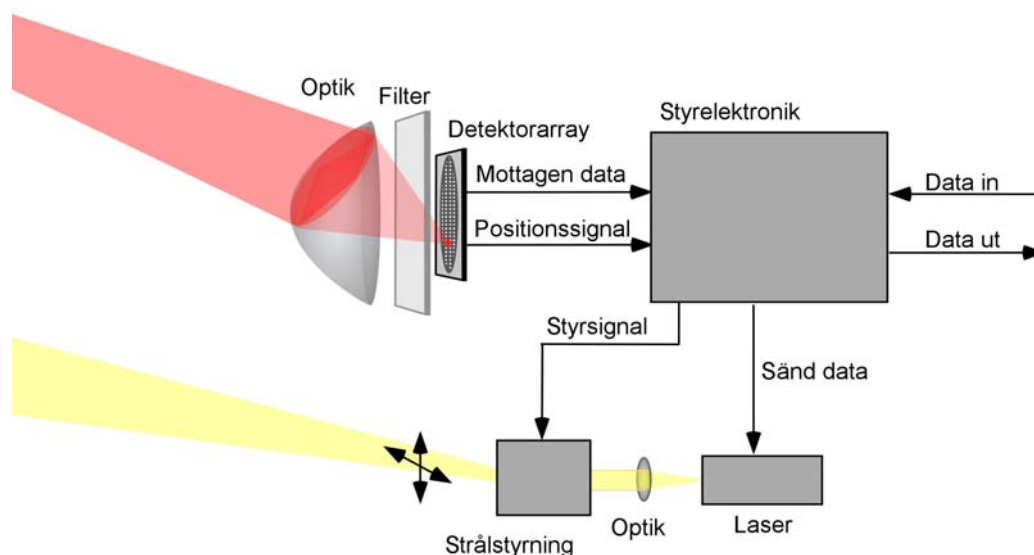


# Laserkommunikation för spridning av VMS-data inom fartygsförband

Per Sakari, Magnus Pettersson



FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1350 anställda varav ungefär 950 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, bedömningen av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.



FOI  
Totalförsvarets forskningsinstitut  
Ledningssystem  
Box 1165  
581 11 Linköping

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

[www.foi.se](http://www.foi.se)

# Laserkommunikation för spridning av VMS-data inom fartygsförband

<b>Utgivare</b> FOI - Totalförsvarets forskningsinstitut Ledningssystem Box 1165 581 11 Linköping	<b>Rapportnummer, ISRN</b> FOI-R--1718--SE	<b>Klassificering</b> Användarrapport
	<b>Forskningsområde</b> 6. Telekrig och vilseledning	
	<b>Månad, år</b> September 2005	<b>Projektnummer</b> E7067
	<b>Delområde</b> 61 Telekrigföring med EM-vapen och skydd	
	<b>Delområde 2</b>	
<b>Författare/redaktör</b> Per Sakari Magnus Pettersson	<b>Projektledare</b> Peter Johansson	
	<b>Godkänd av</b> Martin Rantzer	
	<b>Uppdragsgivare/kundbeteckning</b> FM	
	<b>Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig</b>	
<b>Rapportens titel</b> Laserkommunikation för spridning av VMS-data inom fartygsförband		
<b>Sammanfattning (högst 200 ord)</b> <p>Överföring av information mellan enheter inom fartygsförband är ett krav för ett fungerande VMS vid förbandsupprådande. Denna rapport studerar laserkommunikation, även benämnt fri optisk kommunikation, som ett alternativ till radiobaserad kommunikation. Arbetet har genomförts inom FoT-projektet VMS fartygsförband fas 2.</p> <p>Räckvidder överstigande 10 km kan uppnås, även då sikten är måttlig. Vid sämre sikt kommer dock räckvidden att reduceras. Studien visar att det ställs höga krav på följning och tracking men i gengäld kan tyst kommunikation med hög överföringshastighet (Gbps) erhållas.</p> <p>Den potentiellt höga överföringshastigheten möjliggör inte bara överföring av traditionell VMS-information, utan kan även utnyttjas för överföring av stora mängder sensornära data. Detta skapar helt nya möjligheter till distribuerade sensorer och sensorfusion vid exempelvis pejlning.</p>		
<b>Nyckelord</b> Laserkommunikation, Fri optisk kommunikation, FSO		
<b>Övriga bibliografiska uppgifter</b>	<b>Språk</b> Svenska	
<b>ISSN</b> 1650-1942	<b>Antal sidor:</b> 27 s.	
<b>Distribution enligt missiv</b>	<b>Pris:</b> Enligt prislista	

<b>Issuing organization</b> FOI – Swedish Defence Research Agency Ledningssystem Box 1165 581 11 Linköping	<b>Report number, ISRN</b> FOI-R--1718--SE	<b>Report type</b> User report
	<b>Programme Areas</b> 6. Electronic Warfare and deceptive measures	
	<b>Month year</b> September 2005	<b>Project no.</b> E7067
	<b>Subcategories</b> 61 Electronic Warfare including Electromagnetic Weapons and Protection	
	<b>Subcategories 2</b>	
<b>Author/s (editor/s)</b> Per Sakari Magnus Pettersson	<b>Project manager</b> Peter Johansson	
	<b>Approved by</b> Martin Rantzer	
	<b>Sponsoring agency</b>	
	<b>Scientifically and technically responsible</b>	
<b>Report title (In translation)</b> Free Space Optics Communication for transmission of warning and countermeasure information between ships		
<b>Abstract (not more than 200 words)</b> <p>In the development of warning and countermeasure systems for ships in military units, there is a need of information transmission. This report studies laser communication, also called Free Space Optics (FSO), as an alternative to radio based communication.</p> <p>Communication range of more than 10 km is possible, even if the visibility is moderate. At poorer visibility the range will be reduced. The study show that high precision pointing and tracking is necessary, but in return covert communication with high bit rates (Gbps) is possible.</p> <p>The potential of high bit rates does not only make traditional warning and countermeasure information transmission possible. It can also be utilized for transmission of large quantities of sensor close data. This will result in new possibilities of distributed sensors and sensor fusion, for instance in getting bearing of other ships.</p>		
<b>Keywords</b> Laser Communication, Free Space Optics, FSO		
<b>Further bibliographic information</b>	<b>Language</b> Swedish	
<b>ISSN</b> 1650-1942	<b>Pages</b> 27 p.	
	<b>Price acc. to pricelist</b>	

# Innehållsförteckning

<b>INLEDNING</b> .....	<b>5</b>
<b>LASERKOMMUNIKATION FÖR ÖKAD SAMVERKAN MELLAN OLIKA PLATTFORMAR</b> .....	<b>5</b>
VMS FÖR FARTYG .....	5
TYPFALL FÖR GRUPPERINGAR AV FARTYG .....	5
KRAV FÖR ETT LASERBASERAT KOMMUNIKATIONSNET FÖR FARTYGSFÖRBAND .....	6
NÄTUPPBYGGNAD.....	7
<b>ATMOSFÄRENS INVERKAN PÅ KOMMUNIKATIONSKANALEN</b> .....	<b>8</b>
TURBULENSVARIATIONER.....	8
TRANSMISSION I ATMOSFÄREN .....	10
<i>Nederbörd</i> .....	10
<i>Dimma</i> .....	10
ETT EXEMPEL PÅ SIKTFÖRHÅLLANDEN I MARIN MILJÖ – ÖSTERSJÖN .....	11
REFRAKTION.....	11
<b>UPPBYGGNAD AV TRANSCEIVER</b> .....	<b>12</b>
EXEMPEL PÅ TRANSCEIVERKONSTRUKTION .....	12
<i>Transceiver med fyrsignal och kvadrantdetektor</i> .....	12
<i>Transceiver med fyrsignal och s k angle tracking</i> .....	13
<i>Transceiver med fyrsignal, s k conical scan och optisk multiplexer</i> .....	14
<i>Transceiver med detektorarray och strålstyrning</i> .....	15
<i>Transceiver med detektor- och laserarray</i> .....	16
<i>Retrokommunikation</i> .....	17
KOMPONENTERNA I TRANSCEIVERN .....	19
<i>Laserkällan</i> .....	19
<i>Detektorer</i> .....	19
<i>Strålstyrning</i> .....	19
<i>Retromodulatorer</i> .....	20
<i>Adaptiv optik</i> .....	20
<i>GPS</i> .....	20
<b>FÖRVÄNTAD PRESTANDA</b> .....	<b>21</b>
SÄNDARENHET .....	21
MOTTAGARE.....	21
SCINTILLATIONER .....	22
LÄNKBUDGET .....	23
<b>SAMMANFATTNING OCH FÖRSLAG PÅ FORTSATT VERKSAMHET</b> .....	<b>25</b>
<b>REFERENSER</b> .....	<b>26</b>

## Inledning

För att skapa ett effektivt varnar- och motverkanssystem (VMS) för fartygsförband krävs goda möjligheter att kontinuerligt överföra information mellan olika enheter. Laserkommunikation kan vara ett intressant alternativ eller komplement till radiobaserad kommunikation. I rapporten studeras hur kommunikationslänkar som bygger på laserkommunikation skulle kunna konstrueras samt vilka möjligheter och begränsningar ett sådant system har. Överföring av VMS-information ges i rapporten en något vidare tolkning och innefattar till exempel även spanings- och positioneringsinformation.

## Laserkommunikation för ökad samverkan mellan olika plattformar

### VMS för fartyg

Ett fartyg kan tänkas vara utrustat med en olika varnar-, spanings- och motverkanssystem. Radarvarnare, radarsis, laservarnare, robotskottsvarnare, optikspanare och IRST är exempel på sensorer som kan utnyttjas för upptäckt av eventuella hot. På förbandsnivå finns det ett mervärde i att kunna överföra information mellan olika enheter så att sensorer på olika plattformar kan samverka för hög detektionssannolikhet och optimal motverkan.

Det finns en rad tänkbara motverkanssystem, till exempel skenmål, remsor, facklor, multispektral rök, radarstörare, DIRCM och luftvärn. Marina plattformars egenskydd är anpassat för egenskydd. Man tar endast i begränsad omfattning hänsyn till andra enheter i närområdet. För att undvika vådabekämpning, eller att motverkansinsatser motverkar varandra, krävs samordning. Med ett effektivt informationsutbyte skapas nya möjligheter till samverkan.

Vid förbandsuppträdande krävs ett kontinuerligt informationsutbyte av VMS-information mellan plattformarna. Överföring av måldata kräver ingen större bandbredd. Betydligt högre dataflöden krävs dock om varnar- och spaningssensorer skall samverka. Snabb kommunikation möjliggör också utnyttjande av distribuerade sensorer. Ett exempel kan vara eskort av fartyg där de eskorterade fartygen är lätta att upptäcka men de fartyg som eskorterar har smygegenskaper och inte vill bli upptäckta. Med en snabb och svårupptäckt kommunikationslänk kan till exempel radarbilder överföras från eskorterade fartyg till fartygen med smygegenskaper, som därmed inte själva behöver gå med aktiv radar. Laserkommunikation kan med anledning av dess möjlighet till hög bandbredd och låg röjningsrisk i ett sådant fall vara ett bättre alternativ än radio.

### Typfall för grupperingar av fartyg

Ett kommunikationsnät som bygger på fri optisk kommunikation kan utformas på många olika sätt beroende på vilka egenskaper som prioriteras. Nedan beskrivs några typfall, som utnyttjas för att generera grundförutsättningar för ett tänkt kommunikationsnät för fartygsförband.

#### **Eskort med samverkande fartyg och helikopter**

Avståndet mellan eskorterande fartyg är typiskt upp till tio kilometer och avståndet till närmaste skyddsobjekt är mindre än fem kilometer. Farten är maximalt 15 knop. Eskorten kan eventuellt stöttas av helikopter. Om så är fallet bör även dessa kunna kommunicera med fartygen via optisk länk.

Vid eskort av containerfartyg är avstånden mellan eskortfartygen vanligen mindre än fem kilometer. Containerfartygen kan dock tänkas skymma sikten så att eskortfartygen inte har fri sikt till varandra. De inbördes avstånden mellan fartygen kan i vissa fall vara relativt små vilket ställer höga krav på god samverkan mellan de olika plattformarnas VMS. Motverkansinsatser måste koordineras noggrant.

## Krav för ett laserbaserat kommunikationsnät för fartygsförband

Ett laserbaserat kommunikationsnät för fartygsförband skall ha hög tillgänglighet, vara robust och ha goda smygegenskaper. Räckvidden kommer i viss mån att vara väderberoende men bör uppgå till 10-12 kilometer. Vissa typer av länkar kan tillåtas ha kortare räckvidd men de måste i övrigt vara kompatibla med de långräckviddiga systemen.

Ett krav är att systemet utnyttjar våglängder och effektnivåer som är hanterbara med avseende på ögonsäkerhet. Dagens laserlänkar utnyttjar vanligtvis våglängder vid 800-900 nm eller 1550 nm. Vid de effektnivåer som krävs för att uppnå önskad räckvidd blir system vid 800-900 nm i praktiken ögonfarliga. Länkarna bör därför utnyttja våglängder utanför ögats känslighetsområde ( $>1400$  nm).

Överföring av traditionell VMS-information ställer inte speciellt höga krav på bandbredd, men tidsaspekten är kritisk. Tiden från varning till eventuell motverkan måste minimeras varför överföringen av information (inklusive eventuella relästationer) i nätet bör ske sekundsnabbt. Höghastighetslänkar 0,1-10 Gbit skapar helt nya möjligheter att till exempel utnyttja distribuerade varnings- och spaningsensorer.

Traditionellt används laserlänkar för överföring av data mellan två enheter. Inom ett fartygsförband kan antalet enheter vara betydligt fler vilket innebär att ett nätverk av laserlänkar måste skapas. I rapporten studeras hur ett sådant nätverk kan byggas upp med flera kommunikationsnoder.

Inriktning och etablering av kommunikationsnätverket bör i möjligaste mån ske utan aktiva stödsystem som kan röja fartygets position. Laserlänkens optiska signatur bör också minimeras. Nätverket skall fungera utan avbrott på fartyg under gång med farter upp till 40 knop (22 m/s). Länkarna bör också kunna kommunicera med fasta (stillastående) enheter på land vid kustnära operationer. Nätverket bör även kunna kompletteras med laserkommunikationslänkar mellan fartyg och flygande plattformar (t ex helikopter).

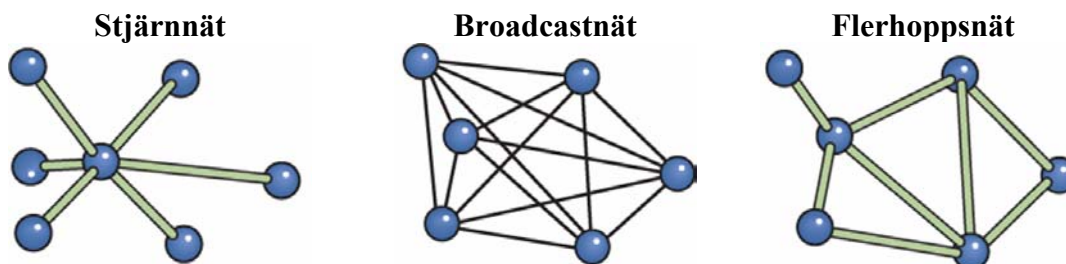
Tracking och följning underlättas om länken utrustas med variabel divergens så att laserfläckens storlek vid målet kan hållas konstant. Den uppdateringsfrekvens som krävs för tracking exklusive kompensation för strålvandring kan beräknas om laserstrålens tvärsnitt vid mottagaren och fartygens inbördes geometri och fart är kända. Ett rimligt antagande är att laserstrålens diameter är ca 1 m vid mottagaren vilket motsvarar en divergensvinkel på 1 mrad på 1 km avstånd och 0,1 mrad på 10 km avstånd.

Om en liten divergensvinkel ska användas måste systemet konstrueras för styrning och tracking med stor precision. Troligen krävs en gyroupphängd sändare/mottagare, alternativt en mycket snabb och precis strålstyrning.



## Nätupbyggnad

Ett nätverk med optiska länkar kan tänkas utnyttja flera olika nätstrukturer. Några strukturer som är tänkbara är stjärnnät, broadcastnät och flerhoppsnät [1]. Det är fullt möjligt att koppla samman nätverket med andra nätverk som baseras på laser och/eller radioteknik. Detta skulle till exempel kunna ske genom en kombination av stjärn- och flerhoppsnät.



Figur 1. Tre nätverkstyper.

Ett stjärnnät är lätt att administrera och fullt möjligt att realisera med laserlänkar. Då all kommunikation går genom en central nod blir nätverket känsligt för störningar och den centrala noden måste hela tiden ha fri sikt till samtliga noder. Viktig VMS-information är ofta av den karaktären att det i första hand berör närliggande noder. Ett stjärnnät är då inte den lämpligaste strukturen då informationen ofta är tidskritisk. Stjärnstrukturen lämpar sig dock väl om ett fartyg utnyttjas för att skydda flera andra, det vill säga motverkan sker endast från en plattform som då är den centrala noden i nätverket. Länkarna kan till och med tänkas vara enkelriktade så att information enbart skickas till den centrala noden som sammanställer informationen och själv agerar utifrån detta.

Ett broadcastnät har fördelen att informationen skickas ut alla enheter samtidigt. Dess smygegenskaper kan dock ifrågasättas då de sänder med hög effekt och breda lober. Den här typen av nät är i praktiken inte realiserbar med laserkommunikationslänkar för längre avstånd.

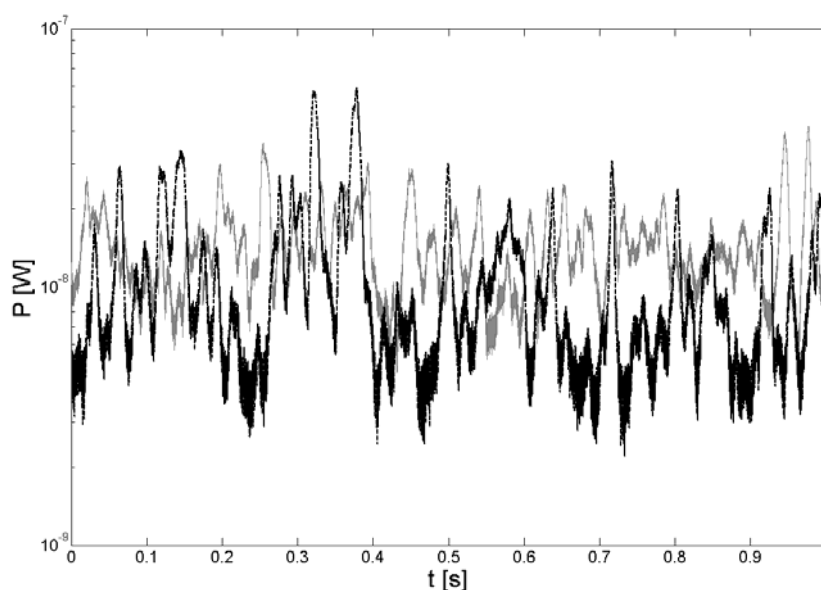
Flerhoppsnät har en mer komplex arkitektur än stjärnnät men är mindre sårbara då informationen mellan två noder kan gå flera olika vägar. Närliggande noder kan snabbt få information av varandra. Nätstrukturen lämpar sig väl för laserkommunikation, då informationen kan ta en annan väg om två noder tillfälligt tappar kontakten, t ex då två närliggande fartyg passerar på var sin sida om ett hinder. Om ett fartyg tappar kontakten med nätet fungerar det fortfarande för övriga noder.

Den bästa nätverksstrukturen för fri optisk kommunikation inom ett fartygsförband är i de flesta fall av typen flerhoppsnät. Strukturen har fördelen att den är robust och redundant. Undantagsvis kan stjärnnät vara ett alternativ.

# Atmosfärens inverkan på kommunikationskanalen

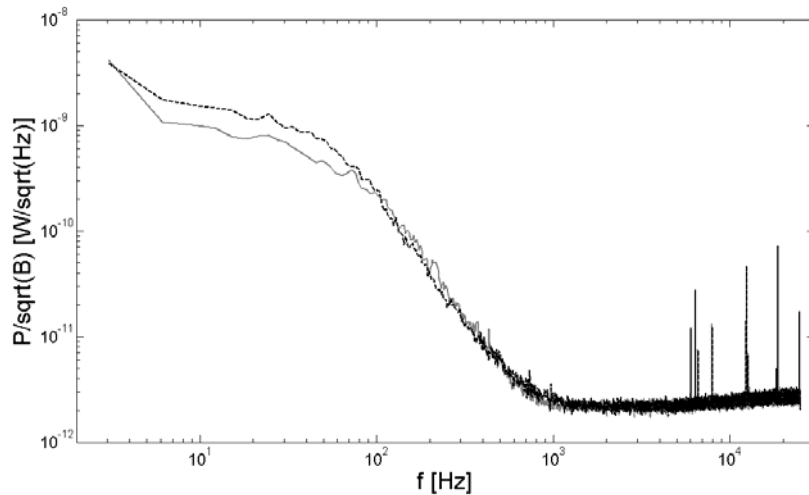
## Turbulensvariationer

När laserstrålningen får gå en längre sträcka genom atmosfären kommer den att påverkas av vind- och temperaturfluktuationer. Detta kommer att synas som strålvandring och uppbygning av laserstrålen (scintillationer). Resultatet kommer att bli variationer i den effekt som tas emot. Figur 2 visar, med ett exempel från försök som genomfördes under augusti 2005, hur effektvariationerna kan se ut. I detta fall användes en laser som riktades in mot en detektor placerad på 1,4 kilometers avstånd. Parallellt med denna laserlänk sattes en retrokommunikationslänk (typen beskrivs senare i rapporten) upp. Både enkelvägslänken och retrokommunikationslänken hade en laser med våglängd omkring  $1,5 \mu\text{m}$  och en uteffekt omkring 5 mW. Ingen kommunikationssignal var inkopplad utan lasern gav en konstant uteffekt. Mottagaraperturen var densamma för de två länkarna och den hade en diameter på 8 cm. Att den mottagna effekten är i samma storleksnivå för de två fallen beror på att retrolänkens divergens var betydligt mindre än den för enkelvägslänken (ca 1 mrad jämfört med ca 10 mrad). Figuren, som visar effektvariationerna under en period på en sekund, visar ett tydligt exempel på att turbulensvariationerna kan vara stora även på korta avstånd.



Figur 2. Mottagen effekt under en sekund. Den grå kurvan visar mottagen effekt från en laser placerad på 1,4 kilometers avstånd från mottagaren. Den svarta streckade kurvan visar mottagen effekt för en retrokommunikationslänk på samma plats och vid samma mättillfälle (augusti 2005).

Figur 3 visar ett frekvensspektra från ovanstående mättillfälle. I den kan man se att variationerna har ett huvudsakligt frekvensinnehåll under 1 kHz. Om modulatoren kan konstrueras på sådant sätt att en utsänd "nolla" motsvarar fullständig utsläckning av laserstrålningen, kan mottagaren konstrueras med en enkel tröskelnivå (ovanför brusnivån) som avgör om lasern är på (etta) eller av (nolla). De variationer som uppstår pga turbulensen har ingen betydelse för att avgöra bitinnehållet, så länge turbulensen inte orsakar sk fädning då ingen strålning når mottagaren trots att lasern är på. Om modulatoren inte klarar av att fullt släcka ut lasern vid en "nolla" kan ingen enkel tröskelnivå läggas in för att avgöra bitinnehållet, då signalen både för "ettan" och "nollan" kommer att variera med turbulensen. Kommunikationssignalen som kommer att ha frekvenser i MHz till GHz kommer dock att delvis kunna filtreras ut med (elektriskt) högpasfilter, som tar bort de lågfrekventa turbulensvariationerna. Risk för fädning kvarstår dock.



Figur 3. Frekvensspektra för de två signalerna, enkelväg (grå) och retrokommunikation (svart, streckad) på 1,4 kilometers avstånd.

Det finns flera olika sätt att minska turbulensvariationerna. Ett sätt är att ha en större mottagarapertur, vilket jämnar ut effektvariationerna. Mottagaren kan också konstrueras med flera mottagaraperturer och på detta sätt minska turbulensvariationerna [2]. På sändarsidan kan flera sändare separerade från varandra utnyttjas för att reducera turbulenseffekterna. Ytterligare en möjlighet är att sända med flera olika våglängder samtidigt. Därutöver finns möjlighet till felrättande koder och repetitiv sändning, som kan användas för att hantera turbulensinducerade fel.

Prasad m fl diskuterar turbulensvariationerna med begreppet Greenwood-frekvensen,  $f_g$ , vilken definieras som

$$f_g \approx \frac{0.4v_w}{\sqrt{\lambda R}}$$

där  $v_w$  är vindhastigheten,  $\lambda$  laservåglängden och  $R$  är avståndet. De variationer som uppstår i den mottagna effekten är relativt lågfrekventa. Om man konstruerar mottagaren med ett elektriskt högpasfilter som filtrerar bort frekvenser under Greenwoodfrekvensen kan man undertrycka mycket av turbulensvariationerna. Om en trackingfunktion införs i systemet bör komponenter som möjliggör en scanningsfrekvens som är högre än Greenwood-frekvensen användas. De mätningar som Prasad m fl genomfört visar att en scanning med hög frekvens inte orsakar några ytterligare scintillationseffekter med högre frekvensinnehåll.

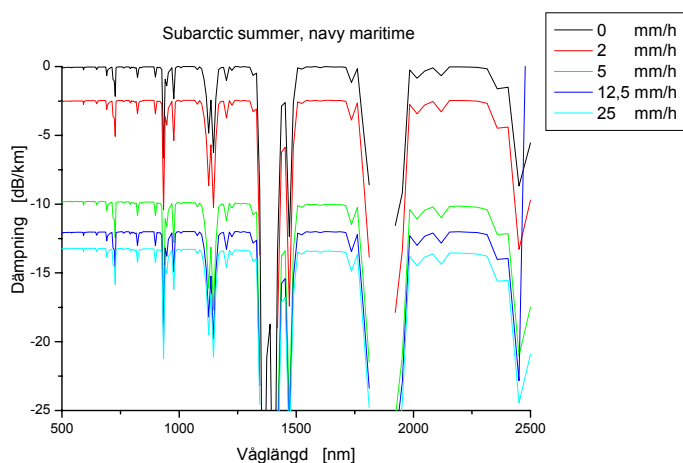
Ett annat sätt som skulle kunna minska turbulenseffekterna är att använda en liten och snabb tip-tilt-spegel och på så sätt minska de signalvariationer som uppstår p g a strålvandring. På många plattformar kan också större vibrationer finnas, där de signalvariationer som uppstår av dessa kan minimeras med tip-tilt-spegeln.

## Transmission i atmosfären

Transmissionen hos laserstrålar som propagerar i atmosfären påverkas av flera olika faktorer. Nedan beskrivs några faktorer som markant kan reducera räckvidd och tillgänglighet för fri optisk kommunikation. Transmissionen kopplas här till aktuell siktsträcka. Sikten, och därmed transmissionen, kan variera kraftigt längs den sträcka ljuset propagerar.

### Nederbörd

Regndroppar har en droppradie som varierar mellan 0,05 - 3,0 mm, vilket är betydligt större än våglängden hos lasersändaren i en laserkommunikationslänk. Detta medför att dämpningen kommer att vara i stort sett oberoende av vilken våglängd som väljs för kommunikationen. Fasta nederbördsformer som snö och hagel har en mer komplex sammansättning, som varierar mellan olika tillfällen varför det är svårare att säga något generellt om transmissionen. Figur 4 nedan visar hur transmissionen typiskt påverkas av nederbörd (regn), då sikten i övrigt är mycket god.



Nederbörd [mm/h]	Dämpning vid 1550 nm [dB/km]
0	0
2	2,5
5	10
12,5	12
25	13,4

Figur 4. Våglängdsberoendet för dämpning i atmosfären (beräknat med MODTRAN 3.7).

### Dimma

Dimma är ofta lokal och uppstår huvudsakligen på grund av temperaturvariationer. Några av de vanligaste typerna av dimma beskrivs kortfattat nedan. Dimma innebär att sikten är nedsatt till under en kilometer.

*Strålningsdimma* uppstår huvudsakligen över land under klara nätter då stora mängder värmestrålning avges från den uppvärmda markytan som kyler den marknära luften. Denna typ av dimma uppstår vanligen inte sommartid då nätterna är för korta för att generera en tillräcklig avkylning. Strålningsdimma är normalt inget problem på öppet vatten, men kan ibland driva ut över kusten där den brukar lösas upp relativt fort. Partikeldiameten är typiskt i storleksordningen 4  $\mu\text{m}$ .

*Advektionsdimma*, ibland även kallat havsdimma, bildas när varm och fuktig luft förs ut över en kall land- eller vattenyta. Den hör samman med frisk vind och till skillnad från strålningsdimman täcker den ofta stora områden och kan ligga kvar i flera dygn. Partiklarna är vanligtvis betydligt större än vid strålningsdimma (typiskt 20  $\mu\text{m}$ ).

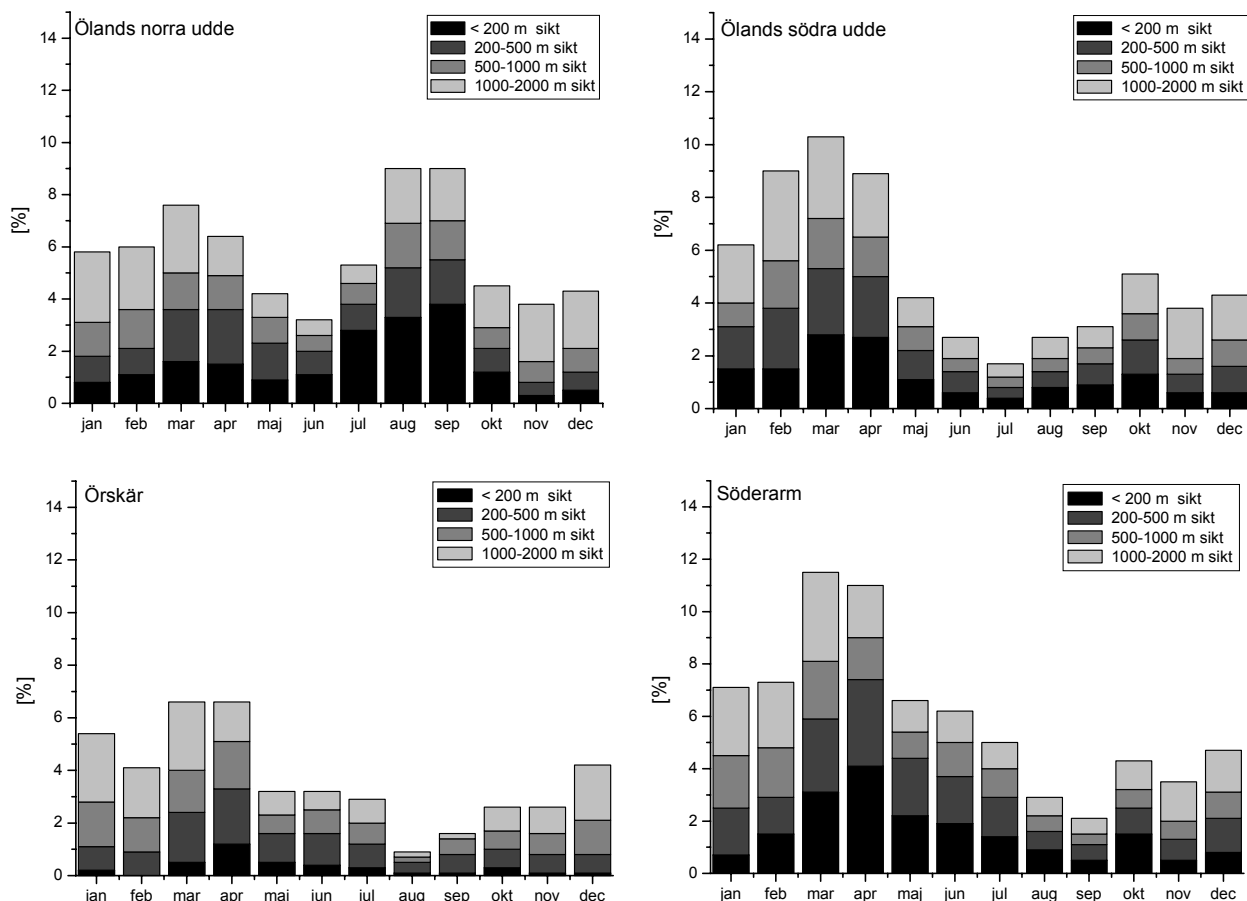
*Frontdimma* kan uppstå då fronter passerar och regn faller genom en kall luftmassa. Dimman följer med fronten och är normalt ganska kortlivad.

*Sjörök* uppstår huvudsakligen under höst och vinter då kall luft rör sig över en vattenyta med högre temperatur än luften. Avdunstningen från vattenytan mättar luften och sjörök uppstår.

Vid dimma är transmissionen låg. Transmissionen påverkas av absorption och spridning i molekyler och aerosoler. Vid dålig sikt (dimma) är spridning via aerosoler den dominerande faktorn. Aerosolerna vid strålningsdimma är relativt små i jämförelse med advektionsdimma och ett visst våglängdsberoende finns. Vid advektionsdimma (större partiklar) anses dämpningen vara i stort sätt våglängdsberoende [4].

## Ett exempel på siktförhållanden i marin miljö – Östersjön

Dimma över öppet vatten är i Östersjön vanligast under våren då solen värmer och vattentemperaturen fortfarande är låg. På hösten och vintern uppstår ibland sjörök. Figur 5 nedan visar frekvensen av sikt under 2 kilometer under perioden 1970-2000 för några utvalda platser i Östersjön; Ölands norra udde, Ölands södra udde, Örskär och Söderarm [3]. Man kan tydligt se att dimma och nedsatt sikt är en lokal företeelse, som varierar kraftigt mellan olika platser.



Figur 5. Frekvensen av sikt under 2 kilometer under perioden 1970-2000 för utvalda platser i Östersjön.

## Refraktion

Brytningsindex i atmosfären varierar huvudsakligen på grund av variationer i temperatur, tryck och luftfuktighet. Detta medför att en laserstråle som propagerar långa sträckor i atmosfären kommer att krökas. Normalt är denna inverkan liten, men för laserstrålar nära vattenytan kan effekten vara högst påtaglig. Så kallad övernormal eller undernormal utbredning kan förekomma. Den faktor som huvudsakligen påverkar detta är temperaturskillnaden mellan luft och vattenyta (ASTD, Air to Surface Temperature Difference). Detta bör beaktas vid utformning och placering av laserkommunikationslänkar på fartyg, då räckvidden annars kan bli kortare än beräknat. För att uppnå fri sikt mellan sändare och mottagare krävs ibland därför en högre placering än den som krävs för att hantera vågor och jordens krökning. Med god kännedom om aktuella utbredningsförhållanden skulle det gå att kompensera för dessa fenomen men enklast är att placera sändare och mottagare på något högre höjd. Hur stor marginal som krävs är dock, utan omfattande försök, svårt att enkelt svara på.

## Uppbyggnad av transceiver

I uppbyggnaden av ett system för laserkommunikation mellan fartyg kommer det att ställas höga krav på konstruktionen hos kommunikationsnoderna. Systemet ska ha hög bandbredd, smala laserlober och möjlighet ska eventuellt finnas för kommunikation med flera enheter samtidigt, samtidigt som systemet ska klara av fartygens rörelser. I detta kapitel beskrivs några exempel på hur en transceiver med sändare och mottagare (d v s en kommunikationsnod) skulle kunna byggas upp. Här behandlas dock enbart den fysiska delen för själva överföringen, och därmed inget om protokoll för dataöverföring och nätuppbyggnad.

Tranceivern, dvs sändar- och mottagarenheten, innehåller laser, en eller flera detektorer samt någon typ av optik för att forma utgående stråle och fokusera inkommande lasereffekt på detektorn. Därtill krävs någon form av inriktning och tracking för att skapa en pålitlig kommunikationslänk mellan de fartyg som ska kommunicera. Någon typ av riktningsgivande detektor behövs för att styra utgående laserstråla mot den andra enheten. I ett inledande skede, där länken eller nätverket ska etableras, krävs också någon form av information och styrning för en grovlinjering.

### Exempel på transceiverkonstruktion

#### **Transceiver med fyrsignal och kvadrantdetektor**

En tänkbar variant av transceiver bygger på teknik där linjeringen mellan fartygen sköts med tracking med hjälp av en fyrsignal på respektive enhet. Enheterna linjerar in sändare och mottagare mot fyrsignalen med hjälp av en kvadrantdetektor. Figur 6 visar ett exempel på hur transceivern skulle kunna byggas.

En sådan variant av transceiver har föreslagits av M Gangl m fl [5]. Den forskargruppen undersöker möjligheten till laserkommunikation för flygplan, och de har förhoppningar om laserkommunikation med överföringshastigheter i Gbps på avstånd upp till 100 kilometer. Det koncept de tänker sig bygger på teknik med en fyrsignal som insignal till tracking med hjälp av en gimbal-spegel. Inledningsvis tänker de sig att få ut koordinaterna för den enhet man vill kommunicera med via GPS-data, som t ex kan sändas över via radiolänk. Att använda GPS-data behöver dock inte vara nödvändigt. Man kan tänka sig att andra system där man inledningsvis utnyttjar elektro-optiska sikten för manuell invisning.

En optisk fyrsignal, med relativt stor divergens från en laser med hög uteffekt och våglängd något skiljd från kommunikationslasern används. Fyrsignalen riktas utifrån t ex GPS-data mot den andra enheten. Mottagningen av fyrsignalen är samensad med strålen för datakommunikationen och använder samma apertur. Den utgående fyrsignalen behöver dock inte vara samensad med teleskopet för dataöverföring, eftersom divergensen är stor. Kvadrantdetektorn ger signal till en gimbal som styr linjering mot den andra enheten. Antingen byggs hela transceivern på en motorstyrd inriktningsmekanik (gimbal), alternativt används en utkopplingspegel monterad på inriktningsmekaniken. Därtill kan en mindre spegel läggas till systemet för att motverka de småskaliga variationerna som uppstår, t ex av vibrationer från plattformen och strålvandring orsakad av atmosfären. Denna miniatyrspiegel verkar inom synfältet för mottagarteleskopet och ska klara av att hantera riktningvariationer i mikroradian-storlek. När de två enheterna har låst sig mot varandra kan stråldivergensen minskas för att möjliggöra ett bättre signal-till-brusförhållande.

Gangle m fl tror inte att adaptiv optik är nödvändig för att minimera turbulensvariationer utan tror att man kan förlita sig på en stor ingångsapertur för mottagaren. Mottagaren för kommunikationsdata kan vara fiberkopplad, där fibern bör vara av multimod-typ. Multimodfiber är fördelaktig jämfört med singelmodfiber eftersom den har större kärndiameter, vilket möjliggör ett större synfält. Fördelen med fiberkoppling är att mottagardetektorn kan byggas in nära övrig kommunikationsutrustning, då elektrisk

överföring i kabel med Gbps-niåver inte är möjlig på längre avstånd. Det kan också finnas fördelar med att minimera det som finns utanpå plattformen. Både laser och detektor kan med fördel placeras på lämpligare plats, med tanke på exempelvis temperatur- och storlekskrav.

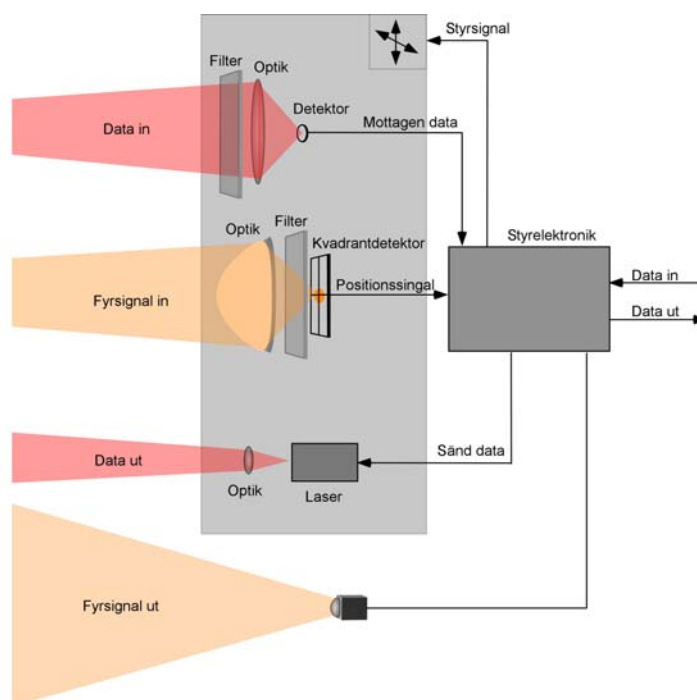
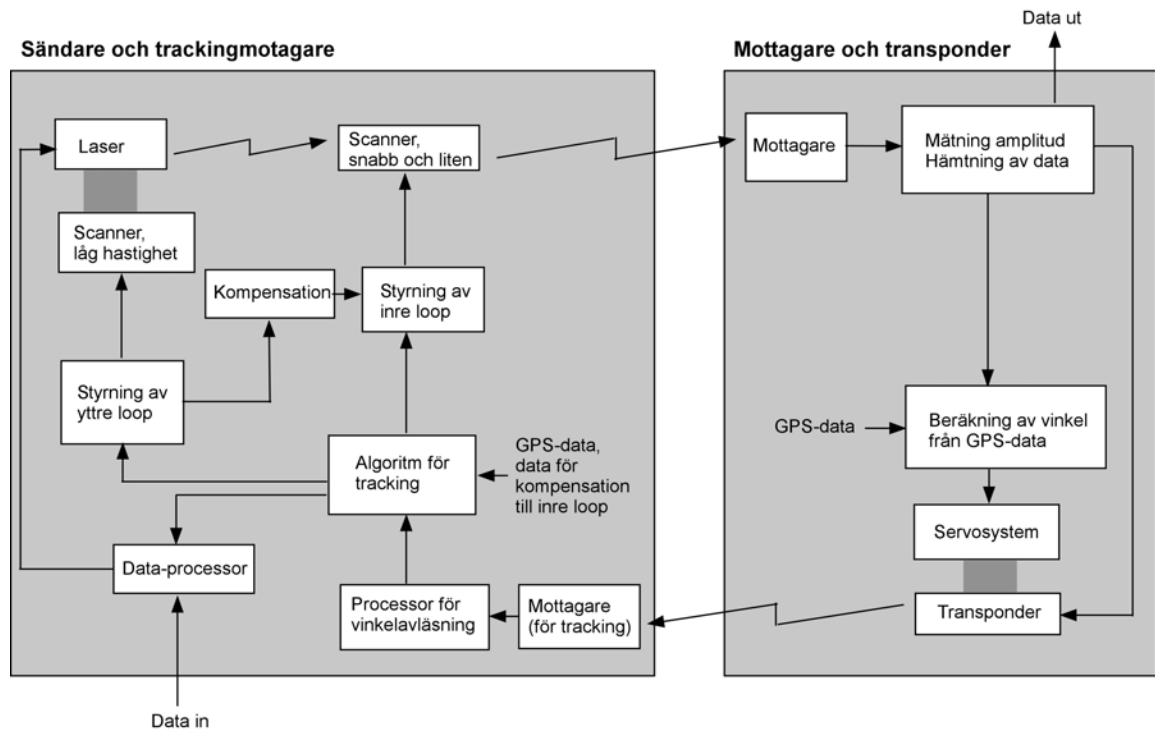


Fig 6. Transceiver med fyrsignal och kvadrantdetektor.

### Transceiver med fyrsignal och sk angle tracking

N S Prasad m fl [6] har föreslagit en teknik för inriktning och tracking som de kallar ”angle tracking” och ”scan angle modulation”. Deras arbete går ut på att undersöka hur data ska kunna skickas optiskt mellan fordon, främst bilar, på avstånd mellan 1 och 5 kilometer. De beskriver ett styrsystem med en optisk transponder som skickar ut en fyrsignal (sk beacon) avsedd för sändaren att styra in emot. Både sändaren och mottagaren är kopplad till en GPS för att ge ytterligare information för trackingen. Positionen i form av GPS-data hos sändaren skickas tillsammans med det kommunikationsdata som ska sändas över och positionen läses sedan av i mottagarenheten. Mottagaren grovlinjeras då mot sändaren med hjälp av det positionsdata som den får från sändaren. Mottagaroptiken för tracking-funktionen är sammansatt med sändaroptiken. Transpondern består av en laser och optik, där fyrsignalen sänds ut i en lob som är minst tio gånger större än strålen med kommunikationsdata. En schematisk bild över transceivern visas i figur 7.

Tracking-funktionen åstadkoms genom svepande med en kompakt och snabb scanner. Sändaren skickar ut en stråle med scanning över ett större område. När strålningen når detektorn hos mottagaren genereras en sinusformad signal motsvarande scanning-frekvensen. Amplituden hos sinussignalen beror på avståndet från centrum av scanningsmönstret. Genom att mäta upp amplitud och fas kan beräkning ske av vinkeln och avståndet till detektorn från centrum av strålen. Denna information sänds tillbaka till sändarenheten med hjälp av transpondern som har en låg bandbredd och hög effekt, tillsammans med GPS-data för mottagarenheten. Riktningselet rättas till med scannern och closed-loop tracking skapas. Trackingen fortsätter för att kompensera för plattformarnas rörelser. Hur bra scanningen blir beror på faktorer som modulationsfrekvens på scanningen och ”track loop”-frekvensen.

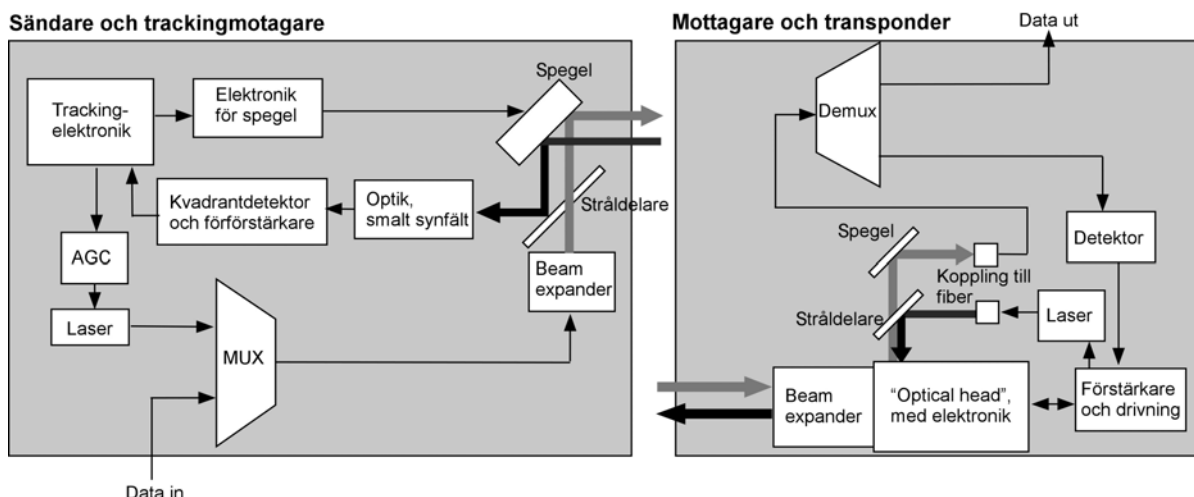


Figur 7. Kommunikation med fyrsignal och angle tracking.

### Transeiver med fyrsignal, s k conical scan och optisk multiplexer

B M Jost m fl [7] har kommit med ett förslag på transeiverdesign som liknar den ovan beskrivna. Figur 8 visar transeivers uppbyggnad. Sändarenheten innehåller en snabb spegel för strålstyrning, trackingelektronik och en optisk multiplexer. Trackingen sker mot en fyrsignal som hamnar defokuserad på en kvadrantdetektor (quad cell position error sensor), vilket styr spegeln för att alltid hålla fyrlasern centrerad vid detektorn. Spegeln styr då samtidigt utgående laser mot mottagaren. Från kvadrantdetektorn läses också information från fyrsignalen som är modulerad på liknande sätt som beskrivits tidigare, här kallat "conical scan". Fyrsignalen kopplas till en AGC och en laser för att skapa sådan modulering på utgående fyrsignal. Signalen mixas med kommunikationssignalen i en multiplexer för att sedan sändas över som reglersignal till mottagaren.

Mottagaren består av ett teleskop, styrelektronik, optisk demultiplexer, detektor och kommunikationselektronik. Styrelektroniken genererar en "conical scan"-fyrsignal med en våglängd skild från kommunikationssignalens. Fyrsignalen skickas ut med teleskopet, vilket även används för mottagning av kommunikationssignalen kombinerad med styrsignalen från sändarsidan. Denna signal kopplas in i fiber och vidare till demultiplexern. Från demultiplexern tas dels skickad data ut och dels den styrsignal som skickats från sändaren för att maximera fyrsignalens effekt.



Figur 8. Kommunikation med fyrsignal, s k conical scan och optisk multiplexer.



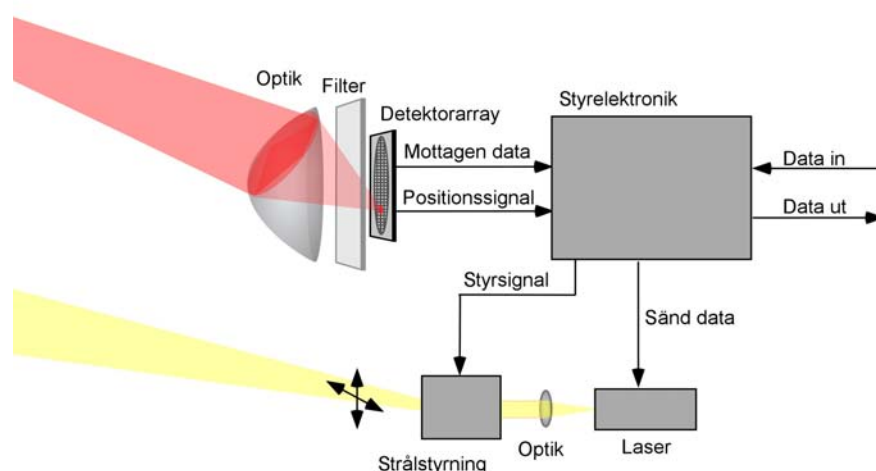
Den trackingmetod de föreslår kallar de ”optical conical scan”. Strålen sveps i ett cirkulärt mönster runt objektet med mottagaren. För att hitta mottagaren sveps en modulerad signal i en cirkel med ökande radie. Ett svar genereras när mottagaren träffas av svepet, och signalen vid detektorn blir då modulerad beroende på svepförfarandet. Signalen högpasfilteras för att ta bort turbulensvariationer och AGC används för att kompensera för variationer i styrka hos signalen. Bandbredden i denna loop är inte bara begränsad nedåt för turbulensvariationerna utan också uppåt för att vara mindre än ”conical scan”-frekvensen.

Om lasern är centrerad runt mottagaren blir resultatet att ingen modulering syns på firsignalen. Amplituden och fasen för moduleringen är proportionell mot felet för position i strålen och riktningen. Vinkelavvikelsen kan tas fram för att rikta om strålen mot centrum av objektet. B M Jost m fl menar att ”conical scan”-tekniken fungerar bra för att reglera för objektets rörelser och dessutom för scintillationseffekter. Tekniken fungerar bra i sådana system där bred dynamik krävs, vilket innebär att tekniken klarar att hantera omväxlande svaga och starka signaler, något som kommer att uppstå som en följd av turbulensen i atmosfären.

Till detta påpekar gruppen att det i inledningsskedet där övriga enheter ska hittas, krävs någon form av ytterligare information för ”grovlinjeringen”. Detta kan innebära att en GPS och en primär mottagare med brett synfält används i inledningen för att sedan gå över till ett smalare synfält. Det är också viktigt att tänka på vad som händer när plötslig fädning uppstår, t ex från något hinder, och hur detta ska hanteras. Man kan också fundera över möjligheten att skapa varierbar bandbredd beroende på t ex väder och avstånd.

### Transceiver med detektorarray och strålstyrning

Ett ytterligare förslag på lösning för att bygga upp laserkommunikation mellan plattformar i rörelse har beskrivits av L Zhou m fl [8]. Den teknik de beskriver skiljer sig tydligt från de tekniker som beskrivits ovan. Gruppen arbetar bland annat med att undersöka möjligheten till kommunikation mellan UAV:er. Transceivern består som tidigare av en sändar- och en mottagardel. En skiss på transceivern visas i figur 9. Mottagardelen, som kan vara fast monterad, består av vidvinkeloptik och en detektorarray. Optiken fokuserar ner inkommande laserstrålning mot en eller flera pixlar i detektorarrayen. Framför detektorarrayen finns ett optiskt filter, som filtrerar bort bakgrundsljus. Eftersom mottagaren är avsedd för ett brett synfält måste även filtret vara av sådan typ att det inte är riktningskänsligt. Beroende på inkommande vinkel för lasern fokuseras strålningen ner på någon eller några pixlar i detektorarrayen. Detektionen ger dels de data som skickats och dels den position som den sändande enheten har. Positionssignalen ger kontinuerligt en styrsignal för att styra sändande laser i rätt riktning.



Figur 9. Transceiver med detektorarray och strålstyrning.

Antalet pixlar i arrayen bestämmer upplösningen för vinkeln till inkommande laser. Den vinkel som arrayen detekterar ges som indata till en tvådimensionell scanner av något slag, som kan styra laserstrålen i den riktning som detektorn registrerat. Ett flertal fast monterade transceivrar skulle kunna användas för att uppnå en större vinkeltäckning runt den kommunicerande enheten. Detektorarrayen möjliggör också detektion av data från flera enheter samtidigt. Därmed skulle tillägg av extra enheter av sändardelen (laser, optik och strålstyrning) kunna möjliggöra dubbelriktad kommunikation med flera enheter samtidigt. Till detta skulle en avancerad elektronik krävas för att klara av att aktivera den eller de element i detektorarrayen som ska vara aktiva, samt att hålla isär så att kommunikation sker med rätt enhet i de fall där kommunikation sker med flera enheter samtidigt. Upplösningen för detektorn ställer krav på vilken divergens som är lämplig för utgående laser. Divergensen på utsänd laser måste vara ungefär lika stor som det synfält mottagaren har, vilket beror av upplösningen på detektorarrayen och optiken.

Innan kommunikationen inleds måste först en länketablering ske, d v s själva upplinjeringen av transceivrarna mot varandra. Om flera enheter ingår byggs också nätverket upp. Lasern måste initialt, med ett lämpligt sökförfarande, söka av ett större område för att därmed belysa de mottagare som finns inom sökområdet. Under denna sökning sänds en bitsekvens ut för att ”väcka” mottagarenheterna. När mottagarenheten detekterar bitsekvensen avläses vilken riktning inkommande laser har och ger signal till sändarenheten att skicka ut en svarssekvens i samma riktning. Därefter startar kommunikationen. Tiden för länketableringen beror dels på den tid som krävs för att sända över bitsekvensen i respektive riktning och dels på vilken hastighet som är möjlig för scannern.

När sedan länken/nätverket är etablerat kan sökförfarandet avslutas. Det kan dock uppstå avbrott i kommunikationen av någon anledning, t ex att något skymmer sikten mellan enheterna. I sådant fall kan möjligtvis informationen ta en annan väg genom nätverket eller så startas ett nytt sökförfarande för att hitta någon enhet i närheten.

Om flera enheter ska ingå i nätverket kan det byggas upp genom att samtliga enheter genomför ett sökförfarande och därmed upprättar kommunikation med de övriga enheter som finns inom räckviddsområdet. Alla enheter behöver kanske inte ha en direktlänk till alla övriga enheter, utan kommunikationen kan länkas vidare i nätverket.

### **Transceiver med detektor- och laserarray**

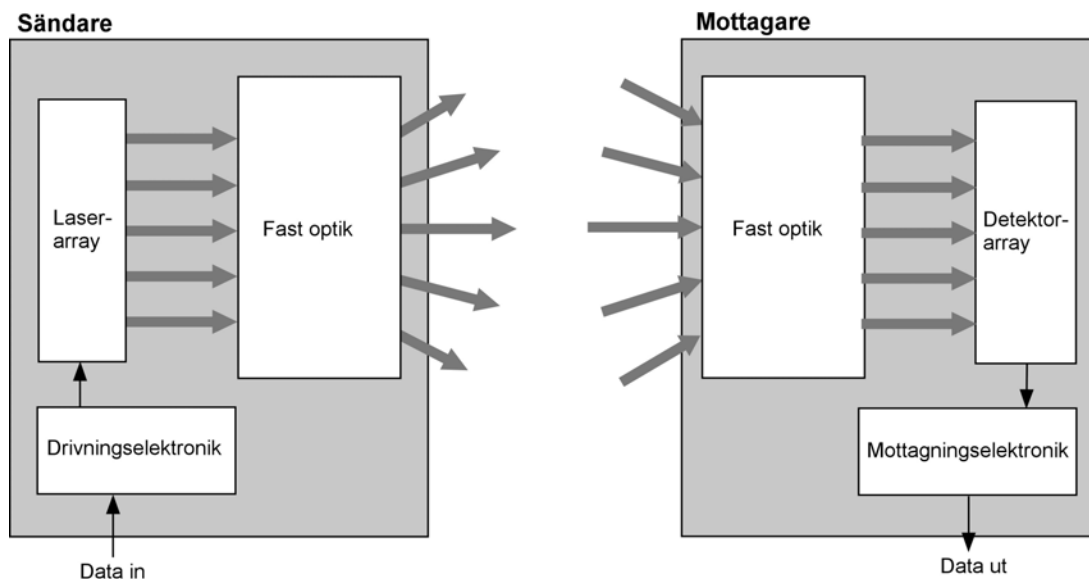
Vid University of Sheffield i Storbritannien [9] har D O'Brien m fl arbetat med en annan idé om hur transceivern ska se ut. Tanken de har är att man kan använda en array för vardera sändaren (flera lasrar) och mottagarsidan (flera detektorer). De idéer gruppen har härstammar från deras tidigare arbete med laserkommunikation för användning på korta avstånd inomhus.

Som mottagare används en tvådimensionell detektorarray med tätt packade sexkantiga detektorelement. En stor area medför en högre kapacitans och därmed en lägre bandbredd. Att detektorn ändå är så stor som möjligt är viktigt för att maximera synfält och mottagen effekt. Varje detektorelement har en separat förstärkare och signalen ska kopplas vidare till ytterligare förstärkare samt klock- och datainsamlingselektronik. När inkommande laser fokuseras ner på detektorarrayen och sedan vandrar över den måste det finnas en funktion som växlar mellan det eller de detektorelement som ska vara aktiva och kanske också att kunna summera mottagen effekt från omkringliggande element. Framför detektorarrayen krävs någon slags optik. Optiken kan vara av enkel typ, t ex en singlettlins, eller mer avancerad, helt beroende på tillämpning och prestandakrav.

Som sändare tänker sig gruppen en tvådimensionell array med halvledarlasrar eller lysdioder. Varje sändarelement i arrayen representerar en riktning. Detta möjliggör en begränsad utsänd effekt och potential för att skicka olika data till olika enheter inom täckningsområdet.

Att på detta sätt använda sig av en array både för sändning och mottagning, innebär att man inte tänkt sig några rörliga speglar eller annan styrning för småskaliga förändringar i vinklar mellan de enheter som ska

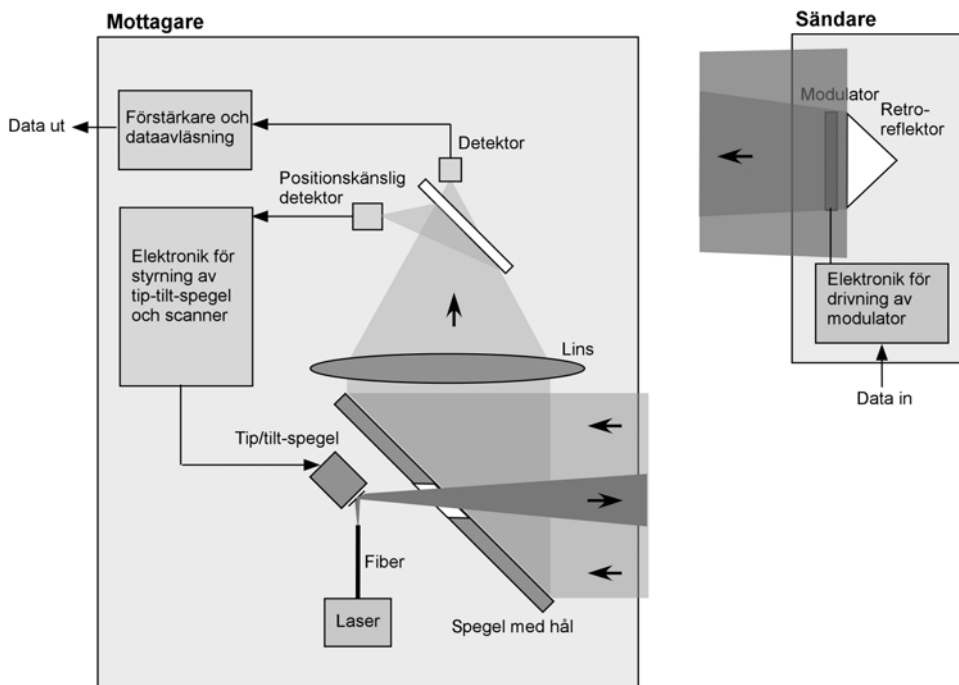
kommunicera. Möjligheten finns till flera fasta enheter av denna typ, alternativt en inriktningsmekanik för att grovlinjera transceivern med de två arrayerna i.



Figur 10. Kommunikation med laser- och detektorarray.

### Retrokommunikation

Retrokommunikation skiljer sig klart från tidigare beskrivna tekniker, eftersom länken är av asymmetrisk typ. Länken har till skillnad från tidigare bara en laserkälla, placerad i länkens ena ände. I andra änden finns en retromodulator som modulerar inkommande stråle och reflekterar tillbaka den i samma riktning, mot lasersändaren. Figur 11 visar ett av många exempel på hur en kommunikationslänk med retroteknik kan byggas.



Figur 11. Retrokommunikation.

Principen är att laserstrålen sänds ut mot en retromodulator med hjälp av lämplig optik. De komponenter som krävs i retromodulatorens är dels en modulator som lägger på informationen på strålen, och dels en retroreflektor för reflektion i motsatt riktning, samt elektronik för dataöverföringen. Den stråle som

reflekterats tillbaka mot lasern fokuseras med lämplig optik på detektorn för kommunikationssignalen och detektorn för tracking-funktionen.

Den vanligaste typen av retroreflektor är kubhörnsreflektorn, som med hjälp av vinkelräta speglar reflekterar tillbaka strålningen. En annan typ av retroreflektor, kallad "cat's eye", fungerar genom reflektion i en modulator som ligger i fokalplanet hos någon typ av vidvinkeloptik. I fokalplanet kan också en array med modulater placeras, vilket möjliggör snabbare modulering och bredare synfält. Retromodulatore kan konstrueras med ett brett synfält, begränsat av antingen modulatore eller retroreflektore. För retromodulatore behövs ingen särskild inriktningsmekanik, något som däremot är nödvändigt i den andra änden.

Modulatore kan antingen vara transmissiv eller reflektiv. I den transmissiva sker modulering i två steg, på vägen in och på vägen ut. Modulatore kan alternativt vara reflektiv och då modulera i samband med att strålningen reflekteras mot dess yta. En reflektiv modulator kan dock ha nackdelen att synfältet blir mindre. Alternativa konstruktioner är därtill tänkbara, exempelvis att modulatore byggs in i retroreflektore och utgör en eller flera av dess sidor. Modulatore lägger på data antingen genom att påverka intensiteten eller polarisationen, kallat amplitud- respektive polarisationsmodulering. Flera olika typer av modulater är möjliga, t ex av vätskekristall- eller kvantbrunnsteknik. Vätskekristallmodulater styr strålningens polarisationstillstånd. Sådana är relativt enkla och billiga, men har i dagsläget en begränsad bandbredd till i storleksordningen 100 kbps. Modulater som däremot bygger på kvantbrunnsteknik kan ge modulationshastigheter upp emot Gbps-nivåer.

Laserstrålningen returneras efter modulation och reflektion i riktning mot laserkällan. Strålningen samlas in med hjälp av någon typ av optik, eventuellt samma som lasern kopplades ut genom, och länkas därefter av mot en eller flera detektorer. Information kan också sändas åt andra hållet, mot retromodulatore, genom att utgående laser moduleras. Retromodulatore-sidan kompletteras då med en detektor som läser av informationen.

Retrokommunikation passar i tillämpningar där en av enheterna som ska kommunicera är i behov av en förenklad transceiver. Det kan t ex vara av stabilitets-, storleks- eller kostnadsskäl. Generellt kan man säga att man med ett retrokommunikationssystem inte kan uppnå lika lång räckvidd som ett system med laser i båda ändar. Den lasereffekt som mottagaren detekterar avtar med avståndet upphöjt till fyra för retrokommunikation, jämfört med ett kvadratisk avtagande för system med två lasrar. Eftersom laserstrålningen får gå dubbelt så lång sträcka genom atmosfären är också väderpåverkan större, dvs dämpningen och turbulenseffekterna.

FOI har sedan flera år tillbaka studerat retrokommunikation, se referenserna [10] och [11]. Modulater med kvantbrunns- och vätskekristallteknik har studerats, både praktiskt och teoretiskt.

## Komponenterna i transceivern

### Laserkällan

Lasrar med våglängder omkring 1,5  $\mu\text{m}$  är lämpliga inte bara eftersom de är ögonsäkra upp till höga effektnivåer utan också för dess goda transmission i atmosfären. I dagsläget kan tillgänglighet och pris vara bättre för våglängder omkring 850 nm. Våglängder däromkring har också god transmission i atmosfären, men har nackdelar i ögonsäkerheten samt att mörkerkikare och andra sensorer lättare detekterar dessa våglängder. Utvecklingen av komponenter avsedda för 1,5  $\mu\text{m}$  är stor och drivs på av marknaden för fiberoptisk kommunikation.

Ett alternativ är att t ex utnyttja transmissionsfönstret vid 2,2  $\mu\text{m}$ . Fördelen med detta är t ex att bakgrundsstrålningen är lägre än vid 1,5  $\mu\text{m}$ . Desutom undviks konflikter med t ex laseravståndsmätare som arbetar vid 1,5  $\mu\text{m}$ . Kommunikation vid 2,2  $\mu\text{m}$  riskerar inte heller att detekteras/upptäckas av dagens laservarnarsystem. Laserkällor och detektorer är dock inte lika väl utvecklade som vid 1,5  $\mu\text{m}$ .

Om inte stråldivergensen kan hållas liten pga en begränsad precision i tracking-funktionen krävs en laser med mycket hög effekt. Sådana lasrar med hög effekt är annars inte att föredra av kostnads- och storleksskäl. Små diodlasrar kan idag uppnå uteffekter på hundratals mW vilket kan räcka till i vissa tillämpningar. Möjligheten finns också till användning av fiberförstärkare, s k EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier), som kan förstärka milliwatt-lasrar upp till effektnivåer omkring tiotals Watt, i våglängdsband omkring 1,5  $\mu\text{m}$ .

Då lasrar är spektralt smala innebär detta en stor känslighet för atmosfärens turbulens. Detta resulterar i variationer i den mottagna effekten och variationer i position på inkommande fokus, vilket eventuellt kan orsaka en fädning av signalen. Alternativet att använda sig av lysdioder istället skulle kunna minska turbulenseffekterna, eftersom lysdioder är bredare spektralt. Nackdelen med lysdioder är dess idag relativt låga uteffekt och att divergensen blir större än med laserdioder.

### Detektorer

Kvadrantdetektorer och positionskänsliga detektorer är idag mycket väl utvecklade och finns kommersiellt tillgängligt på många håll. Detektorarrayer speciellt anpassade för laserkommunikation finns dock inte kommersiellt tillgängligt ännu. Vid University of Sheffield har man kommit en bit på vägen när det gäller utvecklingen av detektorarrayer för denna tillämpning [9]. De har utvecklat arrayer med hexagonala fotodioder av PIN-typ (InGaAs/InP) med tillhörande förstärkare anpassade för våglängder omkring 1,5  $\mu\text{m}$ . De har visat upp en sådan detektorarray med sju kanaler och detektorelement som är 500  $\mu\text{m}$  stora. Storleken på vardera detektor har betydelse för kapacitansen och därmed bandbredden. Varje detektor har en kapacitans på 5,2 pF, bandbredd på 217 MHz, en responsivitet på 0,39 A/W och en känslighet på -29 dBm. De har också utvecklat en mottagare för dataöverföring i 1 Gbps. Vidare har de demonstrerat mottagarelektronik som kan ta emot information från tre olika detektorer samtidigt för att på lämpligt sätt kombinera inkommande signal.

### Strålstyrning

En intressant teknik som kan komma att användas för laserkommunikation i framtiden är s k icke-mekanisk strålstyrning. Istället för t ex rörliga speglar som styr strålen används vätskekristaller för att på optisk väg styra strålen genom påverkan på fasen hos strålen. Goda förutsättningar finns för att bygga lätta, kompakta strålstyrningsenheter med låg effektförbrukning. Dessa strålstyrningsenheter kallas optical phased arrays (OPA) eller spatiella ljusmodulatorer (spatial light modulators, SLM). Genom att lägga en spänning över ljusmodulatorn kan fasen hos optiska vågor varieras. Ett linjärt fasskift från en pixelerad ljusmodulator, påfört över inkommande stråles tvärsnitt styr strålen.

Tre kommersiellt tillgängliga SLM:er, fyllda med nematisk flytande kristall, har undersökts grundligt på FOI [12]. Dessa SLM:er har använts för att studera möjligheter och begränsningar med tekniken. Idag finns SLM:er tillverkade för våglängder omkring 1,5  $\mu\text{m}$ , som klarar att styra strålen i mer än  $\pm 3^\circ$  [13].

En SLM, som tillverkas av Boulder Nonlinear Systems (BNS), är uppbyggd av 12288 pixlar och har en apertur på 19 x 19 mm.

Framtidens SLM:er kan komma att ha tillräcklig prestanda för att kunna användas i laserkommunikationstillämpningar, t ex när det gäller snabbhet, aperturstorlek och strålkvalitet. Detta åtminstone för att kompensera för småskaliga men snabba fluktuationer uppkomna av plattformsvibrationer och turbulens i atmosfären.

### **Retromodulatorer**

Utvecklingen av retrokommunikation pågår på flera håll, både på system- och komponentnivå. På FOI har retrokommunikation huvudsakligen studerats inom Försvarets fotonikprojekt, ett projekt för kommunikation med undervattensfarkoster samt ett projekt för kommunikation för strid i bebyggelse. Verksamheten har under de senaste åren innefattat analyser av kvantbrunnsmodulatorer framtagna av Acreo. Dessa modulatorer är av reflektiv typ och avsedda för våglängder omkring 850 nm. Överföring vid 16 Mbps har visats i labmiljö. Retrokommunikation med vätskekristallmodulatorer har tillsammans med icke-mekanisk strålstyrning demonstrerats i labmiljö. Överföring av bilder har visats under samtidigt strålstyrning med SLM:er [10] [14]. Verksamhet pågår nu bland annat med långdistansmätningar av turbulenspåverkan, en demonstration av retrokommunikation i bebyggelse, samt för kommunikation till boj på vattenytan.

Vid Naval Research Laboratory (NRL), USA, har W S Rabinovich m fl utvecklat modulatorer för retrokommunikation sedan 1998. På senare tid har de visat pixelerade modulatorer som är avsedda att användas med sk ”cat’s eye”-optik. Dataöverföring i 36 Mbps har rapporterats. Kontrastförhållanden på 2,6 har visats vid våglängder omkring 1530 nm. Praktiska försök har genomförts över en sträcka på 2 km i marin miljö, där de överfört video och ljud, samt gjort mätningar på turbulensinverkan [15] [16].

Vid University of New Mexico har T M Shay m fl arbetat med retrokommunikation under de senaste åren. De har rapporterat retromodulatorer med möjlighet till överföring i 2,5 Gbps med våglängder omkring 1,5  $\mu\text{m}$ . Systemet är fiberkopplat, vilket möjliggör användning av EDFA och andra fiberkopplade produkter på marknaden. De har också föreslagit retrokommunikation med full-duplex (kommunikation i båda riktningar samtidigt) trots att endast en laser används. Modulationen i ena riktningen måste då vara ”osynlig” för mottagaren för andra riktningen och de har därför föreslagit ett antal par av dataformat som kan användas. Konceptet har demonstrerats i labmiljö [17].

### **Adaptiv optik**

Turbulensen i atmosfären ger som tidigare diskuterats en distorderad vågfront, som skapar effektvariationer i mottagaren. Adaptiv optik är en metod som går ut på att fastställa hur vågfronten distorderats och sedan med hjälp av en deformierbar spegel kontinuerligt kompensera för distorsionen. Detta är ett område som idag studeras på många håll, bland annat på FOI [18]. Denna typ av teknik kan komma att implementeras i kommande laserkommunikationssystem.

### **GPS**

På något sätt kommer en grovriktning att krävas i en inledande fas. Ett sätt att få reda på var övriga fartyg finns är att använda sig av GPS för att ange sin position. En bakomliggande radiolänk kan då finnas, där information om positionen hos de olika fartygen kan skickas runt. Fartyg har även möjlighet att riktigsbestämna andra enheter med passiva EO-sikten, optiskt eller med mållägen i ledningssystemet.

## Förväntad prestanda

Centrala frågeställningar för kommunikationslänkar är tillgänglighet, robusthet och överföringshastighet. Detta kapitel försöker ge en bild av förväntad prestanda hos laserkommunikationslänkar i marin miljö.

### Sändarenhet

Sändarenheten antas sända vid 1,5  $\mu\text{m}$ . För att uppnå långa räckvidder krävs att laserstrålens divergens är liten. En möjlighet är att utnyttja en variabel divergens som kan varieras beroende på geometri. De tidigare beskrivna typfallen visar att kommunikationslänken skall kunna kommunicera på 10 km avstånd, men den måste också fungera på korta avstånd (typiskt 100 m). För att minimera spridningsförluster bör divergensen vara i storleksordningen 0,1 mrad vid kommunikation på långa avstånd (1 m stråldiameter på 10 km). För att erhålla samma tvärsnittsarea på 100 m avstånd krävs en divergens på 10 mrad. Laserns medeleffekt antas vara 1 W alternativt 10 W i exemplen för räckviddsberäkningar nedan.

### Mottagare

Om länken antas sända med en våglängd utanför ögats känslighet ( $>1,4 \mu\text{m}$ ) krävs detektorer av InGaAs alternativt germanium. Då hög bandbredd krävs är vanligtvis InGaAs att föredra. Detektorer med InGaAs är normalt känsliga upp till ca 1,7  $\mu\text{m}$ . Genom att öka andelen InAs kan våglängdstäckningen utökas upp till ca 2,6  $\mu\text{m}$ . Den ekvivalenta bruseffekten (NEP) för en InGaAs-fotodiod med liten area (0,1 mm diameter) kan understiga 0,02 pW/ $\sqrt{\text{Hz}}$ . Med en diameter på 0,5-1 mm uppgår NEP typiskt 0,1 pW/ $\sqrt{\text{Hz}}$  (data hämtade ur datablad från Hamamatsu).

Lavinfotodioder (APD:er) är enkelt uttryckt fotodioder med intern förstärkning. Den av ljuset genererade detektorströmmen är typiskt 10-100 gånger högre än från motsvarande fotodiod och den ekvivalenta bruseffekten är under gynsamma förhållanden fullt jämförbar med vanliga fotodioder. Den interna förstärkningen innebär att förstärkningen i efterföljande förstärkare kan minskas och därmed minskar också förstärkarbruset. Genom att kyla detektorn kan det termiska bruset i detektorn reduceras ytterligare. Detektorns bruseffekt ( $P_{\text{brus}}$ ) ökar med bandbredden vilket genererar ett sämre signal-till-brusförhållande då bandbredden ökar.

$$P_{\text{brus}} = NEP_{\text{det}} \sqrt{B_{\text{det}}}$$

Utöver detta brus genereras hagelbrus i detektorn på grund av bakgrundsstrålning. Den av bakgrunden genererade brusströmmen kan skrivas som:

$$I_b = SL\lambda_{bw}A_{\text{det}}\tau$$

Där  $S$  är detektorns responsivitet,  $L$  är bakgrundens irradians,  $\lambda_{bw}$  detektorns optiska bandbredd,  $A_{\text{det}}$  detektorns area och  $\tau$  är mottagaroptikens transmission. Bakgrundsnivån för direkt solinstrålning varierar givetvis, men ett rimligt antagande för direkt solsken kan vara ca 250 W/m<sup>2</sup> $\mu\text{m}$  [19] för våglängder omkring 1,5 $\mu\text{m}$ . Med en lins framför detektorn erhålls följande uttryck för brusströmmen vid direkt solbelysning:

$$I_b = \frac{SL\lambda_{bw}A_{\text{det}}A_m\tau}{F^2\pi}$$

$A_m$  är mottagaroptikens area och  $F$  optikens brännvid. En beräkning med typiska data enligt nedan ger en uppfattning om brusströmmens storlek. Vid höga bandbredder krävs en mindre detektorarea än i exemplet vilket kan påverka beräkningarna något. Ett annat sätt är att utnyttja en pixelerad array för att åstadkomma samma detektorarea. Brusströmmen ger upphov till hagelbrus i detektorn enligt:

$$I_h = \sqrt{2qI_b}, \text{ dvs } I_h = \sqrt{\frac{2qSL\lambda_{bw}A_{det}A_m\tau}{F^2\pi}}$$

$S$	0,9 A/W
$L$	250 W/m <sup>2</sup> μm
$\lambda_{bw}$	3 nm
$A_{det}$	3,1 mm <sup>2</sup>
$A_m$	780 mm <sup>2</sup>
$F$	100 mm
$\tau$	0,5
$q$	1,602*10 <sup>-19</sup>

Tabell 1. Typiska data för mottagare och bakgrundsljus.

Med ovanstående erhålls ett hagelbrus motsvarande 10<sup>-13</sup> W/√Hz. Bruset från bakgrunden är således i samma storleksordning som detektorns interna brus. Om dessa antas lika stora och oberoende av varandra erhålls ett detektorbrus på typiskt 1,4\*10<sup>-13</sup> W/√Hz (kvadratisk addition).

Hög bandbredd medför ökat brus i mottagaren och därmed ett sämre signal-till-brusförhållande (SNR). Om en detektorbrusbegränsad mottagare åstadkoms, det vill säga bruset från detektorn är högre än förstärkarbruset så erhålls följande brusnivåer för några olika överföringshastigheter.

100 kbps	1Mbps	10Mbps	100 Mbps	1Gbps
0,14 nW	0,44 nW	1,4 nW	4,4 nW	14 nW

Tabell 2. Detektorbrusets beroende av bandbredd.

Bruseffekten anger ett SNR lika med ett. Beroende på hur länken konstrueras krävs en viss marginal för att erhålla en låg bitfelssannolikhet. Vanligast är att utnyttja on-off keying (OOK) för att modulera lasern, även om andra modulationstekniker mycket väl kan användas. Med OOK avgör mottagaren genom enkel tröskling om mottagen bit är en etta eller nolla. Bruset i mottagaren brukar antas vara normalfördelat vid beräkning av förväntad bitfelssannolikhet. Sådana beräkningar visar att en bitfelssannolikhet (Bit Error Rate, BER) på ca 10<sup>-6</sup> uppnås vid ett SNR på 10 dB, då signalen är okodad. Med felrättande koder kan samma BER erhållas med ca 1-3 dB lägre SNR [20]. Med ett SNR på 10 dB erhålls en maximalt användbar känslighet hos mottagaren enligt nedan, uttryckt i dBm (definierat som 10log(P\*10<sup>3</sup>)).

100 kbps	1Mbps	10Mbps	100 Mbps	1Gbps
-59 dBm	-54dBm	-49 dBm	-44dBm	-39 dBm

Tabell 3. Känslighet hos detektor för olika bandbredd, för BER på 10<sup>-6</sup>.

## Scintillationer

Prestandan för ett laserkommunikationssystem kan komma att begränsas av scintillationerna och strålvandringen. I länkbudgeten kan atmosfärs effekterna i form av dämpning, scintillationer och strålvandring ses som en gemensam term. Den marginal som avsätts för att klara av atmosfärs effekterna ska vara tillräcklig dels för tillfällena med dålig sikt (hög dämpning), men också för tillfällena då turbulensen är hög. De tillfällena då turbulensen är som störst, dvs under soliga dagar, är transmissionen hög och hela marginalen kan användas för effektvariationer i mottagaren. Å andra sidan, då sikten är låg är turbulensvariationerna mycket små och marginalen finns då för atmosfärsdämpningen istället. Det finns ingen allmänt vedertagen ekvation för att beräkna hur stor marginal som krävs för att inte fädning ska uppstå som följd av scintillationer och strålvandring. Den marginal som krävs beror av faktorer som divergens, våglängd och mottagarapertur. Generellt kan man säga att den marginal som krävs för att klara dimma och nederbörd kommer att vara så stor, att de fall då turbulensen är som störst kommer att klaras av inom denna marginal. Det kan dock finnas undantag, speciellt då mottagaraperturen är liten. Tekniska lösningar som adaptiv optik och strålstyrning kan utnyttjas för att reducera dessa effekter.



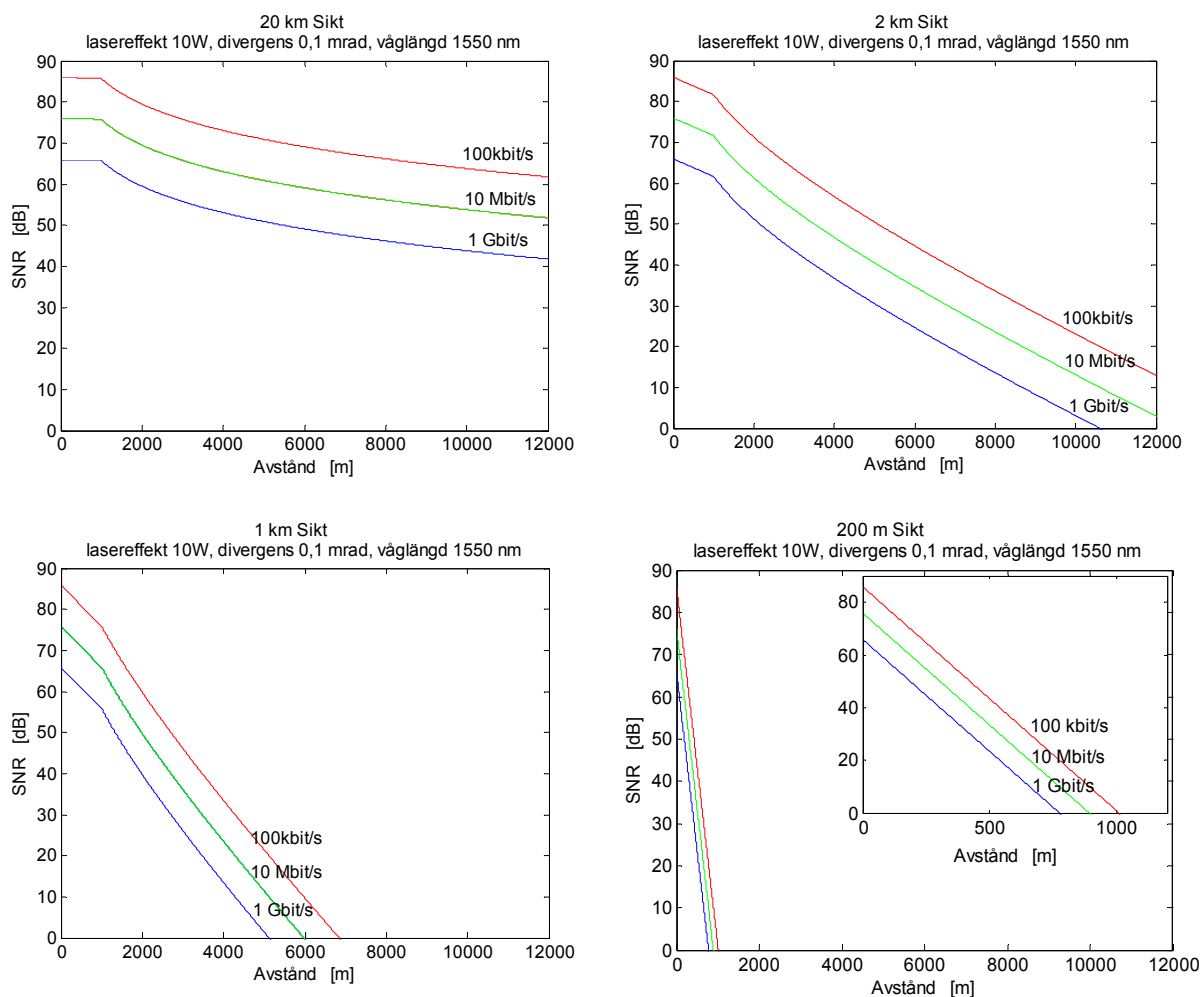
## Länkbudget

För att ge en uppfattning om hur lång räckvidd som skulle kunna uppnås har några beräkningar genomförts. Följande parametrar har antagits.

Faktor	Värde	Kommentar
Lasereffekt	10 W (40 dBm)	Relativt hög uteffekt (EDFA)
Divergens	0,1 mrad (0,006°) 1mrad (0,06°)	Extremt liten divergens Liten divergens
Våglängd	1,55 μm	Ögonsäker våglängd, bra transmission
Överföringshastighet	100kbit/s 10Mbit/s 1Gbit/s	Beroende på tillämpning. Avgör detektorbrus.
Känslighet för mottagare	-59 dBm -49 dBm -39 dBm	100 kbps 10 Mbps 1 Gbps
Scintillationer	-10 dB	Antagen marginal, kan dock variera mycket.
Pekfel	-3 dB	Antar att mottagaren finns inom halva stråldiametern.
Siktsträcka	200 m 1 km 2 km 20 km	Dimma Dis Måttlig sikt God sikt

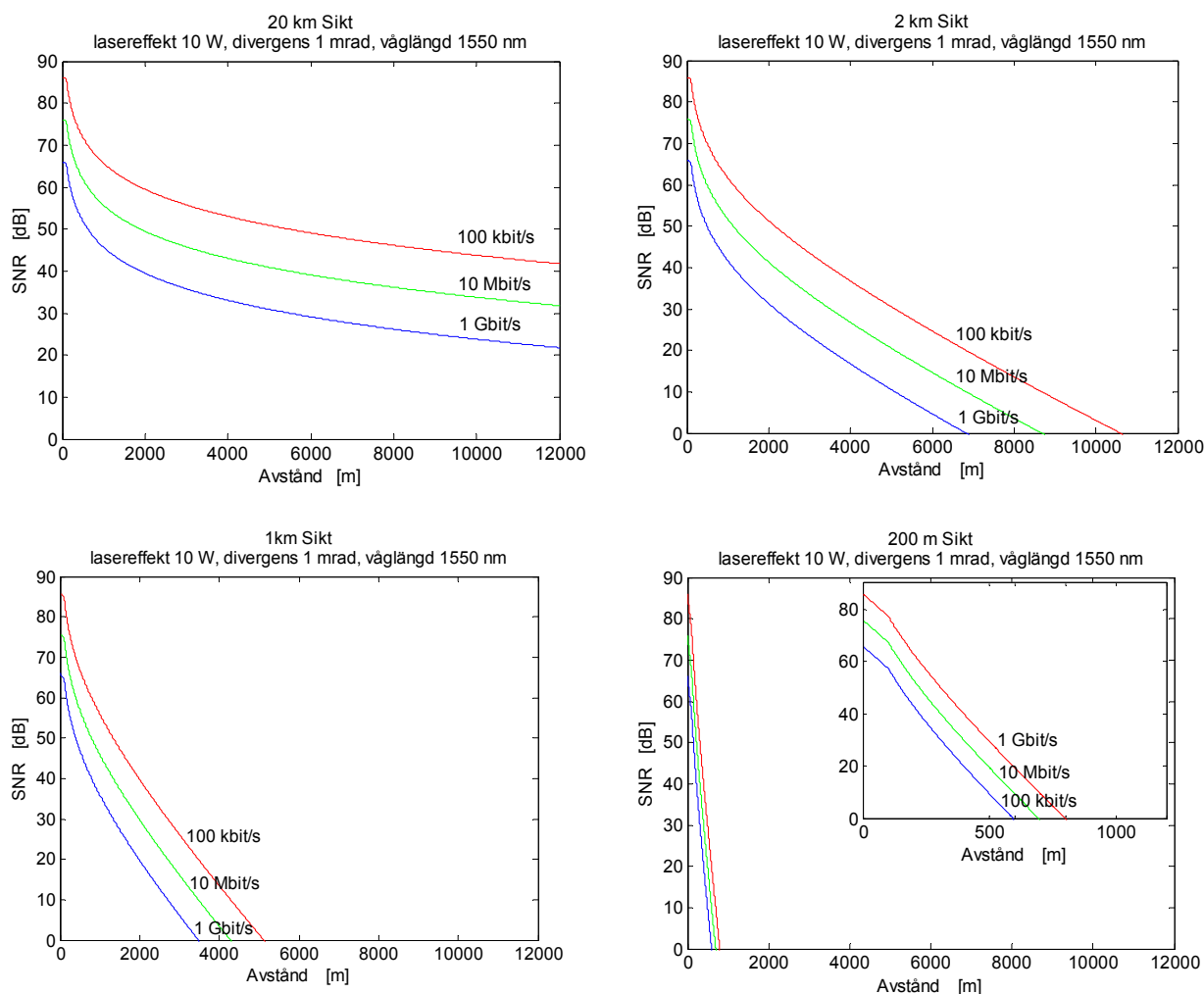
Tabell 4. Antagna parametrar för räckviddsberäkningar.

I graferna nedan visas resultat av beräkningarna. Figur 12 visar en långräckviddig länk med hög lasereffekt och liten divergens, vilket ställer stora krav på tracking och invisning.



Figur 12. Fyra exempel med olika siktförhållanden. Hög uteffekt och liten divergens.

Figur 13 visar räckviddsberäkningar för laserlänk med större divergens än tidigare, vilket innebär lägre krav på inriktning och tracking. I övrigt är inga parametrar ändrade.



Figur 13. Fyra exempel med olika siktförhållanden. Större divergens än tidigare.

I figurerna 12 och 13 kan man se att en räckvidd på 12 km är möjlig att uppnå under goda väderbetingelser. Vid sämre sikt (2 km) krävs en länk med mycket liten divergens för att uppnå 12 km räckvidd och vid en kilometers sikt reduceras räckvidden till några få kilometer.

En laserlänk för fartyg bör ha variabel divergens så att laserstrålens spridningsförluster kan minimeras på långa avstånd. På korta avstånd kan divergensen ökas för att minska kraven på tracking och fölning. För överföring av enklare VMS-data kan 100 kbps vara fullt tillräckligt. Överföringshastigheter på Gbps skapar dock nya möjligheter till samverkan mellan sensorer och plattformar. Laserlänken kan tänkas ha någon form av variabel bandbredd så att stora mängder data kan skickas då transmissionen är god. Vid sämre transmission sänks datahastigheten till förmån för ökad räckvidd och lägre felsannolikhet.

## Sammanfattning och förslag på fortsatt verksamhet

Laserkommunikation lämpar sig väl för kommunikation mellan fartyg då fri siktsträcka ofta kan uppnås. Kraftförsörjning och krav på utrymme bör inte vara något problem. För att uppnå acceptabel räckvidd krävs dock avancerade system med noggrann tracking och följning. Vid förbandsuppträdande ställs höga krav på snabb inriktning alternativt en kraftig laser som kan sända i flera smala lober samtidigt för kommunikation med flera enheter. Länken bör ha möjlighet att sända med variabel hastighet så att överföringshastigheten kan anpassas till rådande väderförhållanden och överföringskrav. En radiolänk bör finnas som backup för kritisk information vid avbrott. Nya komponenter kommer att medföra att länkar kommer att kunna byggas med allt bättre prestanda och till ett lägre pris. De komponenter som krävs för att åstadkomma länkar mellan rörliga plattformar och med räckvidder på tiotals kilometer finns tillgängliga redan idag. Transceivern kan byggas upp på många olika sätt och vilket sätt som är optimalt behöver studeras djupare, både teoretiskt och praktiskt. För att täcka in horisonten runt måste kanske flera transceivrar användas. Då fartygen rör sig kommer det också att behövas en funktion för övergången från en transceiver till en annan. Sådana funktioner behöver studeras, liksom frågor gällande nätverksuppbyggnaden.

De smygegenskaper som erhålls i kombination med den potentiellt höga bandbredden skapar helt nya möjligheter och tillämpningar. Hur exempelvis den höga bandbredden kan utnyttjas för effektiv sensorsamverkan och samordning inom förbandet bör studeras vidare på ett övergripande plan.

För att demonstrera tekniken och bygga upp kunskap på systemnivå skulle det vara önskvärt att realisera en länk med lång räckvidd och strålstyrning. Strålstyrning skulle i ett inledande skede kunna bestå av en tip-tilt-spegel av den typ som för närvarande undersöks på FOI. Effekter av fädning, turbulens och dämpning skulle då kunna studeras genom mätningar och jämföras med teori. I ett senare skede skulle länken kunna monteras på fartyg.

## Referenser

- [1] FOI orienterar om Telekrig, ISBN 91-7056-121-4, 2005
- [2] N S Prasad m fl, "Free-Space Optical Communication Link Performance Enhancement via Input Beam Conditioning and Modified Receiver Geometric Characteristics", SPIE 48th Annual Meeting, San Diego, 2003.
- [3] Försvarsmaktens vädercentral (FM VädC), Studiesektionen, Met Peter Sang, sept 2004.
- [4] Al Naboulsi, Sizun, Fournel, "Fog attenuation prediction for optical and infrared waves", Optical engineering, Vol 43 No. 2, Februari 2004.
- [5] M Gangl m fl, "Airborne Laser Communication terminal for intelligence, surveillance and reconnaissance", Free-Space Laser Communications IV, SPIE Vol 5550, 2004.
- [6] N S Prasad m fl, "Angle Discrimination based Pointing and Tracking for Free-Space Communication Links", Free Space Laser Communications IV, SPIE Vol 5550, 2004.
- [7] B M Jost m fl, "Stationary High-Bandwidth Beacon-Tracking Lasercom Experiments and the Evolution Toward a Mobile Lasercom Capability", Free-Space Laser Communications IV, SPIE Vol 5550, 2004.
- [8] L Zhou m fl, "*Two-Axis Scanning Mirror for Free-Space Optical Communication between UAVs*", IEEE/LEOS Optical MEMS 2003, USA, 2003.
- [9] D O'Brien m fl, "Advanced Receivers for Free-Space Optical Communications", Proceedings of SPIE Vol 5614, 2004.
- [10] L Sjöqvist m fl, "Retrokommunikation – slutrapport", FOI-R--1220--SE, 2004.
- [11] P Sakari m fl, "Retrokommunikation i stadsmiljö", FOI-R--1466--SE, 2004.
- [12] E Hällstig, "Nematic Liquid Crystal Spatial Light Modulators for Laser Beam Steering", ISBN 91-554-6110-7, 2004.
- [13] J Stockley, S. Serati, "Advances in Liquid Crystal Beam Steering", SPIE, Vol. 5550, 2004.
- [14] E Hällstig m fl, "Retrocommunication utilizing electroabsorption modulators and non-mechanical beam steering", Optical Engineering, 2004.
- [15] G C Gilbreath, W S Rabinowich, "Research in Free Space optical Data Transfer at the US Naval Research Laboratory", SPIE Vol 5160, 2004.
- [16] W S Rabinowich m fl, "Performance of Cat's Eye Modulating Retro-Reflectors for Free-Space Optical Communication", SPIE Vol 5550, 2004.
- [17] T M Shay, R Kumar, "2.5-Gbps Amplified Retro-Modulator for Free-Space Optical Communications", SPIE Vol 5550, 2004.
- [18] L Sjökvst m fl, "Activities in adaptive optics – Characterisation of components", FOI-R--1500--SE, 2004.

- [19] The Infrared & Electro-optical Systems Handbook, vol 1 “Sources of Radiation”, SPIE Press, ISBN 0-8194-1072-1, 1996].
- [20] “Digital Communications 6 – Signals, Noise, and error rates”, Heriot-Watt University Edinburgh, (<http://www.ece.eps.hw.ac.uk/Modules/B33c12/CI-6-03.pdf>), 2001.