flyger framför systemet och bär en 3D-avbildande lasersensor så kan fordon upptäckas, även om de är dolda i skogsbryn och under träd. Extra effektivt är det om området redan har mätts in en gång och man kan göra skillnadsdetektion. På sikt är det möjligt att sensorprestanda blir bra nog för att även människor som gömmer sig ska upptäckas. Denna typ av sensor finns närmare diskuterad i en FOI-rapport från 2014 [7]. Det är även tänkbart att fienden använder lasrar för avståndsmätning eller målutpekning mot fordonet. Detta kan upptäckas om fordonet är utrustat med [laservarnare](#). Andra sensorer som är lämpliga för upptäckt av hot är olika kameran sensorer, och då kanske framförallt IR-kameror där varma objekt sticker ut i bilden, signalspaning efter källor till radiovågor och akustiska matriser som kan positionera ljudkällor.



Figur 5. UAV:er, här Ugglan, kan flyga framför en konvoj och kan utrustade med laserbaserade sensorer upptäcka även hot som är dolda under vegetation. Foto Försvarsmakten, fotograf Bengt Eriksson

När ett tänkbart hot har upptäckts behöver det identifieras eller klassificeras. Den vanligaste metoden är då att visa bilder från högupplösta kameran sensorer i olika våglängdsband för en operatör. För att få bättre identifieringsmöjligheter nattetid eller mot potentiella hot dolda i skuggor eller innanför fönster kan man [belysa scenen med en laser](#). Ytterligare förbättringar kan nås med ett system för [högupplöst 3D-avbildning](#), där varje pixel i sensorn mäter avståndet till objekt inom pixelns synfält. Genom att visa bilden i en annan riktning, till exempel uppifrån, än där den samlades in kan fordon och personer kännas igen, även om de är delvis dolda bakom vegetation. En alternativ metod som kan användas för att klassificera retroreflexer som upptäckts med ett optikspaningssystem är [högupplöst avståndsprofilering](#).

När det har konstaterats att något som verkar vara ett hot har upptäckts behöver någon motverkansmetod genomföras. Förutom klassiska metoder, som att söka skydd eller själv skjuta och mer avancerade skyddsåtgärder med aktivt pansar, så kan [bländlaser](#) användas för att försena och försvåra skott. Eftersom det är en icke-skadande metod så kan den användas även mot osäkra hotindikationer för att vinna tid till andra åtgärder. En annan fördel är att en laser endast förbrukar ström och det inte finns någon ammunition som kan ta slut. I USA provas även [taktiska laservapen](#) för fordonsmontage för att skjuta ner inkommande raketer, granater och lågflygande UAV:er.

[Tillbaka till start](#)

2.5 Manburna system

När soldater måste bära med sig utrustningen så begränsas möjlig funktion kraftigt på grund av att vikt och energiförbrukning inte tillåter mer kraftfulla system. Kikare med en enkel [optikspaningsfunktion](#) för upptäckt av sikten och andra kikare i tillägg till den avståndsmätning som ofta redan finns är en möjlighet. Grön handhållen [bländlaser](#) används redan idag vid vägspärrar av flera nationer för att varna eller blända under mörka förhållanden.

Andra som använder manburna optiska system är framskjutna eldledare. Med hjälp av [smygande avståndsmätarsystem](#) kan målets position mätas in utan risk för att röja sin egen närvaro (Figur 6).



Figur 6. Eldledare vill inte röja sin egen position. Därför är det viktigt med avståndsmätarteknik som inte kan upptäckas av motståndaren. Foto Försvarsmakten, fotograf Lars-Göran Larsson.

[Tillbaka till start](#)

2.6 Rymd

Den militära nyttan med satellitbilder är det inte många som tvivlar på (Figur 7). Det kan därför vara intressant att försöka hindra satellitövervakning av områden under en viss tid. Om satellitbanan är känd så kan [bländande laser](#) användas för att störa kamerabilden. Att träffa är inte helt enkelt, särskilt när atmosfärsturbulensen kommer med i bilden, och ett relativt avancerat teleskop krävs för målföljning och sändning. Att blända ut en IR-kamera på natten kan vara något lättare än visuella sensorer eftersom turbulensen dels är lägre på natten och de längre våglängderna inte påverkas lika kraftigt. En nackdel med längre våglängd är dock att det krävs mer komplicerade komponenter samt att sändaraperturen måste göras större för att få en låg stråldivergens.

Teknologitrenden är att satelliter för militära ändamål görs mindre komplicerade och lättare vilket reducerar kostnader. Ett exempel på trenden är FM:s satellitprojekt Sparc-1 där planen är att testa en nanosatellitdemonstrator i samverkan med bl.a. USA.



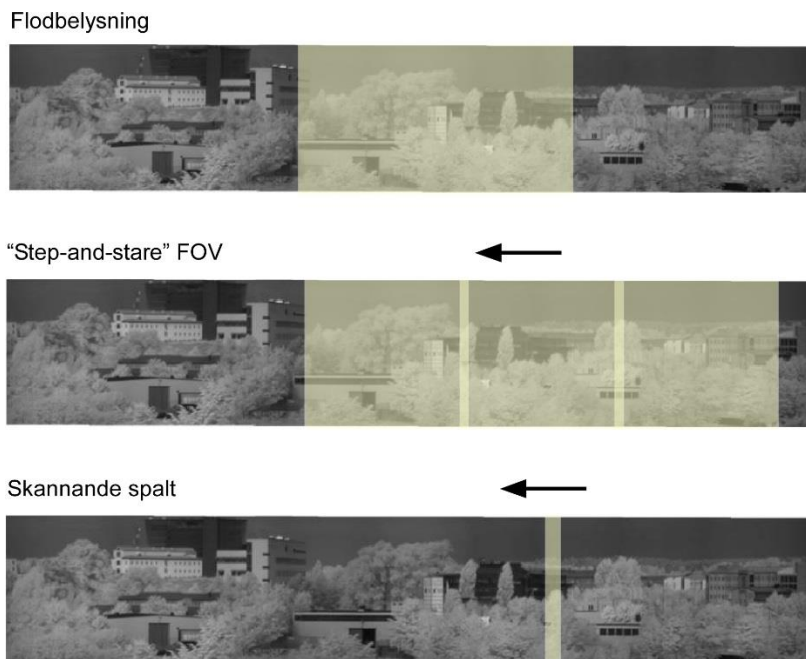
Figur 7 Tillämpningar i rymden som är av intresse för Försvarmakten.

[Tillbaka till start](#)

3 Funktioner

3.1 Optikspaning

Optikspaning bygger på att sikten och andra optiska system när de belyses med laser ger en retroreflex, populärt kallad kattögereflex för likheten med den reflex djurögon ger när de belyses med bilstrålkastare. Genom att belysa ett område med laser och ha en mottagare som detekterar retroreflekterad strålning kan man alltså upptäcka och positionera sikten och andra optiska system som är riktade så att optikspaningssystemet finns inom synfältet.



Figur 8 Principer för optikspaning

Man kan dela upp optikspaningssystem i två typer, semiautonoma system med stort övervakningsområde och operatörsstödjande avbildande system beroende på hur de av söker ett område. Flodbelysande system kan sägas tillhöra kategorin operatörsstödjande där ett begränsat område belyses med lasersändaren. För semi-autonoma system skannas synfältet via "step-and-stare" eller skannande spaltteknik (Figur 8).

Ett semiautonomt system ska kontinuerligt svepa en större sektor, kanske hela varvet runt, och detektera retroreflexer. En reflex som stämmer in på föreskrivna parametrar för hot genererar en varning och kan till exempel styra in andra sensorer för identifiering eller system för verkan. I öppen terräng och med inslag av skogsmiljö kan ett sådant system fungera väldigt bra (Figur 9), medan det i stadsmiljö kommer reagera på många olika harmlösa reflekterande föremål.

Ett operatörsstödjande avbildande system gör ingen automatisk detektion av hot utan presenterar bara retroreflexer överlagrade på en bild. Oftast har ett sådant system ett begränsat synfält, men kan svepas manuellt av operatören.

Optikspaning använder känd teknik i form av diodlasrar, bildförstärkare och fotodetektorer och finns sedan länge som prototyper och även i viss mån som operativa system. Framstegen som förväntas är på systemnivå för att göra systemen mindre och mer lättanvända. En teknologitrend här är att implementera flera funktioner som optikspaning, laserbländning, avståndsmätning i t.ex. en handburen kikare eller ett stativmonterat system.



Figur 9. Kikarsikten riktade mot mätsystemet framträder som tydliga lysande punkter med ett avbildande optikspaningssystem.

Man kan även tänka sig optikspaning i det infraröda våglängdsområdet dvs. 3-5 och 8-12 μm . Principerna är här desamma som beskrivits ovan men komponenterna skiljer sig åt. Här är både laser- och detektortekniken dyrare och mer komplicerad jämfört med NIR-området. Okylda IR-detektormatriser bedöms inte ha tillräcklig känslighet för den prestanda som krävs. Vidare behöver laserteknik utvecklas för att relativt små kompakta system ska kunna realiserats. Här är [kvantkaskadlaserutvecklingen](#) av intresse. Ur detektorsynpunkt behöver IR-detektorer som arbetar vid högre temperatur (Peltierkylning) finnas tillgängliga med prestanda av samma storleksordning som dagens Stirlingkylda.

Ett specialfall av optikspaning är att använda detektion av retroreflexen för att bekräfta att ett bländ- eller störssystem är riktat mot hotet. Denna återkoppling och optimering av pekriktningen gör att smalare laserstrålar och därmed lasrar med lägre effekt kan användas för störning på långa avstånd.

Tillbaka till:

[Skydd av fasta installationer](#)

[Egenskydd för flygande plattformar](#)

[Fartygsbaserade system](#)

[Skydd av stridsvagn/stridsfordon/konvoj](#)

[Manburna system](#)

3.2 Laservarnare

Laservarnare används idag på flygande, marina och fordonsplattformar för att varna för hot som målinmätning med avståndsmätare, styrda vapen som utnyttjar laserbelysare samt ledstrålestyrda robotar. Förbättringar av dagens system inkluderar t.ex. bättre rumsupplösning, ökad känslighet och bandbredd samt förbättrad processorkraft för snabb signalbehandling. Trenden för målinmätning och ledstrålestyrning är att reducera medeleffekten som används vilket försvårar upptäckt med laservarnare. Här är det av intresse att öka känsligheten för att kunna möta framtida hot. På sikt kan man även tänka sig system som utnyttjar icke-konventionella våglängder, till exempel kring 2 μm våglängd eller längre, vilket innebär att nya detektorkonfigurationer kan behöva användas i framtida laservarnare.

En högre känslighet kan innebära att [fotonräknande teknik](#) kan behövas, särskilt om smygande avståndsmätare utvecklas för tyst målinmätning. Användande av fotonräknande

teknik innebär dock stora utmaningar avseende hantering av bakgrundsljus samt nyttjande av stora synfält. En viktig parameter som måste hållas låg är falsklarmsfrekvensen vilket kan vara svårt med teknik baserat på fotonräkning eller detektion av mycket svaga signaler.

Tillbaka till:

[Skydd av fasta installationer](#)

[Egenskydd för flygande plattformar](#)

[Fartygsbaserade system](#)

[Skydd av stridsvagn/stridsfordon/konvoj](#)

3.3 Smygande sensorer – avståndsmätare

Att kunna mäta in motståndaren utan att upptäckas med laservarnare ger en taktisk fördel, dels eftersom en inmätning ofta ses som en fiendlig handling och dels eftersom man inte röjer sin avsikt att skjuta om inmätningen görs som förberedelse till skott. Det finns flera olika metoder som kan användas för inmätning som är svåra att upptäcka.

Eftersom laservarnare detekterar pulser så är det bästa sättet att undvika upptäckt att sprida ut strålningen i tiden. En teknik som varit känd under lång tid är frekvensmodulerad koherent laserradar. En nyare teknik som finns demonstrerad i labmiljö är att använda [fotonräknande detektorer](#) och kodade pulståg av mycket svaga pulser med hög repetitionsfrekvens.

En annan metod som kan fungera under en övergångsperiod är att använda en våglängd som dagens laservarnare inte är känsliga för, till exempel 2,1 μm där det finns holmiumbaserade lasermaterial med bra prestanda. Däremot kan det vara ett större problem att ta fram en optimal mottagare för det våglängdsområdet.

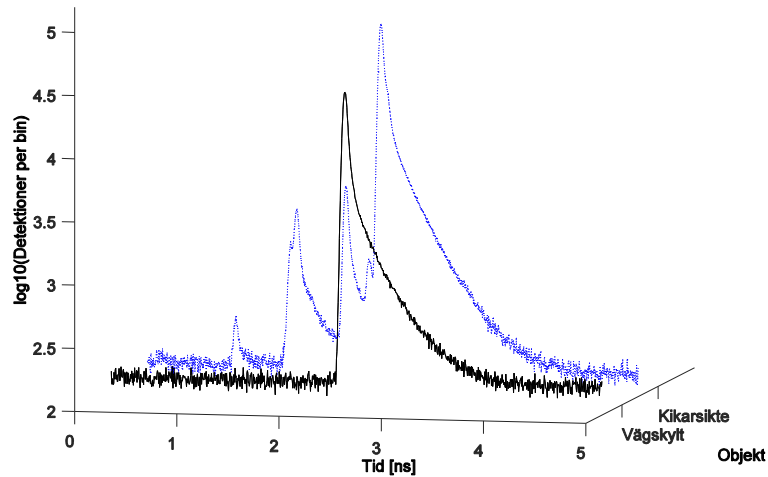
Tillbaka till:

[Fartygsbaserade system](#)

[Manburna system](#)

3.4 Högupplöst avståndsprofilering

En laseravståndsmätare mäter avståndet till en yta genom att mäta tiden det tar för en laserpuls att gå fram och tillbaka till målet. Om mätsystemet har hög tidsupplösning är det möjligt att mäta avståndsskillnaden mellan flera närliggande ytor och skapa en avståndsprofil. Profilen ger informationen om målets utsträckning i avstånd och kan möjliggöra igenkänning mot ett hotbibliotek. Vilken tidsupplösning som krävs beror på målets storlek. Mot till exempel större fartyg räcker mer avancerad mottagarelektronik med en klassisk pulsad avståndsmätare. När dimensionerna minskar, till exempel mot flygplan och mindre båtar, krävs speciella lasrar med kortare pulslängder. Avståndsprofilering av små sjömål har studerats på FOI [6]. För högsta avståndsupplösning kan tidskorrelerad fotonräkning användas. Denna teknik som bygger på pikosekundlasrar och [fotonräknande detektorer](#) kan nå en avståndsupplösning under 1 cm och mäta avståndet mellan olika ytor i optiska sikten. Tidskorrelerad fotonräkning kan också användas när pulsenergin i en laserpuls inte räcker till för att få tillräckligt stark signal. Ett exempel på detta kan vara vid mätning mot satelliter.



Figur 10. Exempel på två mätningar med tidsskorrelerad fotonräkning som visar hur avståndsprofilen gör det möjligt att skilja på ett kikarsikte och en vägskylt som båda ger retroreflexer som upptäcks med en optikspanare.

Tillbaka till:

[Skydd av fasta installationer](#)

[Fartygsbaserade system](#)

[Skydd av stridsvagn/stridsfordon/konvoj](#)

3.5 Aktiv 2D-avbildning

Vid strid i mörker kan aktiv belysning av scenen med laser ge en förbättrad förmåga. Detta görs redan idag med vapenlampor som lyser upp scenen i bildförstärkare. Även dagtid kan aktiv belysning vara till nytta för att se in i skuggade områden och genom fönster.

Om en pulsad laser används för belysning synkroniserat med en kamera med extremt kort slutartid så blir endast objekt inom ett visst avståndsintervall upplysta i bilden, detta kallas grindad avbildning. Detta är mycket effektivt för att skilja ut objekt från bakgrunden och kan även förbättra siktavståndet i rök, dimma och nederbörd.



Figur 11. Exempel på en grindad 2D-bild där avståndsluckan lagts så att bara personerna är upplysta och bakgrunden mörk. Eftersom våglängden är 1,55 μm så är färgkontraster annorlunda än i visuellt, till exempel är hud mycket mörk.

Nya belysningskällor i form av [VCSEL](#)-matriser kan ge jämnare belysning och undvika spekeleffekter (grynighet orsakad av ojämnheter på målet av samma storlek som den optiska våglängden, till exempel som på referensytorna i vänstra delen av Figur 11) i bilderna. Lasrar har ofta en Gaussisk strålprofil som gör att när mitten av bilden är lagom belyst så är hörnen helt mörka. Olika tekniker för [strålformning](#) undersöks för att råda bot på detta.

För att lysa upp scenen i en vanlig bildförstärkare kan diodlasrar i nära infrarött användas. I ett dedicerat system för aktiv avbildning är längre våglängder, till exempel i SWIR-området, att föredra eftersom systemet då kan användas utan att en motståndare med vanliga bildförstärkare upptäcker belysningen. Belyst 2D-avbildning, både med kontinuerlig laser och grindad avbildning med pulsad laser, är etablerad teknik. Framsteg sker dock hela tiden med mindre och billigare kameror med högre upplösning.

Tillbaka till:

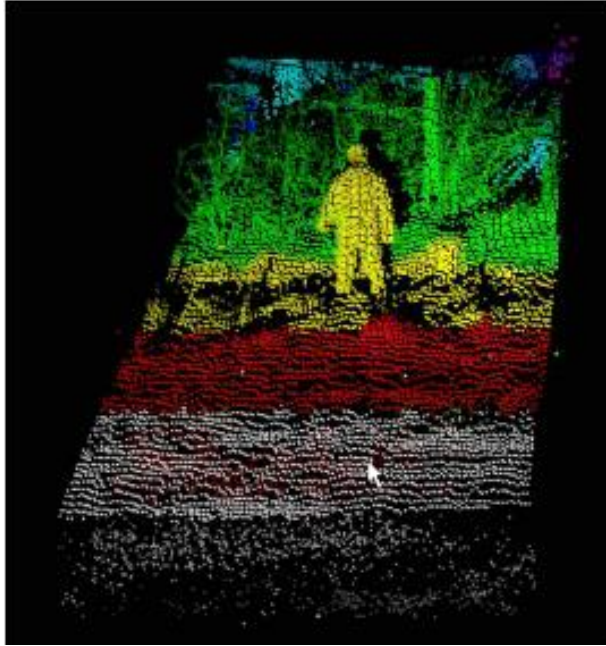
[Skydd av fasta installationer](#)

[Fartygsbaserade system](#)

[Skydd av stridsvagn/stridsfordon/konvoj](#)

3.6 3D-avbildning

Formen på objekt ger ofta en bra signatur för igenkänning. 3D-mätning gör även att objekt kan skiljas från bakgrunden och därmed är signaturanpassning inte ett lika effektivt motmedel som vid vanlig 2D-avbildning. Avståndsupplösningen gör också att även om en stor del av pixelns synfält är övertäckt av lövverk eller kamouflage så kan avståndet till objektet bakom mätas. Därmed är 3D-avbildning med laser mycket bra för igenkänning av mål dolda i vegetation. Lasersystem för 3D-mätning går nu från skannande system till att baseras på matrisdetektorer och kan därmed mäta en 3D-scen på mycket kortare tid. Speciellt system med [fotonräknande detektorer](#) kan mäta stora scener på kort tid och med hög avståndsupplösning som gör att mål kan skiljas från skymmande lövverk även när vegetationen är nära målet. En annan fördel med fotonräknande system är att lasrar med lägre pulsenergi kan användas. Pulsenergin driver ofta storlek och kostnad för lasrar. Eftersom dynamiken i matrisdetektorer är begränsad så blir [strålformning](#) för jämn belysning extra viktigt.



Figur 12. Exempel på en 3D-bild insamlad med en matrisdetektor och en enda laserpuls. Färgkodningen är olika avståndintervall.

3D-laserradar är förutom för måligenkänning också mycket användbart för till exempel spaning, kartering, navigering och hinderindikering. Sensorsystemet behöver optimeras på olika sätt i olika tillämpningar, så samma sensor kan inte användas i alla tillämpningar även om de alla är 3D-laserradarsystem.

Tillbaka till:

[Skydd av fasta installationer](#)

[Fartygsbaserade system](#)

[Skydd av stridsvagn/stridsfordon/konvoj](#)

3.7 Mätning av sensorprestanda

Idag används avståndsmätare för målinmätning på ett flertal plattformar. Vanligtvis sker inmätningen vid 1,5 μm våglängd och avståndsmätaren ingår som en del i ett vapensikte eller spaningsutrustning. Ett exempel är marina plattformar där ett elektro-optiskt sikte oftast sitter monterad som en del i fartygets ledningssystem. Genom att mäta bakåtspridning av laserstrålning i atmosfären kan dämpningsegenskaper uppskattas vilka kan användas för att bedöma egna elektro-optiska sensorers eller hotande sensorers prestanda (räckvidder)[8]. En befintlig avståndsmätare kan modifieras så att bakåtspridning kan bestämmas och dämpningsegenskaper kan mätas.

Om information om atmosfärens dämpningsegenskaper finns tillgänglig kan man beräkna spaningsräckvidder för egna sensorsystem som TV- och IR-kameror. Låsningavstånd för elektro-optiska målsökare kan uppskattas. Informationen som kompletteras med annan väderinformation kan användas i planeringsverktyg integrerade i t.ex. ett fartygs ledningssystem för insatsplanering.

Tillbaka till:

[Fartygsbaserade system](#)

3.8 Bländande laser för att försvåra skott - synligt och IR

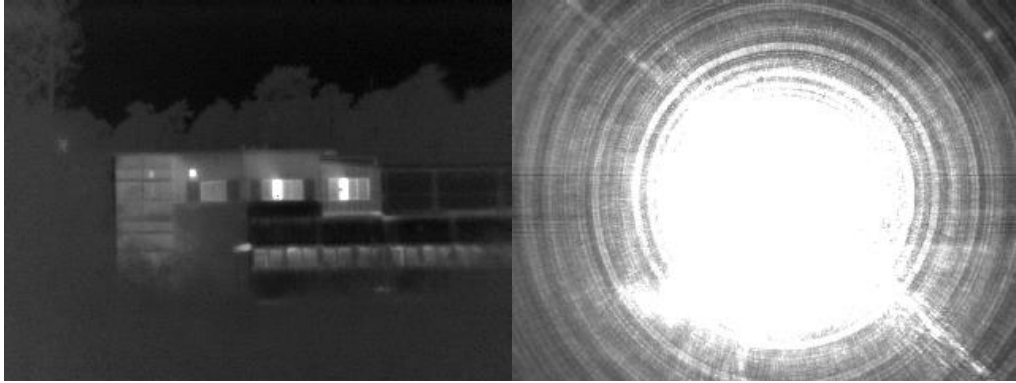
Genom att belysa ett optiskt sikte eller en kamerabaserad sensor med laser kan delar av synfältet bländas så att målet inte längre syns och målträff kraftigt försvåras. Den psykologiska effekten av en uppdykande kraftig ljuskälla kommer också distrahera en skytt under någon sekund och ge extra tid till andra åtgärder. För att upptäcka sikten som ska bländas så krävs ofta någon form av optikspaning som upptäcker retroreflexen från siktet. Detta gäller kanske framförallt på långa avstånd och med hot som ledstrålesystem och kommandostyrda robotar.

För bländning av ögon används främst [grön laser](#). Detta har två orsaker, dels är det relativt enkelt att generera strålning vid 532 nm genom frekvensdubbling av neodymlasrar, och dels är ögats känslighet högst i grönt. Eftersom ögats ljuskänslighet, men i mindre grad skaderisken, varierar med våglängden inom det synliga området så fås kraftigast bländningseffekt utan risk för ögonskador i grönt. Sett ur skyddsaspekter är det av intresse att utveckla bländlasrar för andra våglängder än 532 nm eftersom man ganska enkelt kan skydda sig genom att använda skyddsglasögon eller filter anpassade att blockera det gröna ljuset. En lösning som går runt alla fasta filter är en [superkontinuumlaser](#) som emitterar över hela det visuella och nära infraröda spektret samtidigt.

Dagens system behöver sprida ljuset i en lob som är större än det möjliga felet i inriktning och måste därför ha en relativt stor spridningsvinkel. För att inte vara ögonfarliga på nära håll krävs då säkerhetsfunktioner som mäter avståndet till målet och sedan reglerar lasereffekten, men bländningssystemen är även vid maxeffekt ändå kraftigt begränsade i effektiv räckvidd. Med [koherent strålkombinering](#) som koncentrerar ljuset från flera laseremitttrar mot punkter som ger retroreflexer kan mycket smalare strållobber uppnås utan risk att missa målet. På så sätt kan effekt uppnås mot hot på längre avstånd med låga lasereffekter som inte är farliga för personer nära lasersystemet. Koherent strålkombinering kan åstadkommas till exempel med [optiska antenner](#). Till skillnad från en traditionell kollimator så behövs då ingen lång optik och ingen mekanisk inriktning utan systemet kan göras som en tunn skiva som monteras utanpå ett fordon och laserstrålens riktning styras icke-mekaniskt.

Diodlasrar är idag utmärkta källor i våglängdsområdet från rött till när-IR från 0,6-1,6 μm . Fortsatt utveckling kommer bredda området. Redan finns diodlasrar i blått och för våglängder över 2 μm men för gröna våglängder saknas än så länge diodlasrar. Stark utveckling sker för tillfället av [GaSb-diodlasrar](#) för 2-3 μm våglängd. Diodlasrar är mindre, lättare och kräver mindre effekt än andra lasrar, som ofta använder diodlasrar i ett första steg. Tillämpningar som kan använda diodlasrar blir därför billigare och mer flexibla.

På senare år har lasertekniken i IR-området gått kraftigt framåt genom utvecklingen av [kvantkaskadlasrar](#) (QCL, "Quantum Cascade Laser"). Det är en halvledarlaser med många likheter med diodlasrar, men som ger strålning vid i princip valfri våglängd som är längre än 3,5 μm . Kvantkaskadlasrar är därmed bl.a. lämpade för störning av IR-kameror och termiska sikten.



Figur 13. Bild från en IR-kamera riktad mot FOI:s labb. Till vänster ostört och till höger vid bländning med en kvantkaskadlaser.

I kamerabaserade sensorer kan ofta bländare eller integrationstid reduceras så att lasern blir en punkt som kan användas som siktpunkt. Bländning ska därför inte ses som en långsiktig lösning mot tyngre vapen som bara behöver träffa plattformen utan som något som gör att man vinner några sekunder till att genomföra en annan åtgärd. Mot prickskyttar kan det ge en mer långsiktig lösning eftersom de bara kan se laserns position, och inte en människas position i närheten av lasern. Hur effektiv laserbländning är beror även på omgivningsbelysningen. I fullt dagsljus är bländning med laserintensitet under den maximalt tillåtna exponeringen enligt ögonsäkerhetsgränsvärden oftast bara en störande faktor. Nattetid är effekten större och bländning kan förhindra den belyste att utföra en uppgift.

Tillbaka till:

[Skydd av fasta installationer](#)

[Egenskydd för flygande plattformar](#)

[Fartygsbaserade system](#)

[Skydd av stridsvagn/stridsfordon/konvoj](#)

[Manburna system](#)

3.9 Bländning av satelliter

De amerikanska KH-11 satelliterna har elliptiska banor där de lägsta punkterna kan gå ner till ca 250 km men när de är som längst bort kan satelliterna vara 1000 km över jordytan [9]. Det är tänkbart att satelliter går ända ner till 160 km över jordytan, vilket räknas som gränsen för LEO ("Low Earth Orbit"), men ju lägre de går desto kortare är livslängden. Det första steget i bländning av satelliter är att veta var de är, vilket inte är helt lätt eftersom signaturerna minimeras före både radar och optik. Nästa steg är att exponera dem med laserstrålning med tillräcklig intensitet för att nå en störeffekt. Det är svårt att hitta tekniska uppgifter om moderna spaningssatelliter, och därmed kan vi inte uppskatta hur mycket lasereffekt som behövs inom aperturen för att uppnå bländning eller skada. För bländning kan vi dock baserat på ljusstyrkan för målet för spaningen, dvs. markytan, göra en gissning på effektkravet. En ljuskälla som är 10000 gånger starkare än omgivningen kan förväntas lokalt mätta sensorn och blända ut ett betydande omgivande område.

Markytan strålar i storleksordningen $200 \mu\text{W cm}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ vid $5 \mu\text{m}$ och har ett maximum om ca $1100 \mu\text{W cm}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ vid $10 \mu\text{m}$ vid en temperatur om $30 \text{ }^\circ\text{C}$. Om vi i IR-området antar en upplösning på 1 m^2 och en spektral bandbredd $1 \mu\text{m}$ så får vi en intensitet på 11 W sr^{-1} inom synfältet för en pixel nära $10 \mu\text{m}$. Utgående radiometrisk intensitet för lasern behöver då vara av storleksordningen 100 kW sr^{-1} för att få betydande bländning. En kon med halvvinkel 1° har rymdvinkeln 10^{-3} sr , så med 100 W lasereffekt, så är kraven på

peknoggrannhet inte så höga. 100 W kan till exempel fås från ett antal [kvantkaskadlasrar](#) monterade som en matris. För synliga våglängder ska jämförelsen istället göras med reflekterad solstrålning. Upplösningen är i fallet för synliga våglängder också mycket högre.

Det är tekniskt möjligt att blända spanings satelliter om deras banor är kända. Fall av bländning med laser finns rapporterade för amerikanska och franska satelliter vid passage över Kina, dock är det oklart hur utstörd bilden blir. Oavsett så kan endast ett område om max några hundra meter runt den bländande lasern helt döljas och positionen kommer bli känd.

Tillbaka till:

[Rymd](#)

3.10 DIRCM

DIRCM ("Directed InfraRed CounterMeasures") finns idag operativt på transportflygplan och större helikoptrar i flera länder (Figur 14). Den stora utvecklingstrenden är mot mindre system som kan placeras på små helikoptrar och inte störa de aerodynamiska egenskaperna på taktiska flygplan. Ett DIRCM-system har tre huvudkomponenter; en målföljare ("tracker"), ett lasersystem och ett pekhuvud där den senare används för att rikta laser och målföljare mot hotet. Hot för DIRCM-system är robotar som använder sig av värmesökande målföljare dvs. är känsliga i det infraröda våglängdsområdet.



Figur 14 Bild på NEMESIS-systemet som idag är operativt på flera plattformar och finns i några olika varianter med avseende på pekhuvud och lasersystem. Källa: Northrop-Grumman[10].

På lasersidan har man gjort stora framsteg det senaste decenniet. En utveckling som redan sitter i operativa system är att gå från Nd:YAG-baserade lasersystem med våglängdskonvertering i två steg med [OPO:er](#) till en tulium-fiberlaser via en holmiumlaser och ett OPO-steg. Det har ökat verkningsgraden och driftssäkerheten och minskat storlek samt krav på effekt och kylning. Alternativa utvecklingar av andra typer av lasrar sker på många håll som kan ha betydelse för DIRCM, till exempel av [nya lasermaterial](#) och [superkontinuumlasrar](#) för våglängdsområdet mid-IR. Något som kan ge stora effekter på systemkomplexitet och kostnad är att direkt använda halvledarlasrar för att generera laserstrålning i de våglängdsband som behövs. Här är [GaSb-lasrar](#) vid 2 μm och [kvantkaskadlasrar](#) vid längre våglängder av intresse.

Den stora förbättringen med avseende på systemstorlek har dock varit på pekhuvuden där möjligheten att tillverka hemisfäriska domer i material transparenta för IR-våglängder medfört helt nya lösningar. Med små speglar innanför domen som rör sig istället för hela skalet kan rörelsen bli mycket snabbare och dessutom kan förenklad mekanik användas när ingen friktion i vädersäkra skarvar i skalet behöver övervinnas. Även utvecklingen av IR-

kameror med mindre pixlar och större matriser hjälper till med storleken eftersom kortare fokallängd krävs för samma upplösning hos målföljaren.

En annan trend är att DIRCM-system utvecklas även för snabbare taktiska flygplan. Här blir aerooptiska störningar på grund av det turbulenta flödet runt pekhuvudet ett problem när systemet riktas mot hot som angriper bakifrån. En intressant teknik är att inte försöka minimera störningen utan att [istället förstärka den, men göra den förutsägbar](#). Då är det möjligt att med [aktiv och adaptiv optik](#) kompensera effekten på en laserstråle. Även turbulenseffekter från motorplymer kan påverka prestanda hos ett DIRCM-system.

På sikt kommer DIRCM-systemen att behöva utvecklas mot nya funktioner för att kunna skydda flygande plattformar mot moderna robohot med avbildande IR-målsökare samt verka mot ledstrålestyrda luftvärnsrobotar. I fallet med bildalstrande målsökare krävs höga effekter i detektorns våglängdsband så att all bildinformation i fokalplanet störs och målföljning blir omöjlig att genomföra. För ledstrålestyrda vapen kan en laservarnare visa in en störlaser som kan verka mot ett optiskt sikte eller en målföljare. Beroende på siktestyp behövs här olika våglängder. För visuella sikten krävs en laser i det synliga våglängdsområdet. I fallet med målföljare är det mer troligt att våglängdsområdena 3-5 eller 8-9 μm utnyttjas.

Tillbaka till:

[Egenskydd för flygande plattformar](#)

3.11 Störning av sjömålsrobot

För att störa sjömålsrobotar och andra robotar med målsökare i LWIR krävdes länge stora och underhållskrävande gaslasrar. Sedan några år tillbaka finns halvledarlasrar i form av [kvantkaskadlasrar](#) för våglängdsbandet 8-12 μm . Detta har öppnat nya möjligheter att bygga kompakta och effektiva laserstörare mot LWIR-målsökare. I retikelbaserade målsökare genereras falska målsignaler med hjälp av modulerad laserstrålning på samma sätt som med DIRCM-system för skydd av flygplan.

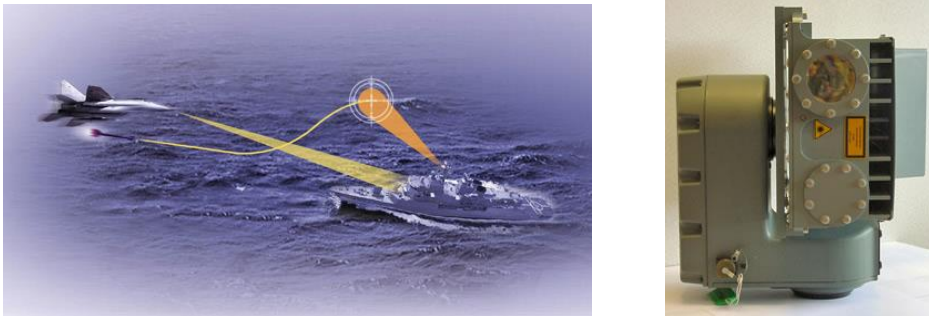
Laserstyrda sjömålsrobotar störs genom vilseledning med samma metoder som används mot laserstyrda bomber. En annan metod är att direkt blända målsökaren genom belysning med laserstrålning vid belysarlaserens våglängd. Det är också möjligt att störa eller blända siktet som används för att rikta belysarlaseren.

Tillbaka till:

[Fartygsbaserade system](#)

3.12 Vilseledning

Laserstyrda bomber har målsökare som styr på en laserfläck som består av en viss sekvens av laserpulser. Våglängden är oftast samma, så om pulssekvensen mäts in med laservarnare så kan den repeteras med en egen belysare mot en annan punkt i närheten och bomben förhoppningsvis styras dit (Figur 15). Ett alternativ som kan kräva mindre effekt är att inte ha en laser på plattformen som riktas mot punkten man vill styra bomben mot utan en fjärrstyrd laser riktad uppåt i den punkten. Här kan man även tänka sig en fiberbaserad lösning med lasern i säkerhet och bara en fiber som skapar skenmålet.



Figur 15 Vilseledningssystem DHY-332 som marknadsförs av CILAS i Frankrike. Den vänstra bilden visar schematiskt hur vilseledning kan fungera för ett fartygsbaserat system. Källa: CILAS[11].

Tillbaka till:

[Skydd av fasta installationer](#)

[Fartygsbaserade system](#)

3.13 Mättnad med falska mål

Automatiska varningssystem i form av robotskott- eller laservarnare är till stor hjälp för att skydda piloter i flygplan och helikoptrar. De kan dock också användas i telekrigsinsatser mot de flygande plattformarna. Med en lämplig laserbelysning så kan varnarna triggas som om en robot är på väg mot dem utan att någon robot har avfyrats. Här kan man anta att det planerade uppdraget kommer att påverkas och kanske inte fullföljs.

Motmedelssystem i form av DIRCM kan också mättas om för många varningar om hot kommer samtidigt. Med en lång hotlista kommer systemet riktas mot obefintliga hot medan en verklig robot når fram. På detta sätt kan effektiviteten hos IR-målsökande luftvärnsrobotar ökas. Den taktiska användningen av denna metod har diskuterats i en finsk uppsats [5].

Stimulering av varnarna kan göras relativt enkelt och varnarstimulatorer som efterliknar en anflygande robot baserade på [kvantkaskadlasrar](#) i IR-området eller [lysdioder i UV-området](#) bör kunna få relativt lång räckvidd. Stimulering av laservarnare kan vara ännu enklare eftersom ledstrålebelysare redan är laserbaserade. Man kan också tänka sig fjärrstyrda system på en enkel pan-tiltplattform eftersom risken finns för beskjutning mot en punkt där varnaren indikerar, till exempel i fallet med en ledstrålebelysare.

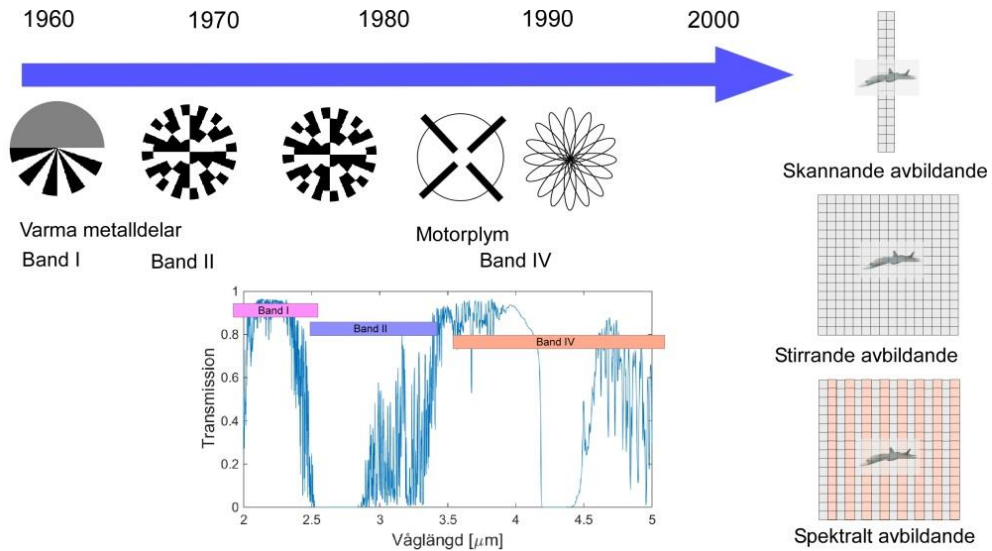
Tillbaka till:

[Skydd av fasta installationer](#)

3.14 Sensorförstörande lasersystem

Moderna robotar har i allt högre grad bildalstrande målsökare (se Figur 16 för översikt av målsökarutvecklingen). Dessa är svåra att vilseleda med pulsad störning. Därför undersöks laserbaserade metoder för att förstöra sensorn. Längre har man tittat på att använda laserpulser med hög pulsenergi. Det har dock visat sig svårt att på långa avstånd erhålla tillräckligt med energi som träffar detektorn. Lasersystem med hög pulsenergi har också visat sig vara svåra att integrera i flygplan. Eftersom [fiberlasrar](#) blivit tillgängliga så studeras nu möjligheten att generera termiska skador från lasrar med hög medeleffekt. Vilken effektnivå som krävs är inte känt, men det bör för att klara kilometeravstånd vara kilowattnivå. Om lasern är inom målsökarens känslighetsområde så fokuseras laserstrålen

på detektorn och bränner sönder pixlar och elektronik. För våglängder som blockeras tidigare i systemet fås en uppvärmning som stör IR-sensorer och i bäst fall kan spräcka filter. Här krävs dock att en stor del av laserstrålningen absorberas i målsökarens olika optikkomponenter.



Figur 16 Översikt av utvecklingen av målsökare från retikelbaserade till avbildande. Avbildande målsökare har vanligtvis ett känslighetsområde som ligger i band IV.

En teknik som studeras för verkan mot bildalstrande målsökare är att använda flera faslåsta [fiberförstärkare](#) som en form av [optisk antenn](#) för finstyrningen av lasern. Genom att optimera på strålningen som reflekteras från målet så fås en begränsad kompensation av turbulens, och därmed högre intensitet på målet än för en laser med en total apertur lika stor som alla elementen i den optiska antennen. Särskilt intressant blir tekniken om strålning kan skapas i ett våglängdsområde som passerar domen på målsökaren.

Eftersom att av de stora hoten som har bildalstrande målsökare är jaktrobotar så är en av de viktiga plattformarna taktiskt stridsflyg. Här blir aerooptiska störningar på grund av det turbulenta flödet runt pekhuvudet ett problem när systemet riktas mot hot som angriper bakifrån som nämnts ovan. En intressant teknik är att inte försöka minimera störningen utan att [istället förstärka den, men göra den förutsägbar](#). Då är det möjligt att med [adaptiv optik](#) kompensera effekten på en laserstråle.

Ett annat hot med bildalstrande målsökare är sjömålsrobotar. För fartygsmontering är sensorförstörende laservapen en lösning som inte behöver ligga så långt bort i tiden eftersom begränsningen i vikt och storlek inte är lika rigorös som på flygplan. Sensorförstörende laservapen mot bildalstrande elektrooptiska målsökare kan också ses som ett steg på vägen mot kraftigare laservapen som är effektiva mot alla typer av hot.

Tillbaka till:

[Egenskydd för flygande plattformar](#)

[Fartygsbaserade system](#)

3.15 Laservapen C-RAM

Laservapen har varit en dröm sedan den första lasern hade demonstrerats i början på 1960-talet. Dock var de tänkta tillämpningarna inte samstämmiga med teknikens möjligheter. De stora projekten för nedskjutning av interkontinentala robotar har i det närmaste varit

kontraproduktiva för mer realistiska tillämpningar som luftvärn för kortare avstånd samt skydd av större marina fartyg.

Prototyper av laservapen för skydd mot projektiler (C-RAM, ”Counter Rocket, Artillery and Mortars”) har demonstrerats i till exempel Tyskland (Figur 17) och USA under de senaste åren. En artillerilokaliseringsradar används för att ge grovinriktning mot de inkommande projektilerna. En optisk sensor används sedan för att rikta lasern. Tekniken som har använts har främst varit att rikta [högeffektsfiberlasrar](#) mot målet. Med dagens effekter på 30-150 kW krävs några sekunders belysning för att bekämpa granater. En annan tillämpning är taktiska laservapen för att skydda större marina plattformar från hot som små UAV:er och snabba små båtar.



Figur 17 Demonstration av ett 30 kW taktiskt laservapen som tagits fram av tyska Rheinmetall. Här visas hur en UAV bekämpas på ca 1 km avstånd. Källa: Rheinmetall[12].

En teknik som är aktuell för framtiden är [koherent strålkombinering](#) av [fiberförstärkare med perfekt strålkvalitet](#). Detta ger möjlighet till mindre stråldiameter på målet och därmed högre effekttäthet än med en klassisk högeffektsfiberlaser. En högre effekttäthet på målet ger kortare bekämpningstider samt möjlighet att utnyttja längre räckvidder. Även mer traditionella [högeffektslasrar](#) utvecklas för taktiska laservapen.

En stor fördel med laservapen jämfört med klassiska kinetiska vapen är att varje bekämpning är billig, och så länge tillräcklig elkraft finns är magasinet inte heller begränsat. En annan fördel är att ingen ammunition faller till marken och kan orsaka skador. Dock finns en lasersäkerhetsrisk för eventuella flygplan ovanför eller för personer i omgivningen. Under den senaste tiden har man bland internationella experter, till exempel i National Photonics Initiative i USA, talat om taktiska laservapen som en möjlig ”Game Changer” för det framtida slagfältet.

Tillbaka till:

[Skydd av fasta installationer](#)

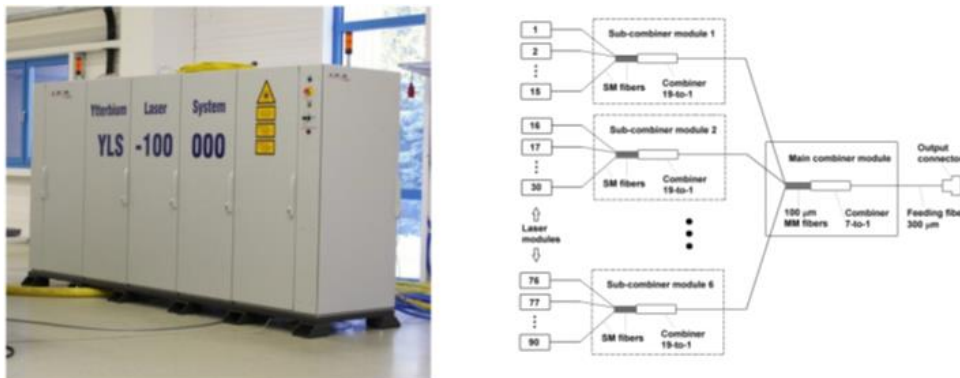
[Fartygsbaserade system](#)

[Skydd av stridsvagn/stridsfordon/konvoj](#)

4 Nya komponenter och tekniska koncept

4.1 Högeffektsfiberlaser

Fiberlasrar med höga effekter, i dagsläget upp till 50 kW¹, finns kommersiellt tillgängliga för materialbearbetning i tillverkningsindustrin. Dessa används idag i flera taktiska laservapendemonstratorer. Både singel- och multimodskonfigurationer studeras men multimod används för att skapa de högsta medeleffekterna. Nackdelen med multimodskonfigurationer är att strålprofilen är relativt dålig vilket försvårar möjligheter att bekämpa mål på längre avstånd (> 3 km). Ett annat problem är att våglängden är 1 μm vilket skapar problem med dämpning och turbulens i atmosfären samt frågor kring ögonsäkerhet.



Figur 18 100 kW fiberlaser som demonstrerats av IPG Photonics. Från ref. [13].

Fiberlasrar med hög uteffekt är relativt kompakta, har hög verkningsgrad och själva fibern har en stor area per volymenhet något som är viktigt för att reducera påverkan från termiska effekter[14]. Vanligtvis används Yb-joner som aktivt medium och fiberlasrarna pumpas oftast i ena änden med hjälp av särskild inkopplingsoptik. Skalning av effekten åstadkommes genom att kombinera flera lasermoduler samt utnyttja förstärkarsteg.

Multimodstrålen som emitteras från industriella högeffektsfiberlasrar har en strålkvalité som är ca fyra gånger större än diffraktionsgränsen. Problem som kan relateras till den här lasertypen inkluderar till exempel optiska skador på fiberdelar samt icke-linjära effekter i fibern som påverkar prestanda. Fiberlasrar kan användas till strålkombinering för att öka lasereffekten ytterligare.

I singelmod kan man uppnå upp till 10 kW uteffekt med nästan diffraktionsbegränsad strålkvalité[15]. Nyligen demonstrerades 100 kW i medeleffekt (Figur 18 och ref. [13]). Systemet var uppbyggt kring 90 lasermoduler där varje modul emitterade ca 1,2 kW i medeleffekt. Under 30 minuters tester erhöles $\pm 0,2\%$ effektfluktuationer. Verkningsgraden hos lasersystemet var 35% och drift i mer än 40 timmar har visats.

Tillbaka till:

[Sensorförstörande lasersystem](#)

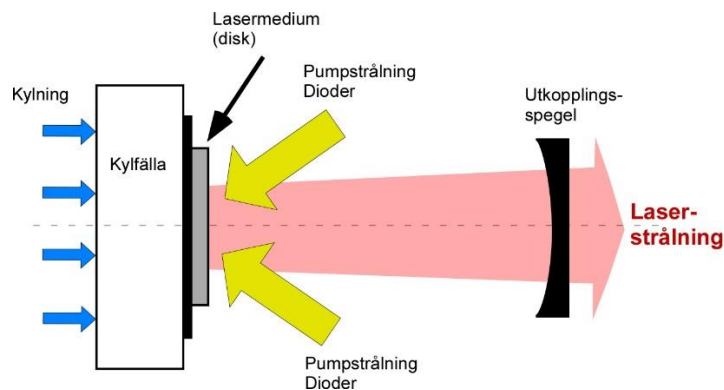
[Laservapen C-RAM](#)

¹ Till exempel från IPG Laser, http://www.ipgphotonics.com/apps_materials_multi_yls.htm

4.2 Diodpumpade fastatillståndslasrar med hög effekt

Kristallina fastatillståndslasrar med hög verkningsgrad utvecklas för taktiska laservapentillämpningar. Lasertypen pumpas vanligen med dioder med hög verkningsgrad för att minska termiska förluster, vilka är ett stort problem relaterat till den här lasertypen. Typiska konfigurationer är baserade på Nd:YAG eller Yb-joner dopade i keramiska material som är kluvna i ”slab”-geometrier med optimerade värmeledningsegenskaper. I en ”slab”-geometri pumpas laserstaven från sidan där olika innovativa lösningar används. För att erhålla en hög uteffekt kombineras flera steg modulärt i förstärkarsteg. Vanligtvis behöver de individuella stegen faslåsas för att få en stabil uteffekt. Uteffekter på över 100 kW har demonstrerats med moduluppbyggda ”slab”-konfigurationer [16]. Modulerna bestod av sju laserkedjor med förstärkarmoduler som kunde leverera ca 15 kW lasereffekt. Varje lasermodul har aktiv optik för att kompensera termiska effekter som annars skulle distordera strålkvalité och försämra laserprestanda. Hantering av termiska effekter är en viktig del i en diodpumpad fastatillståndslasermodul med hög medeleffekt för att reducera aberrationer. Här används olika konfigurationer av aktiv/adaptiv optik. En strålkvalité två till tre gånger högre än diffraktionsgränsen kan förväntas i den här sortens lasrar.

En annan typ av fastatillståndslasrar är keramiska skivor som dopas med Nd:YAG eller Yb och diodpumpas från sidorna. Här kan de termiska gradienterna reduceras vilket förbättrar strålkvalitén utan att aktiv kylning av lasermediet krävs. Medeleffekter över 67 kW under en kortare tid har visats med värmekapacitetsbaserade laserkonfigurationer [17]. Disklasrar kan också användas för att generera höga medeleffekter. Här består lasermediet (till exempel Yb:YAG) av en tunn disk monterad på en kylfälla (Figur 19). Lasermediet pumpas från sidan med dioder som monterats för multipelreflektioner av pumpstrålningen genom mediet för att öka effektiviteten. Fördelen med en disk laser är att den termiska linsen minimeras pga. frånvaron av radiell värmeledning. Verkningsgraden är upp till 70% och strålkvalitén nära diffraktionsbegränsad. Hittills har uteffekter upp till 20-30 kW visats men uppskalning till 100 kW verkar inte omöjlig genom att använda multipla diskkonfigurationer [18].



Figur 19 Schematisk beskrivning av en disk laser.

Tillbaka till:

[Laservapen C-RAM](#)

4.3 Fiberförstärkare för koherent strålkombinering

För att kunna genomföra koherent strålkombinering så krävs att lasrarna har exakt samma våglängd, annars kommer interferensmönstret variera i tiden och den önskade högintensiva fläcken uppnås inte. Detta skapas enklast genom att istället för separata lasrar ha ett antal fiberförstärkare som alla är kopplade till samma laser. Förstärkning av lasrar med smal

spektral bandbredd i fiberförstärkare begränsas av stimulerad Brillouinspridning (SBS), men singelfrekventa system har ändå nått över 300 W i en fiber[19]. Något sämre spektral renhet kan användas i många fall och genom att bredda spektrum till några GHz kan lasereffekter över 1 kW per fiber uppnås [20].

Tillbaka till:

[Sensorförstörande lasersystem](#)

[Laservapen C-RAM](#)

4.4 VCSEL

VCSEL ("Vertical Cavity Surface Emitting Laser") är en diodlasertyp som uppfanns 1977 men som fortfarande väntar på sitt genombrott. Skillnaden mot en vanlig diodlaser är att laserkaviteten byggs på höjden ovanpå halvledarsubstratet istället för att läggas längs med ytan. Några av de viktigaste fördelarna är: Billig parallelliserad tillverkningsteknik, bra strålkvalitet och runda strålar utan optisk omvandling (vanliga diodlasrar har i grunden elliptiska strålar).

Mycket av utvecklingen har varit fokuserad mot telekom eftersom strålformen underlättar inkoppling i fiber, och den kommersiella tillämpning som finns är lasrar för korthållskommunikation. Den militära nyttan skulle främst vara att eftersom optiken för kollimering av strålen kan göras enklare än för en traditionell diodlaser så blir hela systemet mindre och lättare. Matriser av VCSEL-lasrar kan vara användbara för scenbelysning eller bländning. Förutom att optiken blir kompakt är en fördel att eftersom matrisen innehåller många olika lasrar reduceras speckeleffekterna så att bilden ser mindre "grynig" ut [21].

Tillbaka till:

[Aktiv 2D-avbildning](#)

4.5 Gröna lasrar

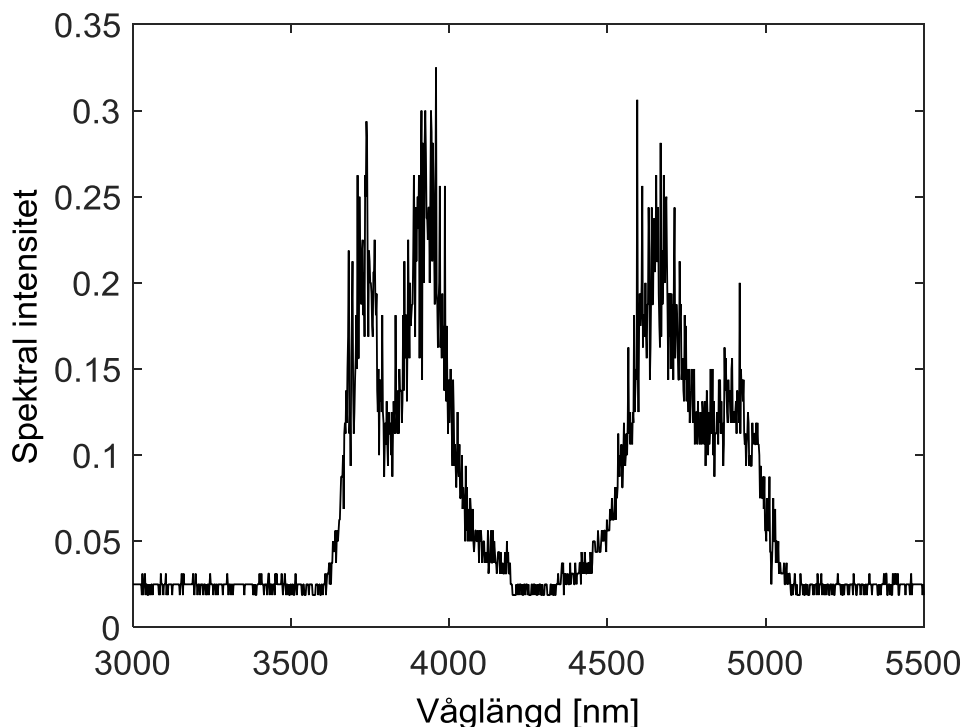
Lasrar i det gröna spektralområdet från 500 till 550 nm är de mest användbara för bländning eftersom ögats känslighet är högst där. Än så länge finns inga passande diodlasrar i grönt. Gröna lasrar skapas istället utgående från en diodlaser nära 800 nm som pumpar en kristallaser, oftast en neodymlaser som lasrar vid 1064 nm, och sedan konverteras laserstrålningen till grönt ljus via frekvensför-dubbling i en icke-linjär optisk kristall. På så sätt skapas grönt ljus vid 532 nm våglängd. Gröna lasrar som använder denna metod finns med vitt skilda effektnivåer och storlekar, till exempel är de inte ovanliga som små laserpekare.

Tillbaka till:

[Bländande laser för att försvåra skott - synligt och IR](#)

4.6 Optiska parametriska oscillatorer (OPO)

När laserstrålning behövs vid en våglängd där inget lasermaterial med bra egenskaper finns kan man konvertera våglängden på strålningen från en högkvalitativ laser vid en annan våglängd. En OPO kan förenklat sägas dela en foton i två, där de får olika delar av energin. Eftersom våglängden är inverst proportionell mot fotonenergin så skapar en OPO strålning med längre våglängder. Exakt vilka våglängder kan bestämmas genom egenskaperna för den icke-linjära kristall som används i OPOn. Genom att till exempel vrida kristallen eller ändra dess temperatur kan våglängden ändras under drift.



Figur 20. Exempel på spektrum från en OPO som tagits fram på FOI för värdering av motmedelstillämpningar.

OPOer är en etablerad teknik som används bland annat i ögonsäkra laseravståndsmätare vid 1,5 μm och i alla operativa DIRCM-system.

Tillbaka till:

[DIRCM](#)

4.7 Nya lasermaterial

Det pågår ständigt materialutveckling för bättre laserkällor. Ett aktivt område under senare år har varit lasermaterial för området mellanvågs-IR. Till största delen är de joner som verkligen lasrar, till exempel erbium, tulium eller krom, inte nya utan det är materialen de dopas i som utvecklas. Här finns både kristaller med bättre termiska egenskaper och glas med transmission i IR för fiberlasrar. Speciellt kromdopade II-VI-halvledarmaterial som Cr:ZnSe visar mycket bra prestanda med uteffekter upp till tiotals Watt i området 2-2,5 μm [22]. Kromdopade lasrar visar mycket bra prestanda för både kontinuerliga lasrar med avstämbbar våglängd och för lasrar med ultrakorta pulser. Lasrarna pumpas lämpligen med Tm-fiberlasrar.

För längre våglängder visar järnjoner lovande spektroskopiska egenskaper och lasring har demonstrerats med upp till 1,6 W medeleffekt vid 4,1 μm från Fe:ZnSe [22]. Problemet här är att de måste pumpas med en annan laser med våglängd 2,6-3,1 μm där det är ont om lämpliga pumplasar. Pumpningen kan göras med till exempel en Cr:ZnSe-laser, men detta blir då ett stort och komplext system där det blir fyra lasersteg (diodlaser, Tm-fiberlaser, Cr:ZnSe-laser och Fe:ZnSe-laser). Våglängdskonvertering av en laser i kortvågig IR med en OPO kan därför än så länge nå bättre prestanda med ett enklare system.

Nya ickeinjära kristaller för våglängdskonvertering till IR-området utvecklas på flera fronter [23]. Dels genom att helt nya kristaller hittas och dels genom att nya tillverkningstekniker med snabb växning av halvledarmaterial ger möjlighet till

kvasifaspassning. Ickelinjär optik med frekvensdubbling, summafrekvensgenerering och optiska parametriska oscillatorer är den mest flexibla metoden att generera laserstrålning vid olika våglängder och med olika pulsformer. Priset är att verkningsgraden sjunker och lasern därmed blir stor och dyr.

En annan utveckling på materialsidan under senare år har varit användning av kolnanorör och grafen i passiva komponenter för pulsning av lasrar[24,25]. De fungerar som mättningsbara absorberatorer där absorptionen bleks när intensiteten blir hög. Detta gör att man sakta kan lagra upp energi i ett lasermaterial och sedan släppa ut allt i form av en kort puls. Q-switchning och modlåsning är två olika varianter på pulsningsteknik som ger nanosekundspulser respektive piko- till femtosekundspulser.

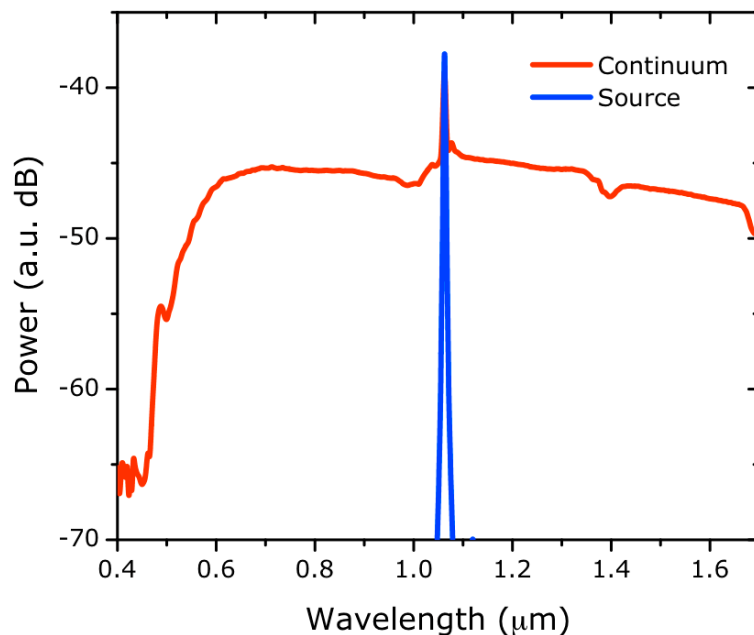
Tillbaka till:

[DIRCM](#)

4.8 Superkontinuumlasrar

En laser är normalt spektralt smalbandig. Genom att utnyttja icke-linjära optiska effekter kan man dock skapa frekvenskammor där ett brett spektrum täcks av spektrala linjer på ekvidistanta avstånd i frekvens. Det totala spektrumet kan bli mycket brett, till exempel kan våglängdsområdet 400 nm till 2 μm täckas in av en enda laser (Figur 21). När laservåglängden breddats så att den spektrala bredden inte är försumbar jämfört med centrumvåglängden kallas det en superkontinuumlaser. I laboratorier används de bland annat som frekvensreferenser i mycket noggranna klockor och för olika spektroskopitillämpningar. Militära tillämpningar är ännu inte vanliga, men de skulle kunna utgöra laserkällor för bländning som inte kan filtreras bort med spektrala filter.

Genom att använda optiska fibrer som inte är gjorda av oxidbaserade utan fluoridbaserade glas kan superkontinuumlasrar i området 2-5 μm skapas [26]. Superkontinuumlasrar blir då intressanta för motmedel mot IR-målsökare. Dock är fluoridbaserade fibrer mycket sköra och därför är detta ännu inte en operativt användbar teknik. Materialutveckling pågår ständigt och det är möjligt att praktiskt användbara optiska fibrer som är transparenta i mellanvågs-IR blir tillgängliga i framtiden, tänkbart är till exempel att gjuta in fibrerna i ett annat material så att de inte utsätts för mekaniska påfrestningar.



Figur 21. Exempel på hur spektrum för en laser med hög toppeffekt breddas när den propagerar i en optisk fiber och bildar ett superkontinuum. © Burlyc / Wikimedia Commons / CC-BY-SA-3.0 / GFDL

Tillbaka till:

[Bländande laser för att försvåra skott - synligt och IR](#)

[DIRCM](#)

4.9 GaSb-diodlasrar

Diodlasrar är viktiga laserkällor i många sammanhang, både för direkt användning och som pumplasar för fasta tillståndslasrar, inklusive fiberlasrar. En ny materialklass för diodlasrar, galliumantimonid (GaSb), utvecklas för tillfället starkt. Det nya med detta är att diodlasrar vid våglängder på 2 till 3 μm nu börjar nå bra prestanda med uteffekter över 1 W [27]. Den militära nyttan förväntas främst vara störning och bländning.

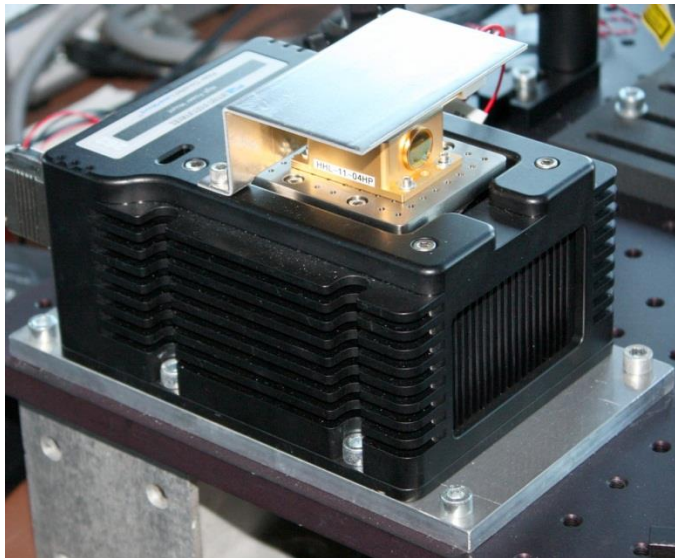
Tillbaka till:

[Bländande laser för att försvåra skott - synligt och IR](#)

[DIRCM](#)

4.10 Kvantkaskadlasrar QCL

Kvantkaskadlasrar med akronymen QCL för engelskans "Quantum Cascade Laser" är en typ av halvledarlasrar som inte är diodlasrar, men som vid praktisk användning har mycket gemensamt med dem. Eftersom fotonerna frigörs vid elektronens övergångar mellan olika energinivåer i kvantbrunnar och inte vid rekombination av elektroner och hål så är fotonenergierna låga och våglängden lång. QCL-tekniken är främst lämplig för våglängder längre än 3,5 μm . Därmed är kvantkaskadlasrar väl ägnade till störning och bländning av IR-målsökare och termiska sikten. En nackdel med QCL:er är att de fungerar sämre ju högre temperaturen är samtidigt som de producerar en hel del värme. Utvecklingen går dock framåt och prestanda vid rumtemperatur börjar bli bra. I våglängdsområdet 4,5-5 μm finns nu lasrar med över 5 W medeleffekt [28].



Figur 22. En kvantkaskadlaser som används vid IR-bländningsexperiment på FOI. Lasern finns inne i den mässingsfärgade kapseln som sitter ovanpå ett mycket större kylblock.

Tillbaka till:

[Optikspaning](#)

[Bländande laser för att försvåra skott - synligt och IR](#)

[Bländning av satelliter](#)

[DIRCM](#)

[Störning av sjömålsrobot](#)

[Mättnad med falska mål](#)

4.11 UV-lasrar och dioder

Laserdioder i UV demonstrerades första gången 1995, dock har ännu inga laserdioder vid kortare våglängd än 336 nm visats. Det finns dock inte grundläggande fysikaliska begränsningar, utan laserdioder med våglängd ner till långt under 280 nm bör vara möjliga [29]. Någon tidshorisont när laserdioder i djup UV kan finnas tillgängliga är omöjligt att sätta. Excimerlasrar som är en form av gaslaser och fastatillståndslasrar med frekvenskonvertering finns tillgängliga i UV sedan många år, men inte som kompakta laserkällor.

Lysdioder (LED) i UV-området finns sedan några år tillbaka med effekter höga nog att använda i stimulatorer för robotskottvarnare [30]. För att simulera avfyrning och närmandeförlopp för en robot skapas en intensitetsprofil i tiden för ljuskällan som motsvarar vad robotskottvarnaren skulle se från en riktig robot.

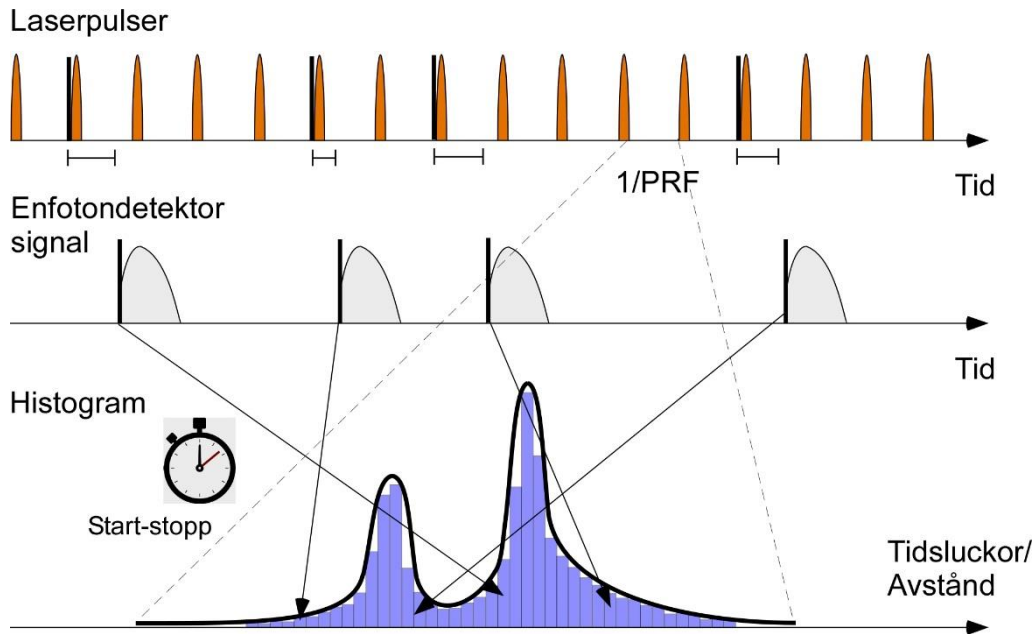
Vid våglängder under 280 nm absorberar ozonskiktet all solinstrålning, och det finns därför inget bakgrundsljus. Spektralområdet kallas därför ofta för det solblinda området. Även nära marken är spridningen kraftig på grund av den korta våglängden. Detta utnyttjas för korthållskommunikation där ljuskällan kan riktas rakt upp mot himlen och den spridda strålningen detekteras på andra punkter i närheten utan fri sikt mellan sändare och mottagare. En annan möjlig tillämpning är IIFF ("individual identification friend foe") sändare.

Tillbaka till:

[Mättnad med falska mål](#)

4.12 Fotonräknande detektorer

En fotonräknande detektor ger en strömpuls mycket högre än brusnivån för en enda absorberad foton. De vanligaste typerna är fotomultiplikatorer (PMT, "Photo Multiplier Tube") och fotolavindioder backspända i Geigermod (GmAPD, "Geigermod Avalanche Photo Diode", kallas även SPAD, "Single Photon Avalanche Diode"). Förutom känsligheten är en stor fördel med fotonräknande detektorer att flankens position i tiden kan mätas med mycket hög noggrannhet. Kostnaden för dessa fördelar att bara den först mottagna fotonen vid varje mätning kan detekteras, sedan måste detektorn återställas vilket kan ta från 10 ns och upp till flera μ s beroende på detektoregenskaper. Om en laser med korta pulser noggrant synkroniseras med detektion hos GM-APDmatrisen kan avstånd bestämmas genom "time-of-flight" (TOF) teknik. Genom att samla tider från upprepade mätningar i ett histogram kan en avståndsprofil med mycket hög upplösning mätas (Figur 23). Här ges avståndsupplösningen av systemets tidsnoggrannhet dvs. pulslängd, tidsjitter i detektion av en foton samt tidsjitter i elektronik som används för att samla in data. Med en detektorpixel kan avståndsprofiler med upplösning under 1 cm realiseras [31].



Figur 23 Principen för fotonräknande laserradar är många svaga laserpulser skickas ut. Ibland detekteras en foton, i genomsnitt mycket mindre än en foton per laserpuls, och då mäts tiden sedan den senast utskickade laserpuls med mycket hög noggrannhet. Tiderna sorteras in i ett histogram som skapar ett laserradarsvar med hög tidsupplösning och dynamik.

Under det senaste decenniet har fokalplansmatriser baserade på fotonräkning utvecklats. Dessa kan kombineras med aktiv belysning (laserradar) för att erhålla 3D-information från en belyst scen. Matriser med fotolavindioder baserade på Geigermodteknik är under utveckling och GmAPD-matriser bestående av 32×32 eller 32×128 pixlar finns idag kommersiellt vid våglängderna 1 och 1,5 μm . Det begränsade antalet pixlar och storleken på pixlarna (50-100 μm) medför att synfältet blir begränsat om rumsupplösningen inte ska bli för dålig. Avståndsupplösning ner till 10 till 20 cm kan realiserars med 3D-laserradarsystem baserade på GmAPD-matriser.

Även fotomultiplikatorer kan göras i matrisform genom pixellerade anoder. Denna teknik har dock stora problem med upplösningen, men system med 10×10 pixlar har använts i lidarsystem [32]. En annan ny fotonräknande detektorteknologi är baserad på supraleddande nanotrådar som på sikt kan ha potential för fotonräknande LADAR. Här måste man dock lösa problem som är relaterade till detektorkylning som i dagsläget gör tekniken relativt komplicerad eftersom detektorerna måste kylas till under 10 K. Principer har dock visats i demonstratorsystem för avståndsprofilering [33].

Tillbaka till:

[Laservarnare](#)

[Smygande sensorer – avståndsmätare](#)

[Högupplöst avståndsprofilering](#)

[3D-avbildning](#)

4.13 Strålförning

En viktig komponent i telekrigstillämpningar när laserbaserade system används är att uppnå en homogen belysning av scenen eller det objekt man är intresserad av. Vanligtvis kan en Gaussisk strålförning åstadkommas genom att fiberlösningar utnyttjas. I många fall är man dock intresserad av att ha en rektangulär eller kvadratisk relativt homogen strålförning. Exempel på tillämpningar är här olika typer av LADAR-system för spaning och

måligenkänning, optikspaning samt bländning. Ett vanligt problem vid olika typer av strålförformning är att den genererar förluster och lasereffekten reduceras.

Det enklaste sättet att förändra strålprofilen är att använda sig av geometriska metoder samt specialdesignade optiska komponenter[34]. Här används beräkningar baserat på "Ray-tracing" för att optimera och utforma optiken. Ett flertal refraktiva eller reflektiva komponenter behövs oftast för att forma en laserstråle vilket kan innebära transmissionsförluster och ökade vikt och volymkrav. Geometriska metoder används ofta vid olika typer av projektionssystem där jämn belysning önskas. En begränsande faktor kan även vara att optiken är utformad för ett visst avstånd vilket inte är tillämpligt i de flesta militära tillämpningar. Diffraktiv optik används även för strålförformning och här kan önskad strålprofil för given våglängd och avstånd bestämmas. I det enklaste fallet kan man tänka sig en fasplatta som modulerar laserstrålens vågfront för att skapa den önskade strålprofilen. Här används diffraktionsteori och optimeringsalgoritmer för att optimera strålprofilen för ett givet avstånd. Integrerande system för strålförformning utnyttjar t.ex. multipla aperturer av linsmatriser. Även här kan homogena strålprofiler åstadkommas.

Problem vid strålförformning inkluderar förluster i komponenter vilket inte alltid kan accepteras. Särskilt med tekniker som baseras på diffraktionseffekter kan förlusterna bli påtagliga. Vid längre våglängder är även materialval ett problem eftersom avancerade komponenter kan bli orimligt dyra om exotiska material krävs. Skadeträsklar måste också beaktas vid design av strålförformningsoptik för tillämpningar som kräver höga medeleffekter. Som nämnt ovan är en stor utmaningen att utforma en strålförformningsoptik som fungerar bra över olika avstånd. Det behöver därför för varje tillämpning göras en avvägning mellan nytta och kostnad vid införande av strålförformande optik, där olika prestandanivåer kan vara aktuella i olika tillämpningar.

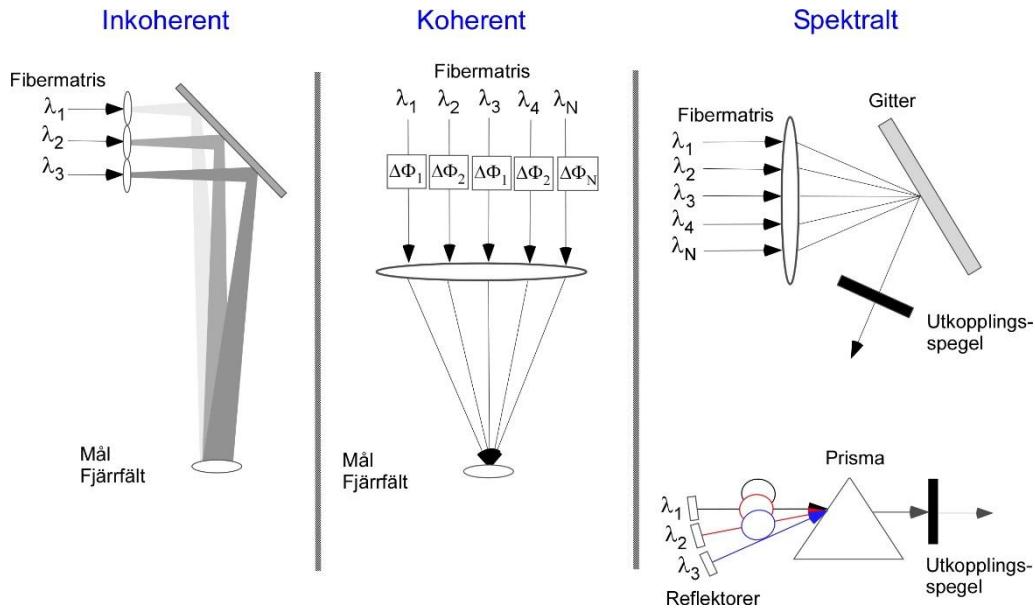
Tillbaka till:

[Aktiv 2D-avbildning](#)

[3D-avbildning](#)

4.14 Strålkombinering

För att öka medeleffekten från ett lasersystem kan strålkombinering användas där flera strålar adderas. De vanligaste metoderna kan grovt delas in i inkoherent, koherent och spektral strålkombinering (Figur 24). Syftet med strålkombinering är oftast att öka uteffekten utan att försämra strålkvalitén. Det enklaste sättet är inkoherent strålkombinering som i princip innebär att de olika lasrarna riktas mot samma punkt. Här optimeras överlappet av strålarna i fjärrfältet och återkoppling kan användas tillsammans med till exempel aktiva speglar för att optimera medeleffekten i fjärrfältet (eller på ett mål). Ett exempel på inkoherent strålkombinering där fiberlasrar och tip/tiltspeglar utnyttjades har presenterats av Naval Research Laboratory i Washington[35]. Här visades hur fyra strålar kunde kombineras till 3 kW medeleffekt på avståndet 1,2 km.



Figur 24 Exempel på vanliga metoder som används för strålkombinering.

Ett annat sätt att kombinera laserstrålar är att kontrollera fäsen individuellt hos varje laserstråle samt addera dessa koherent i fjärrfältet. Med återkoppling kan intensiteten på målet optimeras samt atmosfärsstörningar som turbulens till viss del kompenseras. Koherent strålkombinering har fördelen att en bättre strålförhållande kan uppnås. Nackdelen är dock att system med koherent strålkombinering kan bli tekniskt komplexa med högre kostnad som följd. Antalet strålar som kan kombineras kan också vara begränsade när koherenta scheman används. I en nyligen publicerad bok sammanställs moderna tekniker för koherent strålkombinering[36].

En annan teknik som kan användas för att kombinera laserstrålar bygger på spektrala egenskaper. Här kan t.ex. ett gitter eller prisma användas enligt Figur 24. Här kan t.ex. volymbragggitter användas och koherens (rumslig) kan erhållas i fjärrfältet. Spektrala tekniker är relativt billiga jämfört med aktivt koherenta där fäsen ändras individuellt för varje laserkälla. Afzal och Honea et al. visade hur spektral strålkombinering kan användas för att kombinera 12 fiberlasrar där 3 kW totaleffekt erhöles med bra strålförhållande [37,38].

Tillbaka till:

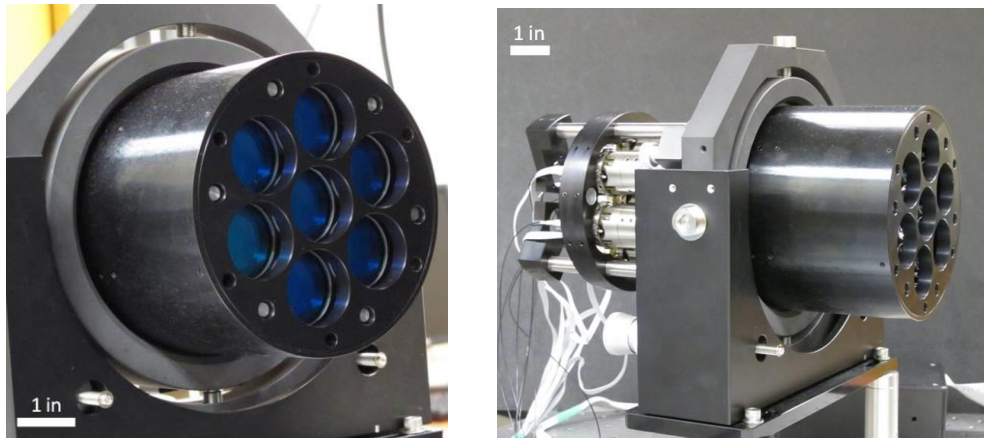
[Bländande laser för att försvåra skott - synligt och IR](#)

[Laservapen C-RAM](#)

4.15 Faslåsta matriser av lasrar - optiska antenner

Faslåsta matriser av lasrar är i princip koherent strålkombinering som beskrivits i avsnittet 4.14, men oftast med fler laserelement. Syftet här är att kontrollera fäsen hos de ingående laseremitterarna för att de ska fungera som en optisk antenn motsvarande fäststyrda gruppantennar för radar. Med faskontroll kan flera funktioner åstadkommas. Den mest uppenbara är att öka intensiteten på ett mål genom att addera flera laserstrålar koherent. På så sätt erhålls en bättre strålförhållande och högre laserintensitet. Ett exempel på hur strålar kan adderas koherent beskrivs i demonstratorprojektet Excalibur som finansieras av DARPA och realiseras av Optonicus i USA[39,40]. I Figur 25 visas bilder på hur multipelaperturen för 7 fiberlasrar ser ut. Med tekniken har man demonstrerat faslåsning av 21 fiberlasrar över 7 km avstånd samt kompenserat för atmosfärsstörningar. Genom att använda en återkopplad signal som reflekteras från målet kan fäsen hos fiberlasersändarna

anpassas för att minimera påverkan av turbulens och därmed optimera lasereffekten på målet.



Figur 25 Bilder på Excalibur som är en demonstrator för att visa teknik för faslåsta lasrar som utvecklas på uppdrag av DARPA. Källa: DARPA[41].

Genom att manipulera fasen hos individuella lasersändare kan man även utföra icke-mekanisk strålstyrning. Här appliceras ett linjärt fasskift över sändaraperturen som motsvarar en viss utvridningsvinkel. När lutningen på fasskiftet ändras kommer även utvridningsvinkeln att ändras. Tekniken har demonstrerats med komponenter som kan skapa fasmodulering hos en infallande laserstråle med till exempel vätskekristallsbaserade SLM:er ("spatial light modulators"). Ett nytt forskningsområde inom nanotekniken benämns optiska antenner där nanostrukturer används för att forma ljus som emitteras från speciellt designade material [42]. Här kan man på sikt se nya tillämpningar för att även på sikt kontrollera ljus över längre avstånd.

En intressant utveckling sker för lägre effekter, till exempel för bländning och optisk kommunikation, inom "silicon photonics" där vågledare i kisel kan användas för att skapa justerbara fasskift mellan de olika emitterelementen [43]. Andra lösningar med MEMS (mikro-elektromekaniska system) aktuatorer har demonstrerat 32×32 element för styrning [44].

När kompakta optiska antenner för icke-mekanisk strålstyrning blir moget nog för praktiska tillämpningar så kommer det revolutionera lasersystem för till exempel bländning. Då kommer bländlasermodulen kunna monteras platt på ytan av ett fordon istället för i en pan-tilt-plattform, vilket gör att lasersystemen blir mycket enklare att integrera i plattformar. Tidshorisonten för när praktiskt användbara optiska antenner kommer finnas tillgängliga är svår att förutse.

Tillbaka till:

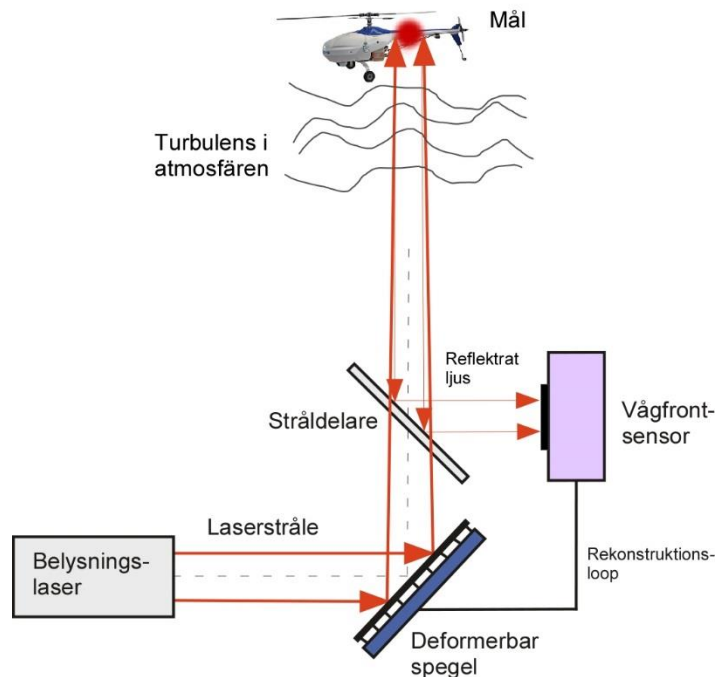
[Bländande laser för att försvåra skott - synligt och IR](#)

[Sensorförstörande lasersystem](#)

4.16 Aktiv och adaptiv optik

Principen för adaptiv optik är att sampla vågfrontsstörningar, rumsligt och temporalt, med en vågfrontsensor samt korrigera störningar med ett korrigrande element som t.ex. en deformerbar spegel. I Figur 26 visas schematisk principen för ett belysningsystem med adaptiv optik bestående av en vågfrontsensor och en deformerbar spegel. Lägre ordningens korrektion av aberrationer som tip/tilt kan korrigeras i en separat loop med en snabb spegel. Ett problem vid kompensering av turbulens i atmosfären är att laserstrålen kan brytas upp

(särskilt vid utbredning nära marken och över längre sträckor) vilket medför att det är svårt att karakterisera störningar med en vågfrontssensor. Vanligtvis kan det räcka med att korrigera lägre ordningens aberrationer som tip/tilt och fokus/defokus för att erhålla prestandaförbättringar.



Figur 26 Princip för adaptiv optik

Behovet av adaptiv optik diskuteras inom laservapen användningar där verkan över längre avstånd krävs. I dagsläget har man visat att verkan går att åstadkomma upp till ca 3 km mot RAM-hot utan adaptiv optik. Adaptiv optik kan användas för att förbättra målföljning genom tip/tilt-korrektion. Ett annat område där adaptiv optik är aktuellt är vid korrektion av aerooptiska effekter som uppstår kring en flygplans kropp eller ett pekhuvud. Problemet här är att båda spatiella och temporala skalor kan vara utmanande pga. kraftiga störningar samt höga hastigheter. Motorplymer är ett annat område där tip/tilt och fokus kontroll är av intresse. I ett DIRCM-system kan aktiv målföljning utnyttjas med tip/tilt-korrektion implementerat för att öka följnoggrannheten och därmed kunna använda en laserstråle med lägre divergens. På så sätt kan laserintensiteten vid en målsökarapertur ökas med bibehållen lasereffekt. Notera dock att alla system som inkluderar adaptiv optik tenderar att bli relativt tekniskt komplexa och därmed dyra.

Tillbaka till:

[DIRCM](#)

[Sensorförstörende lasersystem](#)

4.17 Flödeskontroll för aerooptik

Prestanda för optiska system på snabba flygplan begränsas, framförallt när de riktas bakåt, av störningar från det turbulenta luftflödet. Virvlarna bakom utstickande strukturer som pekhuvuden som används för att rikta lasrar är extra besvärliga. Längre har man försökt optimera formen på pekhuvuden och kringliggande ytor för att genom passiv flödeskontroll skapa så lite turbulens som möjligt. Det förekommer även aktiv flödeskontroll med till

exempel luftsugning, plasmagenerering och piezoelektriska aktuatorer med samma syfte. Ett alternativt koncept vinner nu mark i den vetenskapliga litteraturen. Istället för att försöka minimera störning försöker man göra den periodisk, eller i alla fall predikterbar för en kort tid framåt, och därmed lättare att kompensera med adaptiv optik [45]. Detta görs till exempel med vibrerande ytor vid avlösningspunkten.

Tillbaka till:

[DIRCM](#)

[Sensorförstörande lasersystem](#)

Referenslista

- [1] L. Sjöqvist, C. Rosenquist, and O. Steinvall, "Tactical Laser Weapon Modelling - A Preliminary Analysis", *FOI-rapport, FOI-R--3381--SE*, 2011.
- [2] L. Sjöqvist, "Laser countermeasures using ultrashort laser pulses", *FOI-rapport, FOI-R--3002--SE*, 2010.
- [3] M. Henriksson and L. Sjöqvist, "Airborne platform effects on laser systems and warning sensors. Technical review", *FOI-rapport, FOI-R--1364--SE*, 2013.
- [4] J. Hedborg, M. Henriksson, M. Pettersson, and L. Sjöqvist, "Upptäckt av och röjningsrisk med aktiva lasersystem", *FOI-rapport, FOI-R--3938--SE*, 2014.
- [5] J. Sippola, "Imbuing Airborne Electronic Warfare Self-Protection – Possibilities to Disguise", *Master Thesis*, 2014.
- [6] R. Ragnarsson, O. Steinvall, F. Berglund, L. Allard, B. Larsson, and A. Haglund, "Upptäckt av små sjösmål på ytan. Slutrapport", *FOI-R--4022--SE*, 2014.
- [7] M. Henriksson, E. Anselem, and H. Larsson, "Laserkoncept för UAV. En marknadsgenomgång av befintliga och framtida koncept.", *FOI-rapport, FOI-R--3904--SE*, 2014.
- [8] O. Steinvall, R. Persson, F. Berglund, O. K. S. Gustafsson, and F. Gustafsson, "Using an eyesafe military laser range finder for atmospheric sensing", *Proc. SPIE*, vol. 9080, 90800W, 2014.
- [9] "http://en.wikipedia.org/wiki/KH-11_Kennan."
- [10] "<http://www.northropgrumman.com>."
- [11] "<http://www.cilas.com>."
- [12] "<http://www.rheinmetall-defence.com>."
- [13] E. Shcherbakov, V. Fomin, A. Abramov, A. Ferin, D. Mochalov, and V. P. Gapontsev, "Industrial Grade 100 kW Power CW Fiber Laser," in *Advanced Solid-State Lasers Congress*, Paris, 2013, OSA Technical Digest (online), ATh4A.2.
- [14] R. A. Motes and R. W. Berdine, *Introduction to High Power Fiber Lasers* Albuquerque, New Mexico: The Directed Energy Professional Society (DEPS), 2009.
- [15] D. Richardson, J. Nilsson, and W. Clarkson, "High power fiber lasers: current status and future perspectives [Invited]", *JOSA B*, vol. 27, pp. B63-B92, 2010.
- [16] S. J. McNaught, C. P. Asman, H. Injeyan, A. Jankevics, A. M. Johnson, G. C. Jones, H. Komine, J. Machan, J. Marmo, M. McClellan, R. Simpson, J. Sollee, M. M. Valley, M. Weber, and S. B. Weiss, "100-kW Coherently Combined Nd:YAG MOPA Laser Array," *Frontiers in Optics 2009/Laser Science XXV/Fall 2009 OSA Optics & Photonics Technical Digest*, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2009), paper FThD2.
- [17] R. M. Yamamoto, B. S. Bhachu, K. P. Cutter, S. N. Fochs, S. a. Letts, C. W. Parks, M. D. Rotter, and T. F. Soules, "The use of large transparent ceramics in a high powered,

diode pumped solid state laser", *Advanced Solid-State Photonics*, OSA Technical Digest (CD), WC5, 2008.

- [18] S.-S. Schad, V. Kuhn, T. Gottwald, V. Negoita, A. Killi, and K. Wallmeroth, "Near fundamental mode high-power thin-disk laser", *Proc. SPIE*, vol. 8959, 89590U, 2014.
- [19] T. Theeg, H. Sayinc, J. Neumann, and D. Kracht, "All-fiber counter-propagation pumped single frequency amplifier stage with 300-W output power", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 24, pp. 1864-1867, 2012.
- [20] Z. Liu, P. Zhou, X. Xu, X. Wang, and Y. Ma, "Coherent beam combining of high power fiber lasers: Progress and prospect", *Science China Technological Sciences*, vol. 56, pp. 1597-1606, 2013.
- [21] D. Zhou, J.-F. Seurin, G. Xu, A. Miglo, D. Li, Q. Wang, M. Sundaresh, S. Wilton, J. Matheussen, and C. Ghosh, "Progress on vertical-cavity surface-emitting laser arrays for infrared illumination applications", *Proc. SPIE*, vol. 9001, 90010E, 2014.
- [22] S. B. Mirov, V. V. Fedorov, D. Martyshkin, I. S. Moskalev, M. Mirov, and S. Vasilyev, "Progress in Mid-IR Lasers Based on Cr and Fe-Doped II-VI Chalcogenides", *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 21, 1601719, 2015.
- [23] V. Petrov, "Parametric down-conversion devices: The coverage of the mid-infrared spectral range by solid-state laser sources", *Optical Materials*, vol. 34, pp. 536-554, 2012.
- [24] F. Rotermund, W. B. Cho, S. Y. Choi, I. H. Baek, J. H. Yim, S. Lee, a. Schmidt, G. Steinmeyer, U. Griebner, D. I. Yeom, K. Kim, and V. Petrov, "Mode-locking of solid-state lasers by single-walled carbon-nanotube based saturable absorbers", *Quantum Electronics*, vol. 42, pp. 663-670, 2012.
- [25] Z. Sun, T. Hasan, and a. C. Ferrari, "Ultrafast lasers mode-locked by nanotubes and graphene", *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, vol. 44, pp. 1082-1091, 2012.
- [26] P. M. Moselund, C. Petersen, S. Dupont, C. Agger, O. Bang, and S. R. Keiding, "Supercontinuum: broad as a lamp, bright as a laser, now in the mid-infrared", *Proc. SPIE*, vol. 8381, 83811A, 2012.
- [27] E. Dvinelis, A. Trinkūnas, M. Greibus, M. Kaušylyas, T. Žukauskas, I. Šimonytė, R. Songaila, A. Vizbaras, and K. Vizbaras, "High-performance GaSb laser diodes and diode arrays in the 2.1-3.3 micron wavelength range for sensing and defense applications", *Proc. SPIE*, vol. 9370, 93702E, 2015.
- [28] C. K. N. Patel, a. Lyakh, R. Maulini, a. Tsekoun, and B. Tadjikov, "QCL as a game changer in MWIR and LWIR military and homeland security applications", *Proceedings of SPIE*, vol. 8373, 83732E, 2012.
- [29] M. M. Satter, H. J. Kim, Z. Lochner, J. H. Ryou, S. C. Shen, R. D. Dupuis, and P. D. Yoder, "Design and analysis of 250-nm AlInN laser diodes on AlN substrates using tapered electron blocking layers", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 48, pp. 703-711, 2012.
- [30] M. Shatalov, Y. Bilenko, J. Yang, and R. Gaska, "Deep ultraviolet semiconductor light sources for sensing and security", *Proc. SPIE*, vol. 7484, 74840C, 2009.

- [31] L. Sjöqvist, M. Henriksson, P. Jonsson, and O. Steinvall, "Time-correlated single-photon counting range profiling and reflectance tomographic imaging", *Advanced Optical Technologies*, vol. 3, pp. 187-197, 2014.
- [32] J. Degnan, R. Machan, E. Leventhal, D. Lawrence, G. Jodor, and C. Field, "Inflight performance of a second generation, photon counting, 3D imaging lidar", *Proc. SPIE*, vol. 6950, 695007, 2008.
- [33] S. Chen, D. Liu, W. Zhang, L. You, Y. He, W. Zhang, X. Yang, G. Wu, M. Ren, H. Zeng, Z. Wang, X. Xie, and M. Jiang, "Time-of-flight laser ranging and imaging at 1550 nm using low-jitter superconducting nanowire single-photon detection system", *Applied optics*, vol. 52, pp. 3241-3245, 2013.
- [34] F. M. Dickey, *Laser Beam Shaping: Theory and Techniques, Second Edition*: Taylor & Francis, 2014.
- [35] P. Sprangle, A. Ting, J. Penano, R. Fischer, and B. Hafizi, "Incoherent combining and atmospheric propagation of high-power fiber lasers for directed-energy applications", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 45, pp. 138-148, 2009.
- [36] A. Brignon, *Coherent Laser Beam Combining*: Wiley, 2013.
- [37] R. S. Afzal, E. Honea, M. Savage-Leuchs, N. Gitkind, R. Humphreys, J. Henrie, K. Brar, and D. Jander, "Spectrally beam combined fiber lasers for high power, efficiency, and brightness", *Proc. SPIE*, 854706, 2012.
- [38] E. Honea, R. S. Afzal, M. Savage-Leuchs, N. Gitkind, R. Humphreys, J. Henrie, K. Brar, and D. Jander, "Spectrally beam combined fiber lasers for high power, efficiency, and brightness", *Proc. SPIE*, 860115, 2013.
- [39] "http://www.darpa.mil/Our_Work/MTO/Programs/EXCALIBUR.aspx."
- [40] T. Weyrauch, M. Vorontsov, V. Ovchinnikov, E. Polnau, G. Wu, T. Ryan, and M. Maynard, "Atmospheric Turbulence Compensation and Coherent Beam Combining over a 7 km Propagation Path Using a Fiber-Array System with 21 Sub-apertures," in *Imaging and Applied Optics 2014*, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2014), paper PW2E.3.
- [41] "www.darpa.mil."
- [42] L. Novotny and N. van Hulst, "Antennas for light", *Nature Photonics*, vol. 5, pp. 83-90, 02//print 2011.
- [43] W. S. Rabinovich, P. G. Goetz, M. Pruessner, R. Mahon, M. S. Ferraro, D. Park, E. Fleet, and M. J. DePrenger, "Free space optical communication link using a silicon photonic optical phased array", *Proc. SPIE*, vol. 9354, 93540B, 2015.
- [44] B.-W. Yoo, M. Megens, T. Sun, W. Yang, C. J. Chang-Hasnain, D. a. Horsley, and M. C. Wu, "A 32×32 optical phased array using polysilicon sub-wavelength high-contrast-grating mirrors", *Optics Express*, vol. 22, 19029, 2014.
- [45] E. J. Jumper, "Toward Adaptive Optic Mitigation of Aero-Optic Effects - Final report AFOSR Grant F49550-06-1-0160," 2009.

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