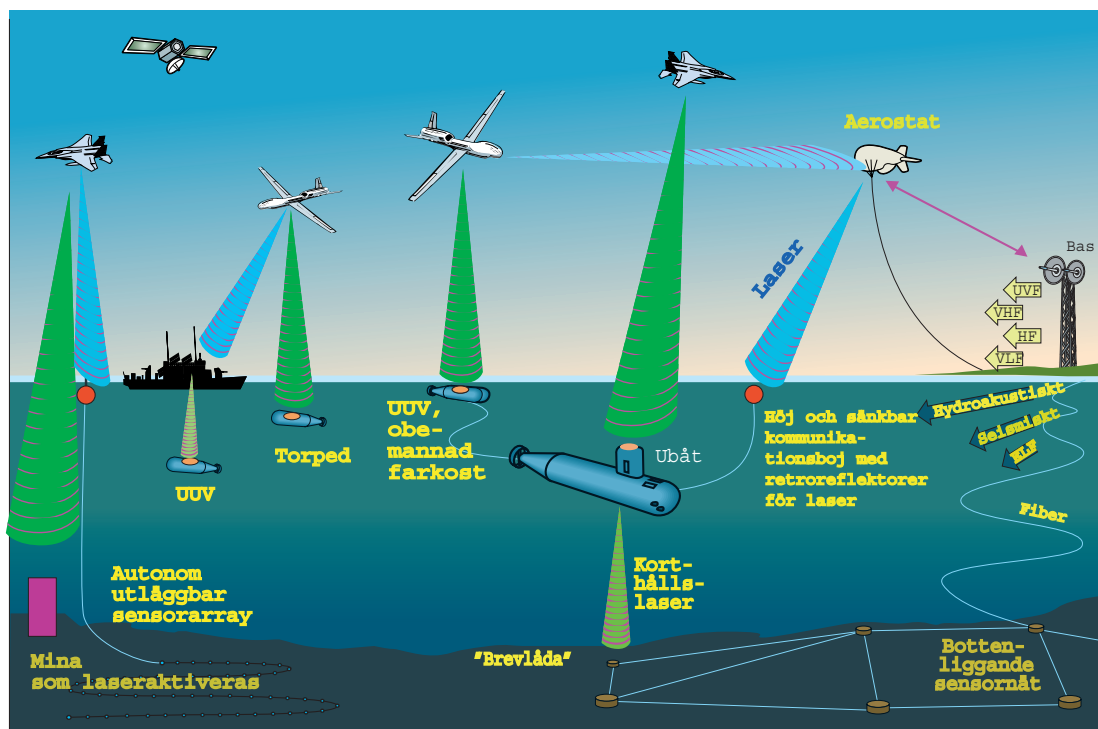


Lars Sjöqvist, Fredrik Kullander, Mikael Lindgren och
Ove Steinvall

Optisk kommunikation i undervattenstillämpningar



Totalförsvarets Forskningsinstitut, FOI
Avdelningen för Sensorteknik
Box 1165
SE-581 11 Linköping

FOI-R--0111--SE
Mars, 2001
ISSN 1650-1942

Användarrapport

Lars Sjöqvist, Fredrik Kullander, Mikael Lindgren och
Ove Steinvall

Optisk kommunikation i undervattenstillämpningar

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut, FOI Avdelningen för Sensorteknik Box 1165 SE-581 11 Linköping	Rapportnummer, ISRN FOI-R--0111--SE	Klassificering Användarrapport
	Forskningsområde 4. Spaning och ledning	
	Månad, år Mars, 2001	Projektnummer E6033
	Verksamhetsgren 5. Uppdragsfinansierad verksamhet	
	Delområde 43 Undervattenssensorer	
Författare/redaktör Lars Sjöqvist, Fredrik Kullander, Mikael Lindgren och Ove Steinvall	Projektledare Erland Sangfeldt	
	Godkänd av Svante Ödman	
	Teknisk och/eller vetenskapligt ansvarig Lars Sjöqvist	
Rapportens titel Optisk kommunikation i undervattenstillämpningar		
Sammanfattning (högst 200 ord) <p>En mycket viktig del i framtida ubåtssystem är förmågan att kommunicera snabbt och med hög överföringshastighet. En annan viktig egenskap är att kommunikationen sker säkert så att ubåten inte avslöjar sin position. Obemannade undervattensfarkoster (UUV:er) kan få en stor betydelse eftersom en UUV kan användas för framskjuten spaning. Här är det viktigt att information från den obemannade undervattensfarkostens sensorer kan överföras till ubåten och vidare till ledningssystemet. Genom att använda fri optisk kommunikation baserad på laserteknik och fiberoptisk kommunikation erbjuds nya möjligheter att överföra information.</p> <p>Syftet med den här rapporten är att beskriva undervattenstillämpningar för optisk kommunikation med laserteknik. Olika koncept för kommunikation, med tyngdpunkt mot retrokommunikation, diskuteras. Prestandaberäkningar för viktiga funktioner och en beskrivning av tekniska möjligheter presenteras. Rapporten innehåller förslag till experimentell verksamhet för att studera och utvärdera retrokommunikation ovan och under vattenytan.</p>		
Nyckelord Optisk kommunikation, undervattenstillämpning, retroreflex, modulator		
Övriga bibliografiska uppgifter		Språk Svenska
ISSN 1650-1942	Antal sidor 40	
Distribution enligt missiv		

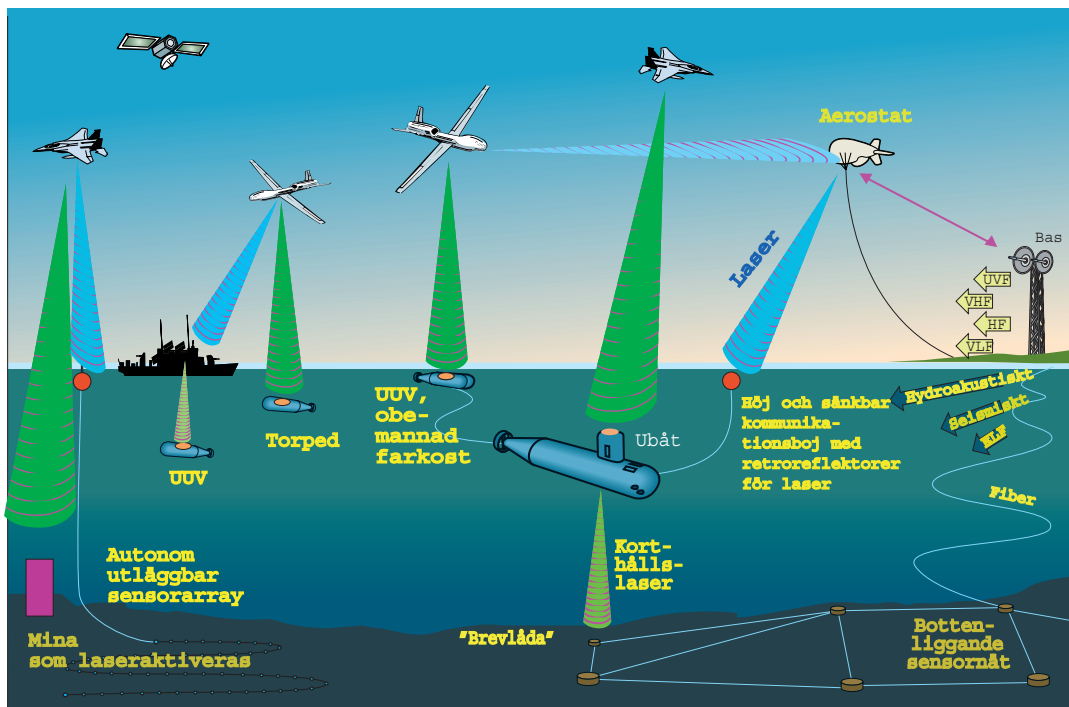
Issuing organization Swedish Defence Research Agency, FOI Division of Sensor Technology P.O. Box 1165 SE-581 11 Linköping	Report number, ISRN FOI-R--0111--SE	Report type User report
	Research area code 4. C4ISR	
	Month, Year March, 2001	Project no. E6033
	Customers code 5. Contracted research	
	Sub area code 43 Underwater surveillance sensors	
Authors/s (editor/s) Lars Sjöqvist, Fredrik Kullander, Mikael Lindgren och Ove Steinvall	Project manager Erland Sangfeldt	
	Approved by Svante Ödman	
	Scientifically and technically responsible Lars Sjöqvist	
Report title (In translation) Optical Communication in Underwater Applications		
Abstract (not more than 200 words) <p>An important capability of a future submarine system is the ability to communicate rapidly utilising high data transfer rates. The communication should be secure enough to prevent the revealing of the position of the submarine. Unmanned underwater vehicles (UUV's) may become important since the UUV can be used for advanced surveillance. Information from the UUV's sensors needs to be transferred to the submarine and the control and command system. Free-space optical communication based on laser and fiber optics technology offers new exciting possibilities to transfer information in submarine applications.</p> <p>This report describes underwater applications using optical communication and laser technology. Different concepts for communication, focusing on retrocommunication, are discussed. Performance calculations covering important functions and technical possibilities are presented.</p>		
Keywords Optical communication, underwater applications, retroreflex, modulator		
Further bibliographic information		Language Swedish
ISSN 1650-1942	Pages 40	

Innehållsförteckning

1	Inledning	5
2	Översikt	6
2.1	Kommunikation från luften till boj eller mast	6
2.2	Kommunikation från luften direkt till ubåt	8
2.3	Kommunikation under vatten	8
2.4	Princip för retrokommunikation	9
2.5	Fiberoptisk hydrofonteknik och fiberoptiska nätverk	11
3	Kritiska funktioner	13
3.1	Länketablering	13
3.1.1	Mottagare eller retroreflektor under ytan	16
3.2	Räckvidd	19
3.2.1	Atmosfärs effekter	19
3.2.2	Hela optiska länken över ytan	20
3.2.3	Mottagare eller retroreflektor under ytan	21
3.2.4	Hela optiska länken under ytan	23
3.3	Maximalt överförbar bandbredd	24
4	Tekniköversikt	24
4.1	Modulatorer	24
4.1.1	Vätskekristaller	24
4.1.2	Kvantbrunnar	26
4.1.3	Övriga modulatorer	27
4.2	Avancerade koncept för undervattenskommunikation	28
4.3	Lasrar	28
4.3.1	Ultravioletta laserkällor	30
4.3.2	Blågrön laser för undervattenskommunikation	30
4.3.3	"Ögonsäker" laserteknik vid 1.55 mm	31
4.3.4	Lasrar i våglängdsområdet 2 till 5 mm	31
4.3.5	Detektorer	31
4.4	Retromottagare	32
5	Diskussion	35
6	Förslag till Verksamhet år 2001	36
6.1	Experimentell verksamhet	36
6.1.1	Utvärdering av retrokommunikationslänk baserad på vätskekristallteknik	36
6.1.2	Vätskekristallmodulatorer under vattenytan	36
6.1.3	Vätskekristallmodulatorer - nya koncept	37
6.2	Teoretiska modeller	37
6.3	Samverkan med demonstratorförslag inom LedSysT	37
7	Referenser	39

1 INLEDNING

En mycket viktig del i framtida ubåtssystem är förmågan att kommunicera snabbt och med hög överföringshastighet. En annan viktig egenskap är att kommunikationen sker säkert så att ubåten inte avslöjar sin position. Obemannade undervattensfarkoster (UUV:er) kan få en stor betydelse eftersom en UUV kan användas för framskjuten spaning. Här är det viktigt att information från den obemannade undervattensfarkostens sensorer kan överföras till ledningssystemet. Genom att använda fri optisk kommunikation baserad på laserteknik och fiberoptisk kommunikation erbjuds nya möjligheter att överföra information. I DBA-konceptet ("Dominant Battlefield Awareness") kommer kommunikationen mellan sensorer, plattformar och ledningssystem att spela en avgörande roll. Fri optisk kommunikation medför möjligheter till säker kommunikation, långa räckvidder, överföringshastigheter i storleksordningen Gbit/s och potential för små och billiga system. En intressant aspekt är att kombinera fri optisk kommunikation med befinliga militära taktiska lasersystem^[1].



Figur 1. Exempel på olika användning av laser och annan kommunikation i undervattens-tillämpningar.

Kommunikation under vatten syftar främst till att koppla in ubåtar i ett militärt kommunikations- och sensorsystem. Den höga datatakt som erbjuds med optisk kommunikation är av intresse, men för ubåtstillämpningen är kanske möjligheten till tyst (riktad) kommunikation av ännu större betydelse. De koncept som innefattar fri optisk kommunikation som kan bli betydelsefulla och bör studeras är:

- Kommunikation mellan luften och en boj (alternativt mast) på vattenytan eller mycket nära ytan
- Kommunikation från luften direkt till ubåtssystemet
- Kommunikation under vattenytan.

Olika koncept för kommunikation från flygande plattformar till en ubåt eller till en fjärrstyrd obemannad undervattensfarkost illustreras i figur 1. En annan intressant tillämpning vore att skicka information till minor eller torpeder, t.ex. för att aktivera en minering eller skicka målinformation till en torped. Kommunikation mellan fartyg och ubåt samt mellan ubåtar är också potentiellt viktiga tillämpningar.

Syftet med den här rapporten är att beskriva undervattenstillämpningar för optisk kommunikation med laserteknik. Olika koncept för kommunikation, med tyngdpunkt mot retrokommunikation, diskuteras. Prestandaberäkningar för viktiga funktioner och en beskrivning av tekniska möjligheter presenteras. Rapporten innehåller förslag till experimentell verksamhet för att studera och utvärdera retrokommunikation ovan och under vattenytan.

2 ÖVERSIKT

I det här avsnittet diskuteras olika koncept för optisk kommunikation från luften till en ubåt samt kommunikation under vattnet. Principen för retrokommunikation och dess möjligheter belyses mer ingående.

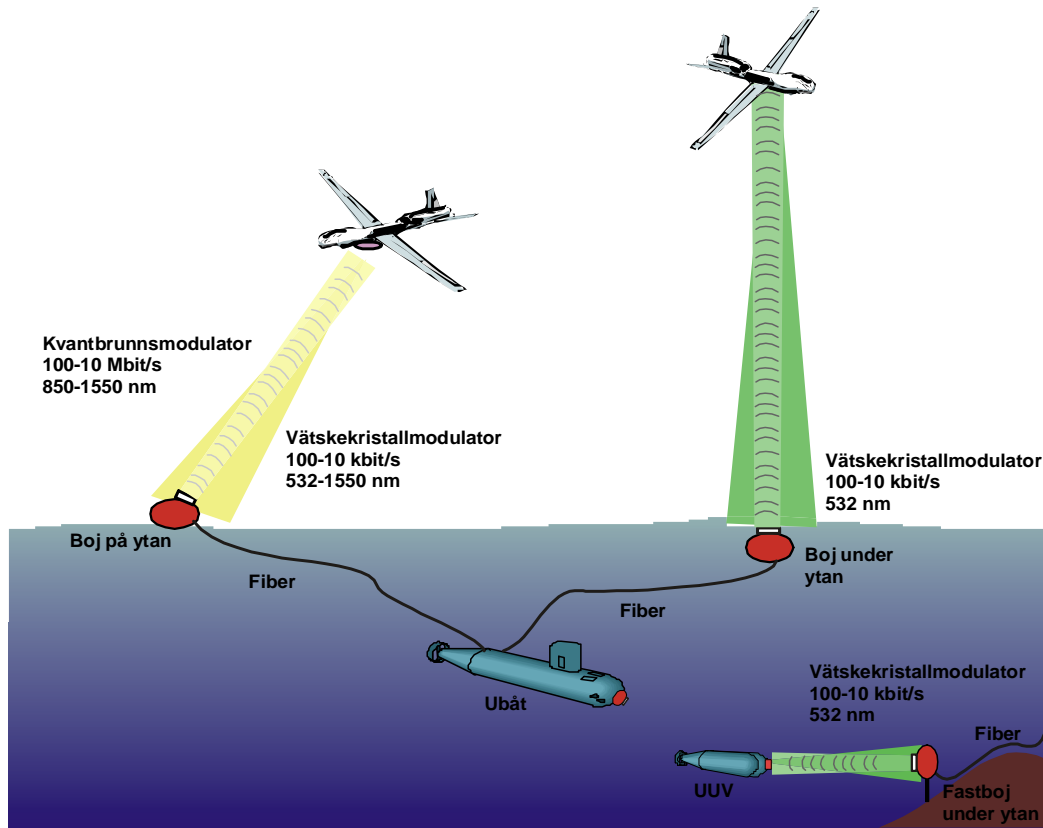
2.1 Kommunikation från luften till boj eller mast

Kommunikation från luften till eller från en ubåt eller en fast undervattensinstallation kan ske genom att en kommunikationsboj eller mast skickas upp till vattenytan eller strax under ytan (figur 2). En möjlig kommunikationslänk bygger på principen att lasern monteras på luftplattformen, t.ex. en aerostat, helikopter, ett flygplan eller en obemannad farkost (UAV) och kommunicerar via en laserstråle med bojen som är passiv och ej själv sänder ut ljus. I bojen ingår en lasersensor som känner av laserljuset och kan avkoda meddelanden som modulerar ljuset. Retromodulatorens speglar tillbaka ljuset exakt i infallsriktningen. Bojen innehåller en modulerbar retroreflektor som aktiveras och sänder tillbaka information genom att amplitudmodulera det reflekterade laserljuset. Mottagar- och styrelektronik för modulatorens finns integrerat i bojen. Eventuellt kan den energiförsörjas optiskt genom att man transmitterar laserenergi från undervattensplattformen genom att utnyttja en optisk fiber.

En kommunikationsboj eller mast ovanför vattenytan erbjuder flera nya intressanta alternativ för att överföra information till eller från en ubåt. En alternativ lösning är att det mottagna laserljuset från luftplattformen kopplas via optik direkt in i en optisk fiber och detekteras i ubåten. Sändning tillbaka kan ske i samma eller i en parallell optisk fiber. För att begränsa upptäcktsrisken och reducera nödvändig lasereffekt för retursändning bör en begränsad rymdvinkel användas.

En viktig frågeställning är hur en boj eller mast ska lokaliseras från luften. Bojen bör utrustas med en retroreflektor eller någon liknande identifieringsfunktion för att snabbt kunna hittas av sändaren. Det kan vara en optisk signal som tänds när en identifieringssignal skickats ut i området. Lokaliseringen av den optiska fyren kan t.ex. ske med en spektralt filtrerad och tidsstyrd bildförstärkare (där tidsluckan ger avståndet till vattenytan) på den flygande plattformen vilket medför att en mycket svag utsändning/reflektion från bojen blir svår att upptäcka för övriga. Bildförstärkaren samensas med lasersystemet och behöver därför inte söka av något större område. Lämpligtvis förses bojen med ett

mekaniskt skydd som döljer retromottagaren innan identifiering har skett. Ett annat alternativ är att en svepande laser används som detekterar laserreflexen från bojen och sedan automatisk låser på bojen varvid bojen börjar sända.



Figur 2. Exempel på några tillämpningar där kommunikation sker från en retroreflekterande mottagare.

En viktig förutsättning för att kommunikationskanalen ska vara robust är att bojen kan stabiliseras på vattenytan. I diskussionen i den här rapporten förutsätter vi att sådan teknik existerar. Kraven för stabilisering påverkar givetvis utformningen av ett system. Ett alternativ till att skicka upp bojen till ytan kan vara att placera den en bit under vattenytan vilket reducerar effekter av sjögång. Nackdelen då är begränsningar pga. ljusets transmissionsegenskaper i vatten. En fördel med att placera en boj på ytan eller använda en mast är att våglängder i det infraröda (IR) området kan användas. Fördelen med att använda t.ex. $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ är att våglängden är ögonsäker, fiberkompatibel samt svårare att upptäcka med elektro-optiska (EO) sensorer. Istället för att använda en boj för retromottagaren kan den placeras på den luftburna plattformen. Sändarlaser och mottagaroptik placeras i det här konceptet på bojen eller i masten. Kraven för att hitta och identifiera retromottagaren är i det här fallet analoga med beskrivningen ovan.

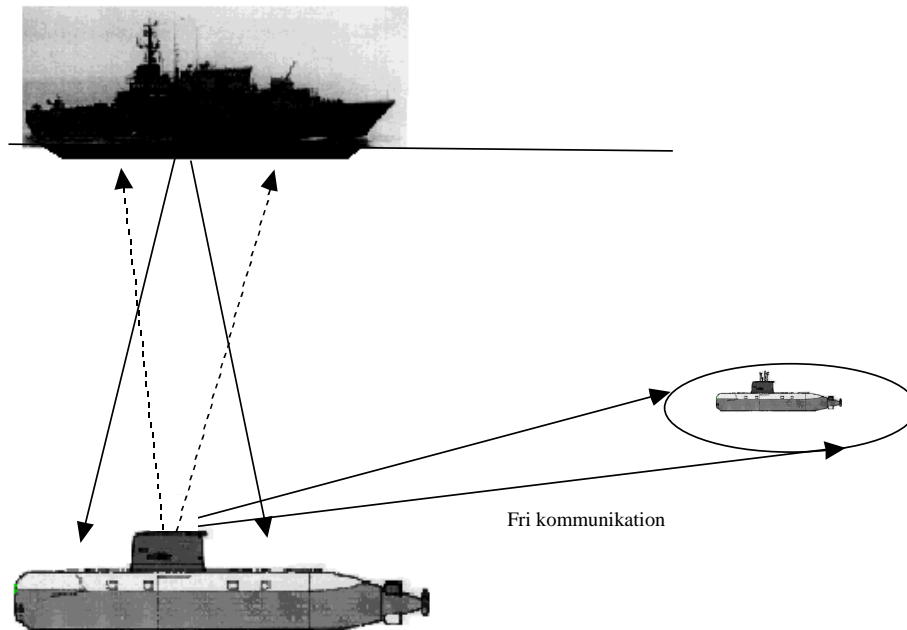
Tvåvägskommunikation kan åstadkommas på flera olika sätt och olika kommersiella system är under utveckling. I den vanligaste konfigurationen sker kommunikationen genom att två enheter som består av lasersändare respektive mottagare används. Olika koncept för tvåvägskommunikation har diskuterats i detalj i en tidigare rapport^[1]. I en tillämpning där en kommunikationsboj används kan tvåvägskommunikation utnyttjas. En sändarlaser med mottagare finns då monterad på kommunikationsbojen. Här krävs en sök- och följfunktion för att en länk ska kunna bibehållas utan avbrott. Systemet blir

betydligt mer komplicerat jämfört med retrokommunikation men har fördelen av högre överföringshastighet i båda riktningarna. Överföringshastigheter i storleksordningen Gbit/s kan uppnås. En attraktiv variant av tvåvägskommunikation erhålls om mottagaren som används för IK hos en retromottagare utnyttjas för kommunikation till bojen.

2.2 Kommunikation från luften direkt till ubåt

Från luften kan kommunikation ske direkt till ubåten om våglängden hos lasersändaren anpassas till vattnets transmissionsområde dvs. blågrönt ljus. Flera olika alternativ för att direkt från luften kommunicera till eller från en ubåt har diskuterats i litteraturen. I USA har man bl.a. studerat möjligheterna att kommunicera till ubåtar från satelliter eller flygburna plattformar^[1]. I det här scenariot används ingen boj eller mast utan kommunikationen sker direkt, genom vattnet, till lasermottagaren/sändaren som sitter på undervattensfarkosten eller en fast installation. Observera att skillnaden mellan en boj eller en liten UUV som är konstruerad för kommunikationstillämpningar och förflyttar sig relativt nära vattenytan inte behöver vara så stor. Två alternativ i den här tillämpningen är:

- En ubåt med en UUV som kan gå nära ytan (1-5 meter) där principerna för en boj enligt ovan delvis kan tillämpas.
- Att kommunikationen sker direkt till undervattensplattformen där både en retromottagare eller en konventionell sändar/mottagarenhet kan nyttjas. I det här fallet kommer räckvidden som funktion av djup att vara av stor betydelse liksom möjligheter att lokalisera farkosten och etablera sambandet.



Figur 3. Exempel på användningsområden för fri laserkommunikation med hela länken i vattnet.

2.3 Kommunikation under vatten

Optisk kommunikation under vatten medför flera möjligheter för överföring av data till och från en ubåt eller en undervattensfarkost. Nackdelen med fri optisk kommunikation i vatten är som tidigare nämnts den begränsade räckvidden. Spridningseffekter som be-

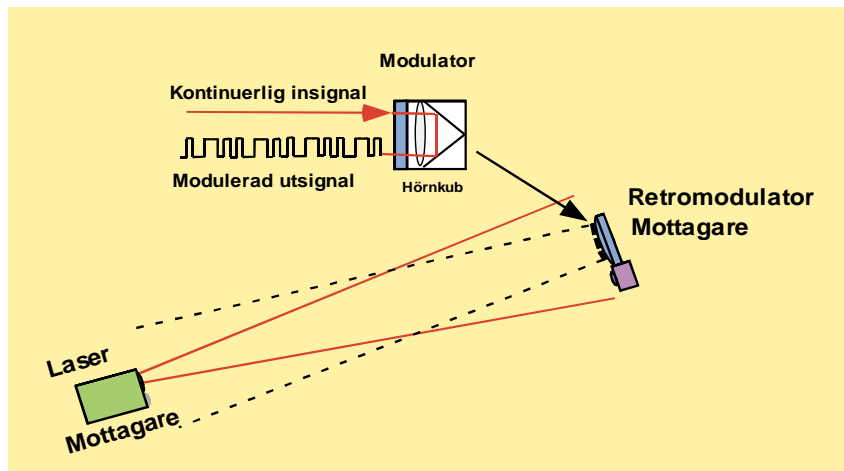
stämmer transmissionen beror till största delen på vattenkvalitén. I avsnitt 3.2 diskuteras räckvidder för kommunikation under vattenytan. Den begränsade räckvidden kan emellertid vändas till en fördel eftersom röjningsrisken blir mycket låg. "Nära tysthet" och potential till mycket höga överföringshastigheter är av intresse i många sammanhang. Överföring av information till och från ubåtar, UUV:er eller fasta installationer på botten är viktiga funktioner. Den fasta installationen kan ha en fiberoptisk anslutning till ett stamnät som går vidare till ledningssystemet. Noteras kan även möjligheten att kommunicera från undervattensläge, men nära ytan, till ett fartyg eller flygplan/helikopter (figur 3). Ett annat alternativ är att ett fartyg används för att kommunicera genom att använda en svepande laser, som över ett begränsat område letar efter kontakt med en undervattensplattform eller fast installation. Fartyget kan även överföra information till en fast installation som ingår i ett undervattensnät med flera stationer varifrån ubåten kan hämta information. Även laseranvändning vid dockning av UUV:er kan innefatta kommunikation.

Retrokommunikation under vattenytan blir särskilt intressant då den ena kommunikationsenheten ej rymmer en konventionell laserenhet eller om andra skäl ej gör det möjligt att installera en laserenhet. Detta kan till exempel tänkas gälla för en kommunikationsnod i ett botten nätverk. En retromottagare placeras då i kommunikationsnoden. Man ska dock inte glömma bort möjligheten att länka laserljus långa sträckor med liten dämpning i optiska fibrer och sedan koppla ut ljuset från fibern till vattnet. I andra scenarion kan det vara befogat att utnyttja retromottagare på UUV. Den obemannade farkosten används lämpligtvis för framskjuten spaning där information hämtas från kommunikationsnoder och sensorer varefter ubåten uppsöks och informationen länkas till ubåten. Som tidigare nämnts blir räckvidderna mycket begränsade vid kommunikation under vattenytan speciellt vid retrokommunikation då en kontinuerlig laser används. Laservåglängden är begränsad till intervallet, 350-550 nm, där transmissionen i vatten är som störst. Det begränsade våglängdsintervallet bestämmer vilken typ av retromodulator och materialteknologi som kan användas. Analogt med tidigare diskussionen kan man naturligtvis tänka sig att båda kommunikationsenheterna har sändare och mottagare.

2.4 Princip för retrokommunikation

Vid retroreflektion returneras den reflekterade strålningen i exakt samma riktning som den infallande strålningen. Fördelen med retroreflektion, i jämförelse med konventionella lasersystem för fri optisk kommunikation, är att endast en lasersändare med mottagare behövs utöver retromottagaren. Kontinuerlig laserstrålning sänds till retromottagaren som, i det enklaste fallet, modulerar intensiteten binärt hos den retroreflekterande strålningen. Information kan således överföras från retromottagaren till lasersändaren. Sändarlasern och mottagaren har gemensam optisk axel vilket medför att centrum hos mottagarens synfält sammanfaller med centrum hos laserstrålen. Tvåvägskommunikation kan åstadkommas genom att retromodulatorens mottagare förses med en mottagare som kan registrera en signal från lasersändaren. Mottagaren kan också användas för att verifiera en identitetssignal innan retromodulatorens sändare öppnas för sändning. En schematisk skiss som visar hur ett system för retrokommunikation fungerar visas i figur 4.

Överföringshastigheten vid retrokommunikation begränsas av modulationsbandbredden hos modulatorens och då extremt snabba modulatorer används av drivelektroniken. Tekniken har potential att föra över information med hastigheter av storleksordningen 0,1-1 Gbit/s.



Figur 4. Princip för retrokommunikation.

De främsta fördelarna med ett retrokommunikationssystem är:

- Reducerad vikt, volym och effektförbrukning hos retromottagaren
- Låg sannolikhet för upptäckt och störning
- Potential för höga överföringshastigheter
- Möjligt med simultan kommunikation från flera platser till lasersändaren.

De viktigaste övergripande funktionerna hos ett retrokommunikationssystem är etablering av den optiska länken, hålla laserstrålen riktad på retromodulatorens samt överföring av data. Vid länketablering krävs en sökfunktion hos lasersändaren där ett visst synfält skannas av tills länken är etablerad. När länken har etablerats är det viktigt att laserstrålen pekar på retromottagaren under hela dataöverföringen för att minimera bitfels sannolikheten. En pek- och följfunktion krävs följaktligen hos lasersändaren.

Genom att öka laserstrålens divergens kan ett större område snabbare undersökas i en sökfase. När kontakt etablerats kan sedan divergensen reduceras så att en starkare signal erhålls. En nackdel med en stor divergens hos laserstrålen är att den reflekterade effekten reduceras. Olika metoder att styra en laserstråle har nyligen belysts i en rapport där fokus var icke-mekanisk strålstyrning med SLM:er ("Spatial light modulators") baserade på vätskekristallteknik^[2]. En fördel med nya icke-mekaniska tekniker för strålstyrning är att dessa har potential att bli kompakta, ha låg vikt samt förbruka lite effekt vilket passar för små luftburna plattformar. Sändarenheten kan exempelvis komma att innefatta en konventionell skanner med en mekanisk spegel (t.ex. galvanometer) för avsökning av stora ytor medan SLM-teknik används för finsökning (mikrosökning) och målföljning. SLM-tekniken kan potentiellt även komma att ersätta mekanisk gyrostabilisering av sändarenheten vilket avsevärt skulle reducera komplexitet och kostnad för sändarenheten.

Externa faktorer som påverkar prestanda hos ett retrokommunikationssystem är atmosfärs effekter och spridning i vatten. Dämpning i atmosfären pga. molekylär absorption och spridning kommer att reducera den reflekterade effekten från retromodulatorens. Turbulenseffekter orsakar intensitetsvariationer (scintillationer) i stråltvärsnittet och som funktion av tiden. Vissa typer av modulatorens är också känsliga för polarisationseffekter. Idealt bör retromodulatorens vara relativt okänslig för polarisationseffekter. På samma sätt som atmosfärs effekter påverkar prestanda hos en retromodulator ovanför vattenytan påverkar ljusets spridningsegenskaper i vatten prestanda hos en retromodulator som konstruerats för undervattenstillämpningar.

Viktiga parametrar som bestämmer prestanda hos retromodulatorens är synfält, kontrastförhållande, moduleringshastighet eller bandbredd hos modulatorens och våglängden. Synfältet hos retromodulatorens påverkar vilka krav som ställs på lasersändarens sökförmåga vid länketableringen och följnogrannheten hos peksystemet. Synfältet kan varieras genom att flera retromodulatorer drivs parallellt och placeras t.ex. på en halvsvär. Kontrastförhållandet är viktigt då intensitetsmodulering används för att koda informationen. Den valda modulortekniken påverkar till stor del kontrastförhållandet mellan den infallande och reflekterande strålningen. Bandbredden hos retromodulatorens bestäms främst av vald modulorteknik samt geometri hos modulatorens. Även drivelektroniken kan dock begränsa den maximala bandbredden.

För kommunikation genom luften till en boj ovanför vattenytan väljs lämpligtvis våglängden $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$. Valet begränsas dock av modulortypen och den materialteknik som används. Kvantbrunnsmodulatorer är begränsade till våglängdsområdet, $\lambda = 850\text{-}860 \text{ nm}$, om AlGaAs/GaAs teknik används vilken är den bäst utvecklade processteknologin. Det användbara våglängdsområdet hos vätskekristallmodulatorer beror på vätskekristallmaterialet. Generellt gäller att modulatorens baserade på vätskekristallteknik fungerar i ett bredare våglängdsområde men att varje enskild modulatorens är konstruerad för en viss optisk bandbredd. En nackdel är att konventionella vätskekristallmodulatorer är långsammare (storleksordning 10 kHz) jämfört med t.ex. kvantbrunnsmodulatorer (10 MHz eller snabbare). Emellertid är forskningen inom vätskekristallområdet intensiv och nya material och koncept för snabba modulatorens håller på att utvecklas. Alternativa materialteknologier undersöks även inom kvantbrunnsområdet där kortare våglängd kan användas. Bedömningen är att den intensiva forskning och starka teknikutveckling som sker, särskilt inom kommunikationsområdet, medför att nya komponenter och materialteknologi kommer att utvecklas snabbt under de närmsta åren.

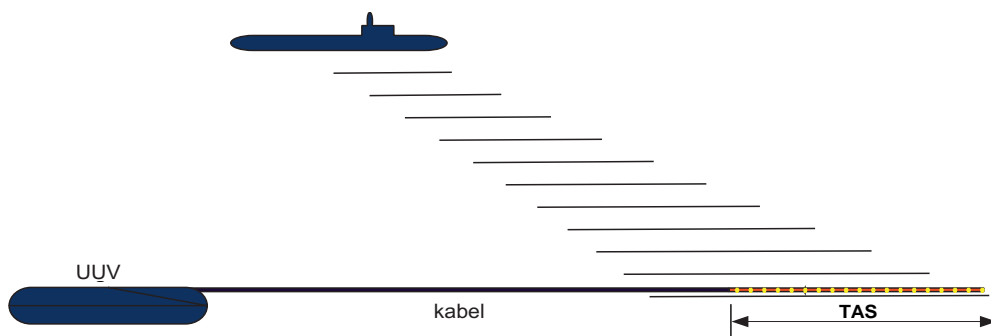
2.5 Fiberoptisk hydrofonteknik och fiberoptiska nätverk

Vi skall mycket kortfattat beskriva fiberoptiken och särskilt peka på en potentiell kommunikationstillämpning för fiberoptisk sensortechnik.

Fiberoptisk teknik (läs ej sensor) kommer att kunna användas i uppbyggnaden av samtliga aktuella system inom det här området och det kommer ibland att vara möjligt att dra nytta av de komponenter, modulatorens, lasrar och detektorer, som utvecklats för fiberoptisk kommunikation. Fiberoptiska kommunikationslänkar från en punkt till en annan över stora avstånd finns redan tillgängliga kommersiellt, även för undervattensbruk. De skulle kunna bilda nätet i ett nätverk av elektroniska kommunikationsnoder och, med modifikation för att tåla belastningar i haspelsystem, utgöra länkar mellan rörliga plattformar, t ex. mellan UUV och ubåt.

En möjlighet som inte omfattas av civil utveckling är att direkt länka optiska signaler från en inkopplingspunkt, där ljus via linser kopplas in i den optiska fibern, och vidare i fiber-optik, kanske i ett nätverk. Vad gäller t ex. kommunikationsnoder är det naturligtvis en stor fördel att ej behöva tillföra effekt. Det kan dock nämnas att om så skulle krävas finns möjligheten att överföra flera Watt fiberoptiskt över stora avstånd.

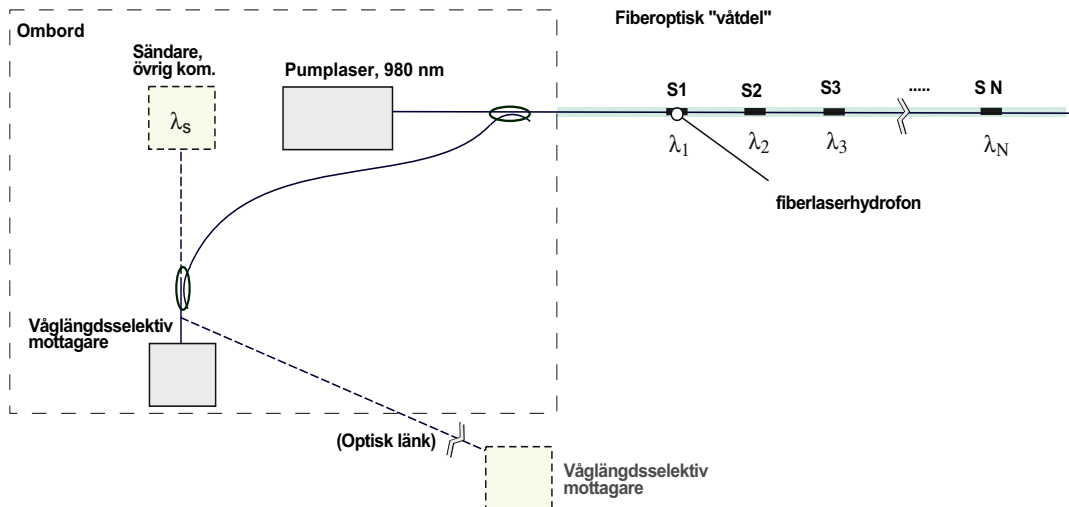
Förutom att kommunicera med utnyttjande av optiska fibrer kan sensorer helt baserade på fiberoptik konstrueras. Envägs akustisk kommunikation till en UUV (men även till ubåt) kan dra nytta av att utnyttja fiberoptisk hydrofonteknik. Lätta och smidiga system med höga sensorprestanda är möjliga att tillverka^[3]. En avancerad akustisk mottagare som kan fånga upp ljudsignaler riktningselektivt och med hög känslighet ger förmåga att både spana och kommunicera akustiskt, kanske i långt framskjutna lägen. Fiberlasersensorteknik kommer att göra det möjligt att tillverka tunna, upprullningsbara kablar, om cirka 5 mm i diameter med upp till 100 hydrofonelement. Det gör det i sin tur möjligt att hantera relativt långa släpade hydrofonsystem så kallade TAS ("towed array sonar") kablar från mindre plattformar som UUV:er vilket kan vara en förutsättning för att erhålla tillräckligt hög direktivitet. I figur 5 visas principen för en TAS-kabel baserad på denna teknik. Ett



Figur 5. Principiell utformning av en så kallad TAS släpad efter UUV.

exempel på en optisk konfiguration framgår av figur 6. Flera fiberlaserhydrofoner pumpas optiskt längs en och samma fiber av en pumplaser ombord. Detta genererar ljus i fiberlaserhydrofonerna som moduleras av den akustiska signalen. Signalerna från respektive element kan särskiljas genom att sensorelementen lyser vid unika våglängder som i mottagaren kan separeras. Det sammanblandade ljuset kan även länkas optiskt till en mottagare som finns placerad på annat ställe. Primärt, för den tillämpningen vi här diskuterat, är det rimligt att anta att en optisk länk till omvärlden ej kan etableras vilket också kan vara ett motiv till att upprätta samband via den akustiska TAS:en. Eftersom det kan leda till en inte oväsentlig minskning av den elektronik som ska bäras av UUV:n är det i det här sammanhanget även värt att notera möjligheten till optisk länkning av råsignaler och övrig information. All nödvändig mottagarelektronik, och egentligen även sändarelektronik inklusive laser, skulle då kunna placeras på en moderfarkost (eller på land). Det skall

betonas att figur 6 bara visar ett exempel på optisk konfiguration för ett sånt här system. Många varianter beroende på tillämpning är möjliga.



Figur 6. Exempel på en optisk konfiguration för en TAS kabel baserad på fiberlaserhydrofoner.

Av särskilt intresse är även att utreda vad en avlång linjesensor eller ett fåtal avlånga element kan erbjuda för möjligheter. Fiberoptisk hydrofonteknik gör det möjligt att göra avlånga akustiska mottagarelement med mycket hög direktivitet. Detta är inte alltid önskvärt i spaningssammanhang där man i regel syntetiskt vill kunna ändra riktning på akustiska antenner med smal instrålningslob. För kommunikationstillämpningar däremot skulle linjesensorer kunna vara mer användbara. Den stora fördelen man vinner är att komplexiteten i systemet minskar. Nackdelen är dock att linjesensorn måste vridas manuellt för att ändra riktning på den akustiska strålningsloben. Detta skulle dock kunna vara ett överkomligt problem i UUV tillämpningar.

I båda fallen kommer det att vara väsentligt att här definiera vilka prestanda, känslighet, brusnivå, bandbredd, för hydrofonsystemet som är relevanta. Frågeställningar som bör besvaras är: vilka är begränsningarna för ultratunna hydrofonarrayer och linjehydrofoner och vilken prestanda kan erhållas? Praktiska problem att lösa är hur en linjehydrofon ska hanteras och hur skall den dras i vattnet. Olika koncept som stela eller flexibla (upprullbara) element kan studeras.

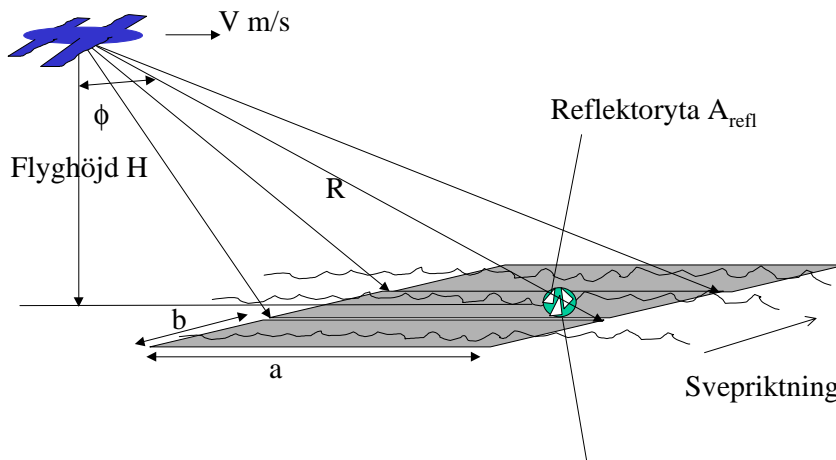
3 KRITISKA FUNKTIONER

I det här avsnittet belyser vi några kritiska funktioner för fri optisk kommunikation för undervattenstillämpningar. Syftet är att diskutera viktiga funktioner och parametrar samt ge en uppfattning om prestanda.

3.1 Länketablering

En viktig parameter vid tillämpningarna är den tid det tar att etablera länken. Vid kommunikation till en boj på ytan (eller under) studeras tiden det tar att etablera länken från en flygande plattform. Här antas att ingen information om bojens läge har erhållits. I andra scenarion kan man tänka sig att bojens läge är förutbestämt eller att annan metod används för att förutsäga bojens läge.

I avsnittet nedan uppskattas tiden för länkatablering från en flygande plattform för ett generiskt system. En laser med medeleffekten P_o som moduleras med en kod som repeteras n ggr under tiden T_s används. Vidare är laserstrålen spaltformad med dimensionen a i flygriktningen enligt figur 7.



Figur 7. Geometri för avsökning av vattenytan efter retroreflektorboj.

Avsökningen sker framför flygplanet med vinkeln ϕ för att reducera signalen från vattenytan samt för att få förvarning. Laserstrålen upptar rymdvinkeln $\theta_x * \theta_y$ där $a = \theta_x R / \cos(\phi_x)$ och $b = \theta_y R / \cos(\phi_y)$. Om strålen avsöker en stråkbredd, $S = 1.5 * H$ ($\phi_y = 37^\circ$) och flyghastigheten är V m/s erhålls ytavsökningshastigheten:

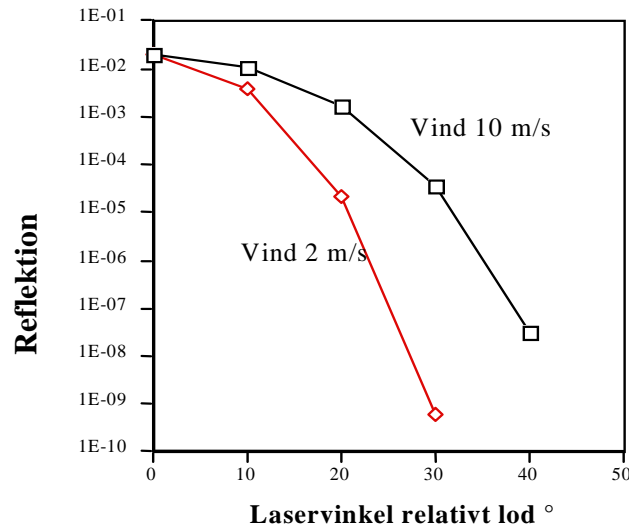
$$Y = S \cdot V = \left(\frac{1}{T_s} \right) \cdot ab \quad (1)$$

där T_s är den tid som strålen sveper över en given punkt på ytan. Skannerfrekvensen f_s blir

$$f_s = \frac{b}{(T_s \cdot S)} = \frac{V}{a} \quad (2)$$

Mottagaren på den flygande plattformen kan bestå av en matrisdetektor eller en bildförstärkare med en CCD som ökar möjligheten att särskilja reflexen från bojen från den omgivande reflexen från vattenytan. Används en detektor med ett element av typen PMT (fotomultiplikator) eller APD ("avalanche"-fotodiod) med tillräcklig yta för att ge ett synfält som täcker strålen på vattenytan, så måste retroreflexen vara starkare än ytreflexen från vattnet. I figur 8 visas hur reflektionskoefficienten från en vattenyta varierar under olika vindförhållanden och infallsvinklar. Det framgår att om laserns infallsvinkel, relativt lod, är större än ca. 20° så kommer den effektiva reflektionskoefficienten att understiga 10^{-3} . Reflektion från så kallade "glints" från vågor är svåra att förutse men kan i praktiken

filtreras bort. Metoder som kan användas bygger på principen att amplituden från “glints” blir lägre än från en retroreflektor eller att de inte uppträder på samma plats vid två svep med strålen över samma yta.



Figur 8. Medelreflektion från en vattenyta vid olika infallsvinklar och vindhastigheter.

Den effektiva lasermålarean (A_{Δ}) för en cirkulär ideal retroreflektor ger ett mått på den återreflektade optiska effekten per steradian och ges av

$$A_{\Delta} = \frac{2\pi A_{refl}}{\left(\frac{\lambda}{d}\right)^2} \quad (3)$$

där $A_{refl} = \pi d^2/4$ är reflektorns tvärsnittsytan och λ laservåglängden. Med en 5 cm reflektor och 1 μm våglängd erhålls $A_{\Delta} \approx 10^7 \text{ m}^2/\text{sr}$. Här ansätts först ett värde på $10^6 \text{ m}^2/\text{sr}$.

Kontrasten (C) definieras som kvoten mellan optisk effekt från reflektorn och bakgrunds-effekten från vattenytan. Här antas att vattenytan även under snett infall kan ses som en diffus reflektor med en reflektionskoefficient $\rho = 4\%$ (vilket är mycket högt räknat). Följande uttryck erhålls för kontrasten

$$C = \frac{A_{\Delta}}{\frac{\rho}{\pi}(ab - A_{refl})} > 100 \text{ för } ab < 1 \text{ km}^2. \quad (4)$$

Man kan således tillåta stora momentana strållobber vid sökning och ändå erhålla tillräcklig signal från reflektorn. Det andra kriteriet som måste vara uppfyllt för en säker detektion är ett tillräckligt bra signal till brusförhållande, SNR , där

$$SNR = \frac{P_m}{NEP} \quad (5)$$

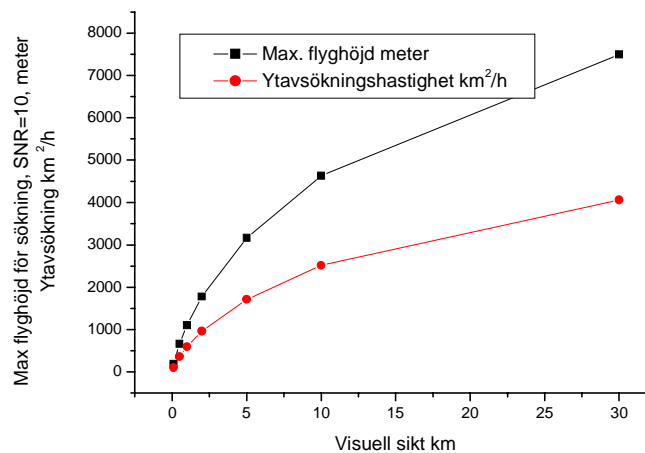
P_m är den mottagna effekten och NEP är detektorns ekvivalenta brusnivå.

I tabell 1 har vi ansatt några systemparametrar för beräkning av prestanda för lasersökningen efter boj med en retroreflektor. Mottagaren har en bandbredd som tillåter mellan $n = 7 - 287$ kodpulser att "rymmas" under sveptiden T_s .

Tabell 1. Parametrar för lasersystemet i sökmod efter reflektor på ytan.

parameter	värde
Lasereffekt, P_o [W]	10
Våglängd, λ [nm]	532
Stråldivergens, θ_x, θ_y [mrad]	100, 30
Skannervinkel, ϕ_x, ϕ_y [grader]	30, 37
Flyghastighet, V [m/s]	100
Signal till brus, SNR [dB]	10
Mottagarapertur [m^2]	0.025
Effektiv lasermålarea, A_{Δ} [m^2/sr]	10^6

Maximal flyghöjd och ytavsökningshastighet som funktion av visuell sikt illustreras i figur 9. Högsta skannerfrekvensen uppnås vid lägsta höjd, dvs. knappt 4 Hz vid 188 meters flyghöjd i det här exemplet. Efter detektion av ett antal kodpulser öppnar retroreflektorn (inom ms) och skannern går över i följemod. Därefter kan sändning ske med hög bandbredd och med en smalare lob, t.ex. 2×2 mrad.

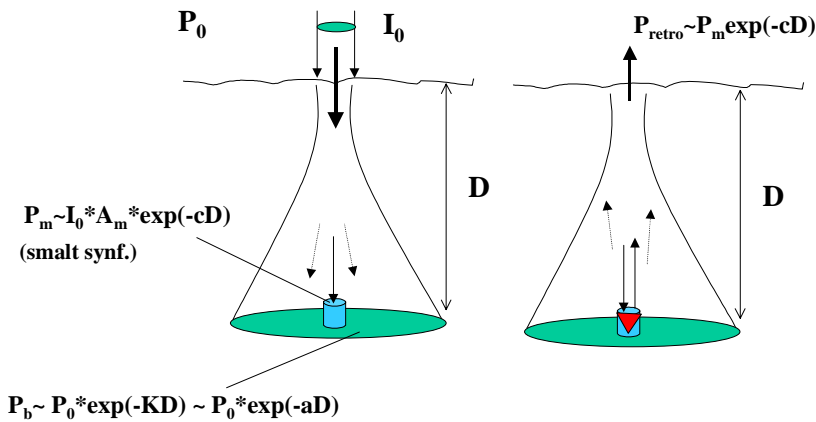


Figur 9. Ytavsökningshastighet och maximal flyghöjd för $SNR=10$ mot retroreflektorboj på vattenytan. Data enligt tabell 1.

3.1.1 Mottagare eller retroreflektor under ytan

Som tidigare nämnts är en laserstråles räckvidd vid utbredning under vattenytan begränsad. En uppfattning om strålutbredning under vatten är därför viktig för att uppskatta prestanda vid sökning från luften mot en reflektor/mottagare under ytan samt vid kommu-

nikation under vatten. Stråltubbredning och dämpning av laserstrålning i vatten illustreras i figur 10. Den här enkla beskrivningen används som en första approximation för räckviddsbedömningar.



Figur 10. Stråltubbredning och dämpning i vatten för uppskattning av kommunikationsräckvidder. Mottagare med smalt synfält (vänster) samt retromottagare (höger).

För en mottagare med smalt synfält vid ett visst djup, D , (figur 10) kan den uppfångade effekten beräknas som

$$P_m \approx I_o A_m e^{-cD} \quad (6)$$

där I_o är intensiteten på ytan och A_m mottagarens apertur och c den totala dämpningen för ljuset i vatten. Dämpningslängden i vatten definieras som $dl = 1/c$ och är i våra vatten typiskt 1 till 4 meter där den högre siffran gäller ute till havs^[4]. För en mottagare som fångar upp ljus vid ytan från en retroreflektor på djupet D ges därför den återreflekterade optiska effekten av

$$P_m \approx I_o A_m e^{-2cD} \quad (7)$$

om mottagare och retroreflektor antas ha lika apertur, A_m . För ett kommunikationssystem kan man i en första approximation uppskatta djupräckvidder för en enkel respektive en retrolänk enligt

$$D_{enkel} \approx \frac{1}{c} \ln\left(\frac{P_o}{P_m}\right) \leq (25 - 40) \cdot dl \quad (8)$$

$$D_{retro} \approx \frac{1}{2c} \ln\left(\frac{P_o}{P_m}\right) \leq (12.5 - 20) \cdot dl$$

där de angivna siffrorna är typiska värden för rimliga system. Ovanstående uttryck medför uppskattade räckvidder för enkellänkar på 25-160 meter och för retrolänkar på 12.5-80 meter.

Följaktligen om bojen ligger under vattenytan kan signal till brusförhållandet uppskattas enligt

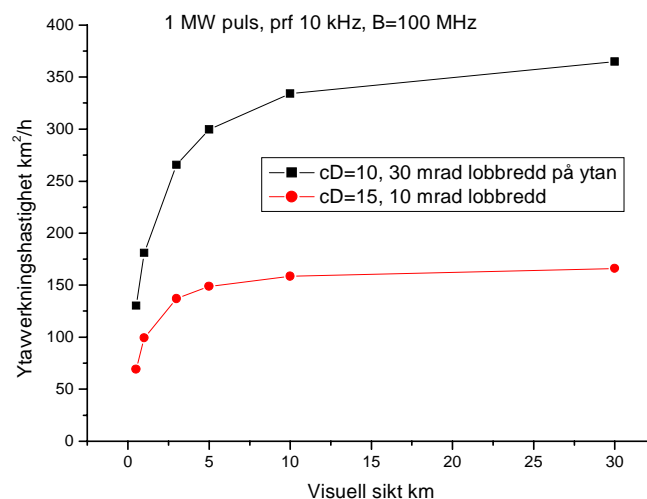
$$SNR(D) = SNR(D = 0) \cdot e^{-2cD} \quad (9)$$

om spridning i luften och vågtytans inverkan försummas.

I figur 11 visas exempel på ytavsökningshastigheter vid avsökning efter reflektorn under ytan med pulsad strålning där reflektorn är på djupen 10 dl respektive 15 dl, vilket i våra vatten betyder 10-15 respektive 40-60 meter för skärgård och öppet hav. Vi har antagit att diametern hos retroreflektorn är ca. 1 dm i diameter. För det större djupet på 15 dl begränsas ytavsökningen av flyghöjden och är ca 150 km²/timme medan för 10 dl är motsvarande siffra ca. 350 km²/timme

Tabell 2. Ändrade/tillkommande parametrar för lasersystemet i sökmod efter reflektor under ytan (jmf tabell 1).

parameter	värde
Laserpulseffekt, P_0 [W]	10^6
Pulsrepetitionsfrekvens, PRF [Hz]	10^4
Effektiv lasermåarea, A_A [m ² /sr]	10^7



Figur 11. Ytavverkningshastighet för olika lobbredder på ytan med en pulsad laser enligt tabell 2.

Tiden för länketablering begränsas av flygtid och avsökningstid. Antag att ubåten ligger inom ett 1x1, 3x3 eller 10x10 kvadratmil stort osäkerhetsområde. Medeltiden för detektion och länketablering skulle då under goda väderförhållanden vara enligt tabell 3. Efter

Tabell 3. Tid för länketablering.

Fall	Tid för kontakt 10x10 km ²	Tid för kontakt 30x30 km ²	Tid för kontakt 100x100 km ²
Reflektor på eller nära ytan	1 minut	9 minuter	100 minuter
Reflektor på 10 dämpningslängders djup	8 minuter	72 minuter	800 minuter

upptäckt sker kommunikation inom några sekunder. Här försummas flyplanets vändtid

och vi antar att ubåten ligger relativt stilla. Det framgår att ett litet avsökningsområde är viktigt för att erhålla rimliga etableringstider. Om man skall kommunicera till givna bojar är etableringstiden bestämd av flygtiden till bojen. Från en aerostat kan man t.ex. direkt kommunicera till fixa bojar på flera mils avstånd. Räckvidden på dubbla siktavståndet kan erhållas.

3.2 Räckvidd

3.2.1 Atmosfärs effekter

Vid fri optisk kommunikation genom atmosfären påverkar flera olika fenomen prestanda hos den optiska länken. I en tidigare rapport har atmosfärs effekter diskuterats mer i detalj^[1]. Här belyses endast sammanfattningsvis de viktigaste effekterna som påverkar länkprestanda.

Dämpning i atmosfären uppstår delvis pga. spridning mot aerosolpartiklar som t.ex. vattendroppar, snö och rök. Dämpningen orsakar en reducering av SNR och således räckvidden hos den optiska länken. Partikelspridningen kan också orsaka temporal pulsbreddning som reducerar överförings hastigheten vid mycket höga hastigheter.

Turbulenseffekter orsakar intensitetsvariationer i stråltvärsnittet vilka kan ge upphov till signalbortfall och/eller bitfel. Turbulenseffekterna orsakar vidare en breddning av stråldiametern vilken medför att lägre effekt träffar mottagaren med minskat SNR som följd. En tredje effekt som uppstår pga. turbulens är strålvandring som resulterar i ett pekfel.

Flera olika metoder existerar för att reducera atmosfärs effekternas negativa inverkan på länkprestanda vid fri optisk kommunikation. Det enklaste sättet att öka prestanda hos ett laserkommunikationssystem är att öka medeleffekten hos lasern. En nackdel med att öka lasereffekten är att systemet blir större och ökar i vikt, behöver mer extern energi, kräver speciella optikkomponenter samt blir dyrare. Beroende på laservåglängden kan också den maximala lasereffekten vara begränsad. Andra metoder att reducera inverkan av atmosfären är t ex. att öka mottagararean, optimera mottagarens synfält, använda flera våglängder samt utnyttja adaptiv tröskelsättning. Adaptiv optik kan också användas för att reducera påverkan från turbulenseffekter. Allmänt för de nämnda metoderna är att den tekniska komplexiteten hos det optiska kommunikationssystemet ökar. Det taktiska scenariot påverkar också kravet på maximal räckvidd vid utformning av ett optisk kommunikationssystem.

Tabell 4. Parametrar för luftlänk.

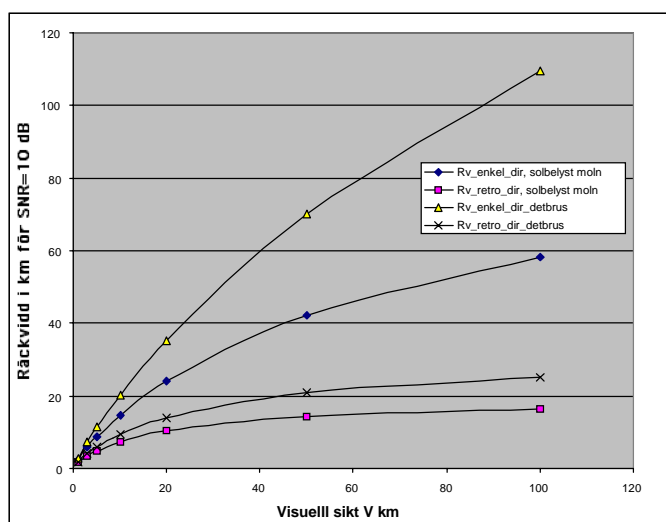
parameter	värde
Lasereffekt , P_o [W]	1
Våglängd, λ [nm]	800
Stråldivergens, θ_x, θ_y [mrad]	1, 1
Pekjitter [mrad]	0,33
Mottagarapertur [m ²]	0,01
Retroreflektor, effektiv lasermålärea , A_{Δ} [m ² /sr]	10^7
Signal till brus, SNR [dB]	10
Kommunikationsbandbredd [Hz]	10^9

3.2.2 Hela optiska länken över ytan

Följande prestanda (tabell 4 och figur 12) för en luftlänk är hämtade från en nyligen utgiven översiktstudie över laserkommunikation^[1]. En enkellänk (sändare till mottagare) jämförs med en retrolänk. Lasermålärea för retroreflektorn fås typiskt med en reflektordiameter på 1 dm. Två väderförhållanden betraktas ;

- Kraftig turbulens ($C_n^2 = 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$) solig dag, siktlinje nära mark
- Mild tubulens ($C_n^2 = 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$), klar natt(visuell sikt 30 km).

En längre räckvidd erhålls för enkellänken jämfört med retromottagare. Som framgår av figur 12 erhålles räckvidder uppåt 50 km för enkellänken och uppåt 17 km för retrolänken vid 30 km's (god) visuell sikt.



Figur 12. Räckvidd som funktion av visuell sikt för olika bakgrundsljus med en 1 W optisk effekt och upp till 1 Gbit/s kommunikationshastighet.

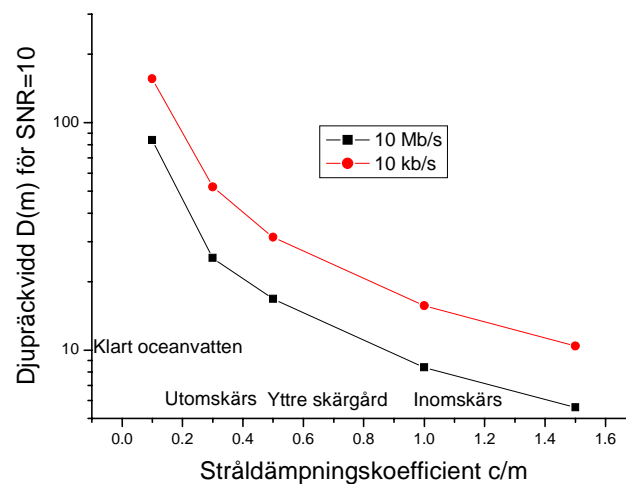
3.2.3 Mottagare eller retroreflektor under ytan.

Nedan följer ett exempel på en kommunikationslänk med en retroreflektor under ytan. Atmosfäreffekter i luften antas ej vara begränsande som t ex. med visuell sikt på 30 km enligt 3.2.2. För att kunna kommunicera ned till reflektorn med upp till 10 Mbit/s (pulsbreddningen i vatten försummas) så måste strålloben på ytan minska till 2x2 mrad. Data enligt tabell 5 och tabell 1 har används för att uppskatta maximal kommunikationsräckvidd för två olika bandbredder 10 kbit/s respektive 10 Mbit/s (se figur 13).

Tabell 5. Ändrade/tillkommande parametrar för lasersystemet i kommunikationsmod med reflektor under ytan (jmf tabell 1).

parameter	värde
Stråldivergens, θ_x, θ_y [mrad]	2, 2
Flyghöjd, V [m]	300
Effektiv lasermålarea, A_Δ [m ² /sr]	10^7

Kommunikationsräckvidden från 300 meters höjd mot en reflektor i vattnet kan beräknas till 10-50 meter för 10 kbit/s och 6-25 meter för 10 Mbit/s för Svenska farvatten. I klara oceanvatten är motsvarande räckvidder 84-156 meter (10 meters dämpningslängd). Vid större djup, motsvarande maximal räckvidd för 10 kbit/s, kan avsökningsförmågan vara begränsande. Det är emellertid tänkbart att utnyttja olika lasrar för länketablering respektive kommunikation. En pulsad laser och grindad bildförstärkare kan vara ett alternativ

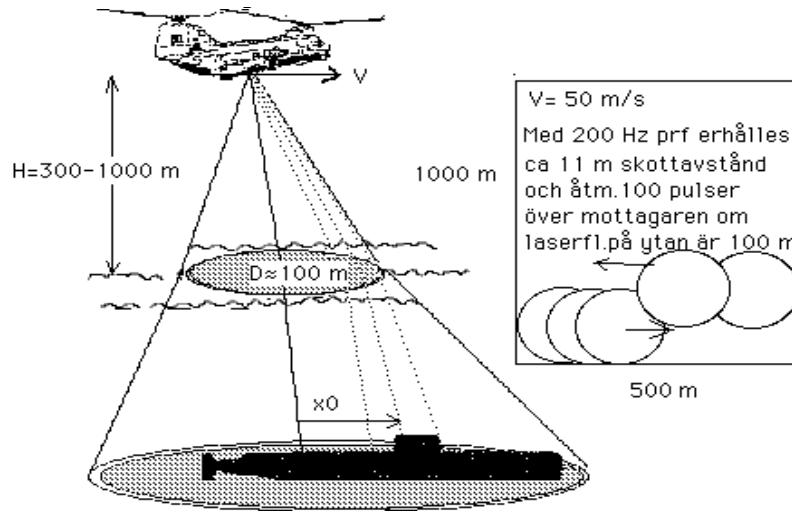


Figur 13. Djupräckvidd för laserkommunikation från 300 meters höjd mot retroreflektor under ytan. Två olika dataöverföringshastigheter har angivits.

till en kontinuerlig söklaser i kombination med fotomultiplikatorrör. Avsökningssystem baserade på pulsad laser används för minspaning.

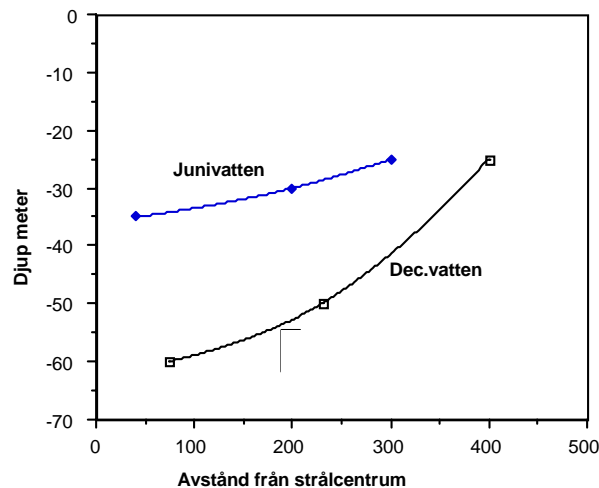
Det kan även vara av intresse att se vilka räckvidder och överföringshastigheter som skulle kunna vara möjliga med ett system av typen "Hawk-Eye"^{[5],[6]}. För att bäraren av lasersändaren (helikopter eller flygplan) inte skall röja positionen av ubåten kan kommunikationen ske när bäraren flyger. Med en flyghastighet av 50 m/s och en svepbredd på

500 meter (val av svepbreddn beror på hur väl man känner ubåtens läge) erhålles skottavståndet 11 meter vid en prf på 200 Hz vilket åtminstone ger 100 pulser över målet om stråldiametern antas vara 100 meter på ytan.



Figur 14. Koncept för kommunikation till ubåt med Hawk-Eye systemet eller motsvarande. För att uppnå god täckning och kunna flyga för att inte avslöja mottagarens position krävs en tillsatsoptik som breder ut laserfläcken till en diameter av storleksordningen 100 meter på ytan.

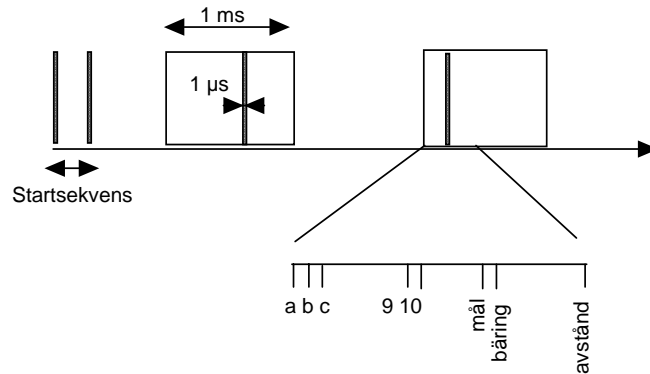
Detektion erhålls även långt från strålcentrum, enligt figur 15. Beräkningarna tyder på att under givna antaganden (ubåtsmottagarens NEP = $0,02 \mu\text{W}$ samt 20 cm apertur) kan räckvidder kring 30 respektive 60 meter uppnås för juni respektive decembervatten i den svenska skärgården. Det kan vidare vara av intresse att studera hur mycket information



Figur 15. Uppskattad räckvidd för Hawk Eye-lasern som kommunicerar med en ubåt. Räckvidd för olika avstånd mellan mottagare och strålcentrum anges. Stråldiameter på ytan 100 m.

som kan överföras på det här sättet. Anta att laserpulser kan sändas och mottas med en tidsnoggrannhet relativt en referens som understiger $1 \mu\text{s}$ och att denna tidsposition kan

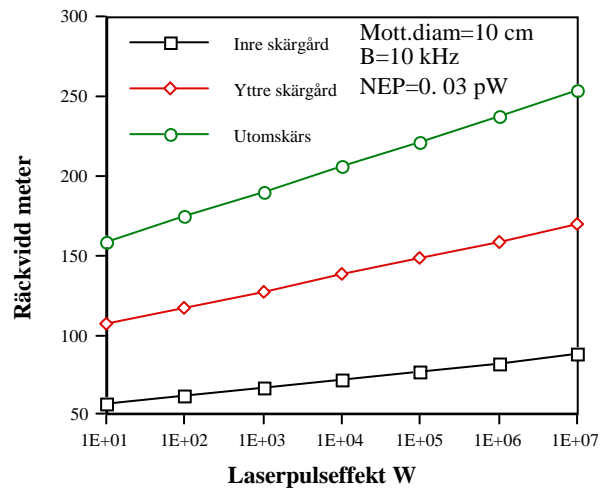
varieras inom ett tidsfönster på 1 ms runt varje puls. Här skulle en pulspositionskod ge möjlighet att vid en överflygning sända ned 100-1000 pulser där varje puls antingen kan representera ett tecken eller ett kodord (se figur 16).



Figur 16. Exempel på pulspositionskodning för överföring av information. Varje laserpuls antas kunna sändas och detekteras med en noggrannhet av 1 μ s. Kring varje puls finns ett tidsfönster som är 1 ms vilket maximalt skulle kunna ge utrymme för t.ex. 40 tecken och 960 kodord.

3.2.4 Hela optiska länken under ytan.

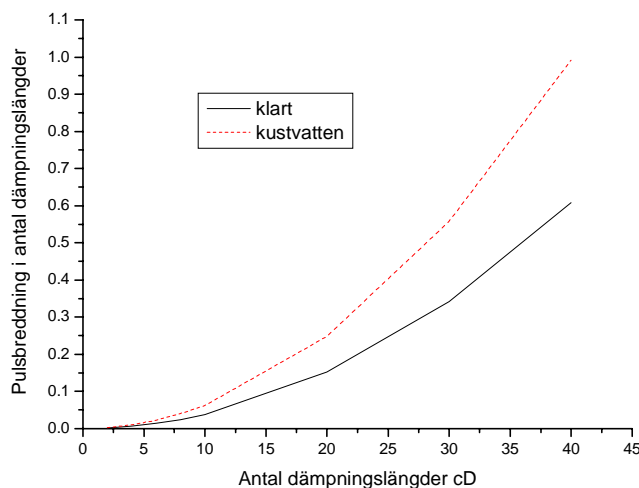
Möjligheter till långa räckvidder finns främst på större djup, i sådana riktningar där dagsljuset kan försummas och med pulsat ljus. Om vi kan anta helt hagelbrusbegränsad mottagning vilket ger den teoretiskt känsligaste detektionen kan man få relativt långa räckvidder, se figur 17. En pulseffekt på 10-100 kW, skulle teoretiskt kunna ge räckvidder i området 70-220 meter beroende på vattenkvalitén, antaget en detektorbandbredd på 10 kHz.



Figur 17. Räckvidd för undervattenkommunikation med laser, antaget hagelbrusbegränsad detektion. Enkellänk med sändare och mottagare helt i vattnet.

3.3 Maximalt överförbar bandbredd

Multipelspridning i atmosfären och i vattnet leder till pulsbreddning och begränsar den maximala överföringshastigheten. I atmosfären kan denna spridning uppstå via partikel-spridning eller turbulensbreddning. Den förstnämnda effekten är den dominerade medan den senare medför mycket små breddningseffekter (av storleksordning 10-50 femtosekunder). Bandbredder över 1 Gbit/s är dock möjliga över 10-tals km.



Figur 18. Pulsbreddning i klart oceanvatten och kustvatten.

I vatten kan breddning av laserpulsen vara av större betydelse vid höga bandbredder. Detaljerade modeller för laserutbredning inklusive pulsbreddning i spridande och turbulenta medier har beskrivits i litteraturen^{[7],[8]}. Om en utgående puls har en halvvärdesbredd på ca 0.5 ns (motsvarande en överföringskapacitet om ca 2 Gbit/s) fås ingen nämnvärd breddning efter 10 dämpningslängder. Efter 30 dämpningslängder (vilket kanske motsvarar maximal räckvidd för ett system) har pulslängden fördubblats vilket skulle begränsa överföringskapaciteten till 1 Gbit/s. I en annan modell av Tessendorf erhålls väsentligen samma resultat^[9]. I figur 18 anges pulsbreddningen uttryckt i antal dämpningslängder som funktion av länkavståndet i antal dämpningslängder. Slutsatsen är att för praktiska system borde överföringskapaciteter på hundratals Mbit/s eller mer vara möjliga vid användandet av fri undervattenskommunikation med laser.

4 TEKNIKÖVERSIKT

4.1 Modulatorer

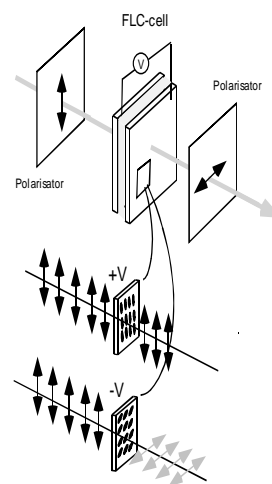
I det här avsnittet sammanfattas de viktigaste egenskaperna för de modulatorer som är av störst intresse för retrokommunikation från luften till ytan eller vice versa samt kommunikation under vatten.

4.1.1 Vätskekristaller

Vätskekristaller är optiska anisotropa material (dubbelbrytande) vars optiska egenskaper kan förändras med ett elektriskt fält. Den grundläggande principen är att vätskekristallmolekylerna ändrar riktning som funktion av styrkan hos det elektriska fältet. Genom att

det effektiva brytningsindexet ändras kan man åstadkomma en rotation av polarisationen hos det infallande ljuset eller en fasfördröjning. De vanligaste vätskekristallmaterialen som används för att modulera ljus är nematiska och ferroelektriska material. Nematiska vätskekristallers optiska egenskaper förändras analogt som funktion av styrkan hos det elektriska fältet, vilket medför att en kontinuerlig förändring av t.ex. fäsen eller polarisationen hos transmitterat eller reflekterat ljus kan åstadkommas. Ferroelektriska material, å andra sidan, är binära av naturen och dess optiska egenskaper varierar mellan två diskreta tillstånd i närvaro av ett elektriskt fält.

Nematiska vätskekristallmaterial (NLC) har en responstid av storleksordningen 10-100 ms medan ferroelektriska material (FLC) skiftar tillstånd i tidsintervallet 10-100 μ s. Tidsresponsen beror på celltjocklek, viskositet, temperatur och det elektriska fältets utseende. En intensitetsmodulator som består av en vätskekristallcell placeras enklast mellan två korsade polarisatorer. Ett exempel på en ferroelektrisk vätskekristallmodulator illustreras i figur 19. Genom att konstruera cellen så att polarisationen hos det infallande ljuset vrids kan en modulator erhållas. Vanligtvis krävs det spänningar av storleksordningen 5 till 30 V för att styra en vätskekristallcell, vilket är betydligt lägre jämfört med elektro-optiska modulatorer. En annan trevlig egenskap är att vätskekristalltekniken kan integreras med kiselektronik vilket medför att kompakta komponenter med liten effektförbrukning kan byggas.

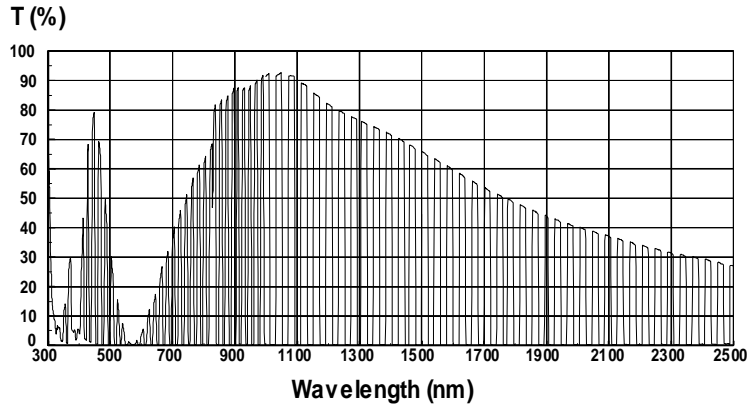


Figur 19. Princip för en ferroelektrisk vätskekristallcell.

Nematiska vätskekristaller har studerats för att styra ljus vid laserkommunikation^[10]. Genom att ändra polarisationstillståndet hos ljuset med hjälp av en NLC halv vågsplatta och använda en polarisationskänslig stråldelare kan ljuset styras i olika strålgångar. En nackdel med NLC-material är den relativt långsamma responstiden. Utveckling av nya metoder för att tillverka snabba modulatorer baserade på vätskekristaller sker bl.a. vid universitetet i Cambridge. Där har man tillverkat snabba modulatorer baserade på elektro-kliniska vätskekristallmaterial med tidsrespons på ca. 160 ns^[11]. Genom att använda en speciell metod, baserad på optisk resonans, för att öka kontrastförhållandet erhålls kontrastskillnader i storleksordningen 1:6-7 vilket är tillräckligt för intensitetsmodulering^[12]. Nya material, lämpliga för att snabbt modulera ljus, är under utveckling. En möjlighet som studeras är att utnyttja icke-linjära optiska effekter.

En fördel med vätskekristallmodulatorer är att konventionella vätskekristallmaterial (FLC) transmitterar ljus från det synliga våglängdsområdet upp till 1,55 μ m. Ett exempel på transmission hos en FLC-cell konstruerad för det infraröda våglängdsområdet presenteras i figur 20. Vid en kommunikationslänk från luften till en boj ovanför vattenytan används lämpligtvis en våglängd i det när-infraröda våglängdsområdet, $\lambda = 1,55 \mu$ m, eftersom strålning här är svårare att upptäcka och EO-sensorer krävs. FLC-modulatorer kan också tänkas användas vid en tillämpning under vatten eftersom transmissionen är relativt hög

i det blågröna våglängdsområdet. En nackdel med vätskekristallmodulatorer är att polarisationseffekter vanligtvis utnyttjas vilket medför att två polarisatorer måste användas och därav erhålls en reducering av den reflekterade effekten.

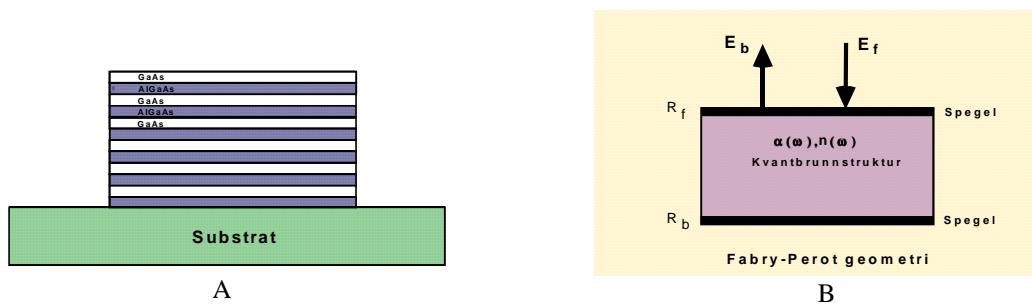


Figur 20. Exempel på optisk transmission som funktion av våglängden för ett ferroelektriskt vätskekristallmaterial.

En retromodulator utvecklad för laserkommunikation baserad på vätskekristallteknik har studerats i ett ballongexperiment^[13]. Retromodulatorn placerades i en luftburen ballong och ett markbaserat lasersystem med teleskop användes för att föra över information. Retro modulatorn var baserad på en ferroelektrisk vätskekristall, två polarisatorer och en hörnkub. Kommunikationslänken klarade av modulationshastigheter upp till 20 kbit/s.

4.1.2 Kvantbrunnar

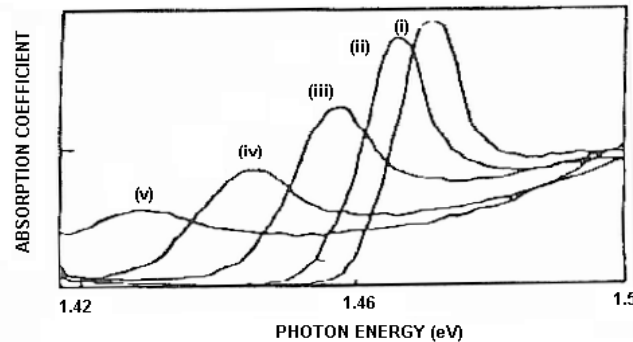
En ny teknik för att modulera ljus som utvecklats de senaste åren baseras på *kvantbrunnstrukturer*. Genom att växa tunna skikt av t.ex. GaAs och AlGaAs på varandra kan en kvantbrunn skapas (figur 21). I kvantbrunnen ”fångas” elektroner och hål. Kvantbrunnen



Figur 21. Schematisk geometrisk struktur för en kvantbrunnsmodulator baserad på AlGaAs/GaAs (A). Kvantbrunnsmodulator i en Fabry-Pérot geometri (B).

har oftast en tjocklek på 100 till 150 Å och tillverkas med epitaximetoder. Ett elektrisk fält kan förändra kvantbrunnens bandgap genom den s.k. kvantbegränsade Starkeffekten. Med det elektriska fältet kan således absorptionen som funktion av våglängden förändras hos kvantbrunnen. Genom att variera materialsammansättning och geometri hos kvantbrunnen kan dess optiska egenskaper modifieras.

En optisk modulator kan konstrueras genom att en dielektrisk spegel placeras i botten och på toppen av kvantbrunnen så att en Fabry-Pérot geometri erhålls. På så sätt ändras reflektiviteten hos kvantbrunnsmodulatorens och kontrasten kan förbättras. Modulatorens har vanligtvis hög kontrast och bandbredder upp till 40 GHz har visats i vågledargeometrier. Det elektriska fältet som styr modulatorens är av storleksordningen 3 till 9 V, vilket innebär låg effektförbrukning. Kvantbrunnsmodulatorer kan integreras med kiselteknologi för att erhålla små kompakta modulatorer.



Figur 22. Absorptionskoefficienten som funktion av fotonenergin vid kvantbegränsad Starkeffekt. Det elektriska fältet har varierats, (i)-(v), från ref^[14].

Kvantbrunnsmodulatorer har nyligen studerats som retroreflektorer i laserkommunikationssystem. Vid "Naval Research Laboratory" (NRL) i USA har man visat att kvantbrunnsmodulatorer kan användas för att sända data med en hastighet på 500 kilobyte/s över 17 m^[15]. Överföringshastigheter av storleksordningen 4 till 6 Mb/s rapporterades med en bitfelssannolikhet som var mindre än 10^{-6} över en optisk länk^[16].

Kvantbrunnsmodulatorer kan användas för kommunikation mellan en boj på vattenytan till en flygburen plattform eller till ett fartyg. En begränsning är att våglängden är 850 - 860 nm om AlGaAs/GaAs används som modulormaterial. AlGaAs/GaAs har fördelen att vara ett noggrant studerat materialsystem samt att processtekniken är väl utvecklad. För ett kommunikationssystem som utnyttjar en boj eller mast är det önskvärt att våglängden förskjuts mot det infraröda området, t.ex. 1,55 μm . Kvantbrunnstrukturer med nya materialkombinationer som InAs/GaAs studeras och kommer på sikt att medföra att IR-modulatorer kan tillverkas^{[17],[18],[19]}. För kommunikation under vatten med kvantbrunnsmodulatorer måste våglängden anpassas till det blågröna våglängdsområdet. I litteraturen har man rapporterat om kvantbrunnsstrukturer som fungerar vid våglängden $\lambda = 488 \text{ nm}$ där materialet ZnSe/ZnCdSe används^[20]. Kvantbrunnstekniken har således potential för såväl över- som undervattenstillämpningar.

4.1.3 Övriga modulatorer

En *elektrooptisk (EO) modulator* kan användas för att modulera ljuset hos en kontinuerlig laser. Den elektro-optiska effekten grundar sig på att brytningsindex hos vissa material varierar icke-linjärt då ett elektriskt fält appliceras över materialet. De två vanligaste EO-fenomenen benämns Pockels- och Kerreffekten. Enkelt uttryckt kan det elektriska fältet användas för att kontrollera olika egenskaper hos ljuset som passerar genom materialet. Pockels- och Kerreffekten kan utnyttjas för att konstruera optiska modulatorer och optiska switchar. Två vanliga sätt att modulera intensiteten hos ljuset är att använda en interferometer eller placera EO-komponenten mellan två korsade polarisatorer. En nackdel med

elektro-optiska modulatorer är att höga spänningar, 1-10 kV, krävs för att åstadkomma en tillräckligt stor förändring av brytningsindex. Tidsresponsen för en konventionell EO-modulator varierar från hundratals MHz upp till en GHz.

Den *akustooptiska (AO)* effekten karakteriseras av att brytningsindex hos vissa material varierar om en ljudvåg sänds genom materialet. Ljudvågen kan tänkas som en störning av brytningsindex. I en akusto-optisk cell erhålls en partiell reflektion av det infallande ljuset pga. Braggspredning. Resultatet blir att en hög reflektion erhålls om Braggvillkoret för diffraktion är uppfyllt. En akustisk våg genereras genom att en sändare placeras på ena sidan av den akusto-optiska cellen. Kommersiella AO-komponenter finns idag tillgängliga för modulering av ljus. Snabbheten hos en AO-cell bestäms av modulationsbandbredden och ett riktvärde är storleksordningen 1 MHz. Akustooptiska modulatorer finns framtagna både för det synliga och IR-området.

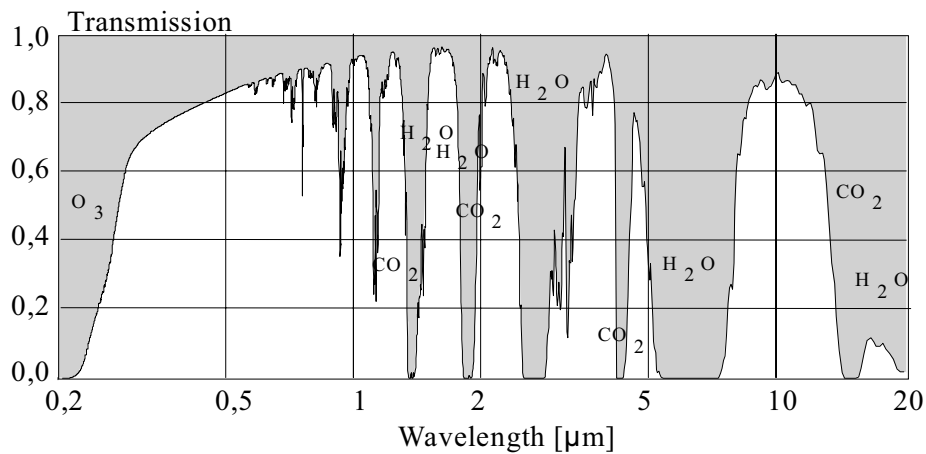
I ett *fotorefraktivt material* ändras brytningsindex vid belysning. Modulatorer baserade på fotorefraktiva material kan konstrueras genom interferometerprinciper där en fasmodulator åstadkoms med ett varierande brytningsindex som lagras i det fotorefraktiva materialet. En modulator baserad på fotorefraktiv effekt har oftast en responstid av storleksordningen 1 ms till 100 μ s där diffusionen begränsar snabbheten.

4.2 Avancerade koncept för undervattenskommunikation

Den revolution som sker inom utvecklingen av fotonisk teknologi har redan visat sig öppna nya möjligheter för avbildande sensorer och lasersystem i det synliga, nära infraröda (NIR) och IR-området. Syftet med det här avsnittet är att försöka förutse vilka möjligheter som erbjuds med ny laserteknik, SLM:er, detektorsystem och annan kringutrustning för framtida "robusta system" speciellt avsedda för optisk kommunikation både i atmosfären och under vattenytan. Avancerade koncept för framtida kommunikationssystem inkluderar utveckling av laserkällor och detektorer för undervattensvåglängder 400-550 nm, vid 1.55 samt 2-5 μ m. Av särskilt intresse är nya koncept för "kvantkryptering". Kvantkryptering kräver att man kan detektera ljus ner på "få-foton-nivå", dvs tids-styrda fotomultiplikatorrör med hög känslighet krävs. Denna typ av källor erhålls med pulsade diodlasrar, Ti:Saffir och liknande, både i det ultravioletta våglängdsområdet och NIR med pulsrepetitionsfrekvens på 50 till 100 MHz. Om man antar att varje puls kan överföra en bit finns potential för att erhålla överföringshastigheter av storleksordningen 10-100 Mbit/s.

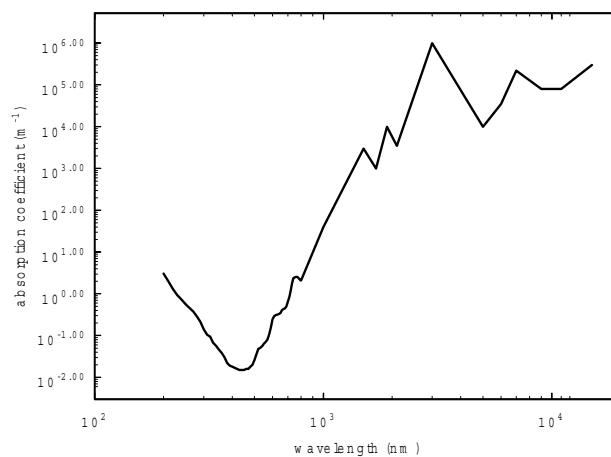
4.3 Lasrar

För att diskutera lämpliga laserkällor för undervattenkommunikation där både kommunikation över och under vattenytan, eller en kombination av båda fallen, bör transmissionen i vatten och atmosfären beaktas. I figur 23 visas transmissionen i atmosfären från UV upp till det långvågiga IR-området ($\lambda = 8-12 \mu$ m). Transmissionen är större än 0,6 från 250 nm till 2,0 μ m med undantag för vattenabsorption vid 1,4 och 1,85 μ m. I IR-området måste hänsyn tas till vatten- och koldioxidabsorption när nya laserkällor och våglängder för kommunikation diskuteras. Intressant att notera är att vid $\lambda = 1,55 \mu$ m är transmissionen nära 95%.



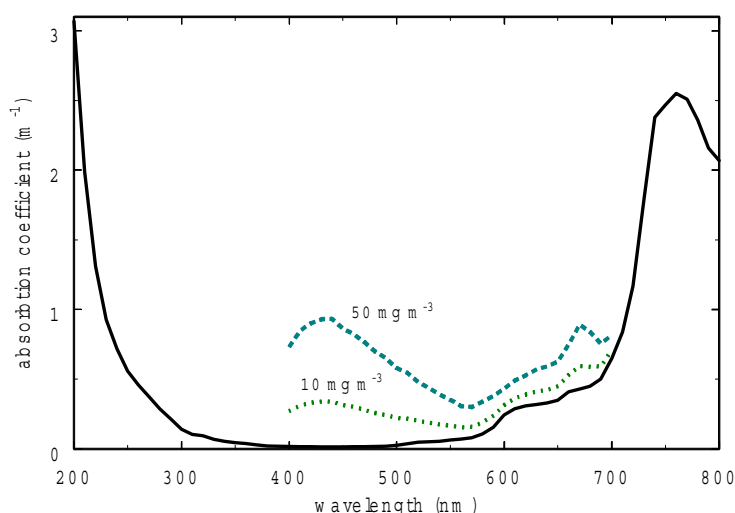
Figur 23. Transmission i atmosfär 50 m över marken normal sommardag

Maximal transmission av ljus i vatten sker vid våglängderna, 350 - 450 nm, enligt figur 24. Rent havsvatten har den lägsta absorptionen vid våglängden $\lambda \sim 440$ nm där absorptionskoefficienten är ca. 0.01 m^{-1} . Utanför det blågröna våglängdsområdet absorberar vatten kraftigt allt ljus vilket omöjliggör användandet av dessa våglängder för kommunikation.



Figur 24. Absorption i rent havsvatten i UV till IR våglängdsområdet

När havsvatten grumlas ökar absorptionen markant vilket illustreras i figur 25, där absorptionskoefficienten för klorofylldopad vatten ökar en storleksordning vid 440 nm. En annan effekt som kraftigt bidrar till att reducera den totala transmissionen i grumligt havsvatten är spridningseffekter.



Figur 25. Absorption i rent havsvatten (heldragen svart) samt typiskt klorofylldotat havsvatten (streckad för det synliga och UV-våglängdsområdet).

4.3.1 Ultravioletta laserkällor

Ultravioletta (UV) laserkällor för laserkommunikation ligger i våglängdsområdet, $\lambda = 300 - 450$ nm, där transmissionen i vatten och atmosfären är relativt hög. Inom UV-området sker idag en snabb utveckling, både vad det gäller laserkällor och optiska komponenter. En av de civila tillämpningarna som driver på utvecklingen är behovet att utveckla nya laserkällor för litografi-industrin. Nya excimerlasrar har utvecklats från kontinuerliga till pulskodade med en prf på 200 Hz i det djupa (160 nm) och det "mer synliga" ultravioletta våglängdsområdet (400 nm) och utvecklingen går mot kompakta slutna system med hög medeffekt. Nackdelarna med excimerlasrar är att de är skrymmande, ställer krav på kylning samt kräver hantering av ohälsosamma gaser. Generellt är excimerlasrar för otympliga för små kompakta system för kommunikation under vatten. Om lasersändaren placeras på en större plattform kan man dock tänka sig att använda en excimerlaser.

Stora ansträngningar görs för att utveckla nya UV-källor som är baserade på fasttillståndsteknik eller laserdioder. Nya UV-laserdioder kan idag erhållas med våglängd ner mot 350 nm och 40-100 MHz prf. Uteffekten från dessa dioder är i dagsläget relativt liten, av storleksordningen några mW med pulslängder i femtosekund-regionen. Under de sista årtiondet har ultra-snabba UV-lasrar utvecklats. Framförallt har avstämbara fasta tillståndslasrar använts där frekvenskonverteringen sker i flera olika steg. Dessa laserkällor har potential för snabb dataöverföring. En nackdel är för tillfället att tekniken är för komplicerad för att kunna implementeras i påfrestande miljöer.

4.3.2 Blågrön laser för undervattenskommunikation

Blågrön laserteknik (450-550 nm) kan anses som väl utvecklad där inriktningen är att tillverka små kompakta laserkällor med hög uteffekt och prf. En annan klar trend är att utvecklingen går mot diodpumpade fasttillståndslasrar eftersom betydligt kompaktare och robustare system kan erhållas jämfört med lasrar som pumpas med blixtlampor. Nya typer av kavitetskonstruktioner, som bygger på principen att kaviteten "viks ihop", är också

under utveckling. Frekvensdubblade kontinuerliga Nd-YAG lasrar som avger upp till 20 W uteffekt kan tillverkas. För frekvenstripplad och kvadruplad Nd:YAG är uteffekten av storleksordningen 0,5 till 1 W. Dessa källor kan moduleras upp till ett tiotal MHz. Färgämneslasrar kan generera ljus i det blågröna våglängdsområdet. Nackdelen här är att la serkällan blir relativt stor och färgämnen måste kunna hanteras på ett lämpligt sätt. Fas tatlillståndslasrar som dopats med färgämnen kan här på sikt erbjuda nya tillämpningar.

4.3.3 "Ögonsäker" laserteknik vid 1.55 μm

Lasrar vid 1,55 μm tillverkas med konventionell teknik och både pulsade och kontinuerliga finns kommersiellt tillgängliga. En av fördelarna att använda våglängden 1,55 μm är att ett flertal telekommunikationstillämpningar utnyttjar våglängden. Den snabba utvecklingen inom telekommunikationsbranschen medför att stora resurser läggs ned på att utveckla laserkällor och fotonikkomponenter vid $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$. Av speciellt intresse är utvecklingen av fiberlasrar och fiberförstärkare. Utvecklingen av högpresterande laserdioder kommer också att domineras av civila tillämpningar.

Utöver de civila tillämpningarna finns det också ett militärt intresse att flytta våglängden från 1064 nm till det ögonsäkra området både för avståndsmätartillämpningar och optikspanande system. För tillämpningar inom fri optisk kommunikation kan man anta att den civila marknaden kommer att driva teknikutvecklingen.

4.3.4 Lasrar i våglängdsområdet 2 till 5 μm .

För fri-optisk kommunikation kan ett taktiskt motiv vara att på sikt undersöka möjligheten att använda mer "smygande" teknik i form av väldefinierade band i våglängdsområdet 2 till 5 μm . Här finns flera olika möjligheter när det gäller utveckling av nya laserkällor:

- Diodpumpad laser baserad på Tm vid våglängden $\lambda = 2 \mu\text{m}$. En frågeställning här är kvantutbytet vid rumstemperatur och hur effekten kan skalas upp. En forskningsuppgift inom det här området kan vara att studera om fluorinerade plaster (dendrimerer) användas.
- Teknik baserad på optisk parametrisk oscillation (OPO) i våglängdsområdet $\lambda = 3 - 5 \mu\text{m}$ kombinerad med diodpumpning och frekvenskonvertering. Här kan man tänka sig direktpumpning vid 1.55 μm eller alternativt i flera steg (via Tm-laser). Inga kommersiella system finns tillgängliga och utvecklingen drivs av militära tillämpningar för infraröda aktiva motmedel.
- Kvantkaskadlasrar, t.ex. AlGaAsSb, som kan pumpas optiskt eller elektriskt.
- Fiberlaserteknik i våglängdsområdet 3-5 μm . Specialfibrer baserade på fluorid, kalcogenide och halogenidföreningar kan dopas med väl valda metaljoner som Tm, och pumpas optiskt i NIR-området.

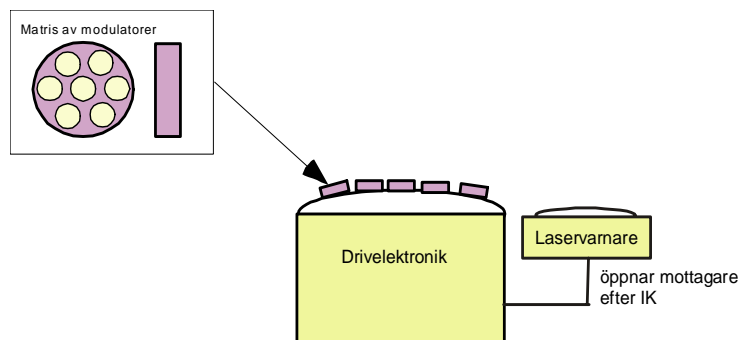
4.3.5 Detektorer

Ett annan viktig del i ett optisk kommunikationssystem är detektorn. Snabba detektorer finns kommersiellt tillgängliga i våglängdsområdet, 160-1100 nm (kisel), alternativt 700-

2000 nm (Germanium). Dessa kräver relativt hög effekt. Detektering av en- (eller få-) fotoner krävs för tillämpningen smygande kvantkryptering. För en-fotondetektering behövs känsligare detektorteknik som dessutom tidsförspänts. Kiselbaserade detektorer finns idag kommersiellt tillgängliga. Detektering i våglängdsområdet 0,7-1,7 samt 1,3-2,4 μm är möjlig genom ny utvecklad teknik för fotomultiplikatorer.

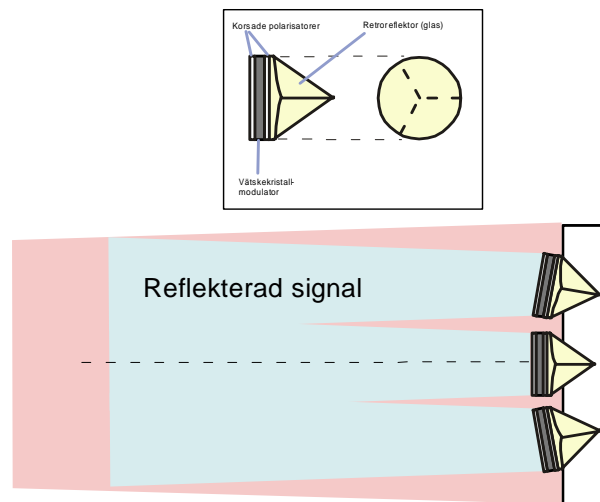
4.4 Retromottagare

Ett element i en retromottagare kan bestå av en matris av modulatorer. Vanligtvis är den aktiva ytan hos en enskild modulator begränsad (t.ex. 5x5 mm), vilket medför att en matris av element måste användas för att den effektiva arean ska bli tillräckligt stor. Ett exempel på hur en retromottagare skulle kunna konstrueras illustreras i figur 26. Den enklaste principen för retrokommunikation bygger på att använda modulaton tillsammans med en retroreflektor dvs. ljus som träffar reflektorn reflekteras tillbaka i samma riktning. Beroende på om modulaton är transmissiv eller reflektiv krävs olika utformningar av retromottagaren. Med en transmissiv modulator placerad framför en hörnkub (bestående av tre speglar) kan en enkel retromodulator erhållas. Ett exempel är här en FLC-modulator där tunnfilmspolarisatorer (korsade) har placerats på varje sida av FLC-cellerna. När en reflektiv modulator används kan man tänka sig att vrida modulaton 45 grader och placera den framför en retroreflektor. En attraktivare lösning är att låta modulaton vara en del av retroreflektorn t.ex. genom att ersätta en spegel med modulaton i en hörnkub uppbyggd av speglar.



Figur 26. Schematisk bild av en retromottagare som består av flera element där varje element har en matris av modulatorer. En laservarnare används för att öppna retromottagaren för sändning. Ett mekaniskt skydd bör också implementeras för att reducera upptäckt av retromottagaren när sändning inte sker.

I figur 27 visas en retromottagare uppbyggd av modulatorelement, där en transmissiv FLC-cell med korsade polarisatorer har limmats på en retroreflektor bestående av en glaskub. Eftersom acceptansvinkeln för en hörnkub är begränsad kan modulatorelementen



Figur 27. Princip för en retromottagare där vätskekristallmodulatorer används tillsammans med en retroreflekerande glaskub. Den nedre bilden illustrerar hur modulatorerna vrids i förhållande till den optiska axeln för att öka retromottagarens synfält.

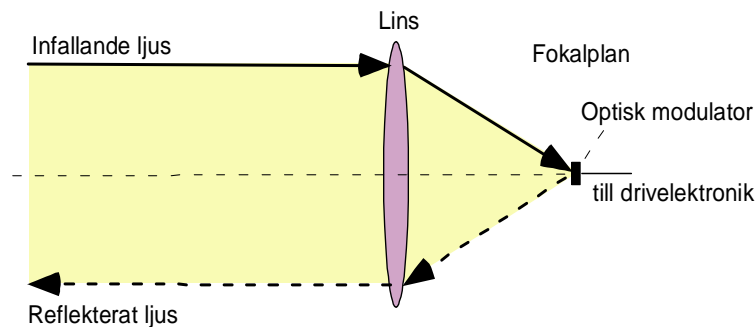
vridas i förhållande till den optiska axeln så att synfältet hos mottagaren optimeras. Vid utformning av en retromottagare måste flera viktiga parametrar studeras och optimeras t.ex.

- Mottagarens totala synfält
- Kontrastförhållande hos modulatorelementet
- Effektiv area
- Polarisations effekter
- Våglängd
- Drivspänning.

Vilken typ av modulator som används kommer givetvis att påverka parametrarna ovan. Polarisations effekter är viktigast för vätskekristallmodulatorer medan t.ex. kvantbrunnsmulatorer inte påverkas nämnvärt av polarisationen. Ett annat exempel är drivspänningen där en högre drivspänning hos en kvantbrunnsmulator medför att kontrastförhållandet förbättras. För att en optimal retromottagare ska kunna utformas måste en modell konstrueras där prestanda vid olika parameterintervall kan jämföras.

Ett problem vid utformningen av retromottagaren är den begränsade storleken på modulatorelementen. Matriser av modulatorelement kan kombineras med matriser av retroreflektorer. Teknik finns idag tillgänglig baserad på litografimetoder för att tillverka tvådimensionella matriser av retroreflektorer där varje enskild reflektor kan betraktas som en liten pyramid med tre reflekterande sidor som är vinkelräta mot varandra. Drivelektroniken måste här klara av att driva alla modulatorelement parallellt. En mer komplicerad metod är att ersätta en sida hos varje retroreflektor med en reflekterande modulator. I diskussionen ovan har vi inte specificerat vilken typ av modulator som används men olika design kan vara nödvändig med tanke på modulatorelementens utformning och dess optiska och elektriska egenskaper.

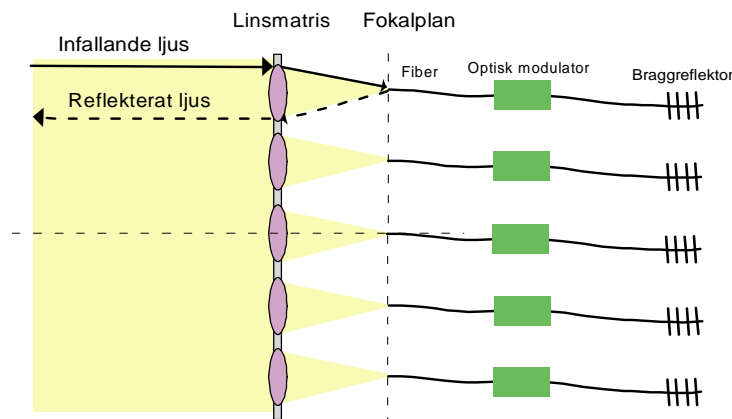
Retrosignal från en reflektiv modulador som placerats i ett fokalplan i ett optiskt system kan vara ett intressant alternativ till hörnkuber eller liknande retroreflektorer. I figur 28 illustreras principen där en reflektiv modulador har placerats i fokalplanet. Fördelen med



Figur 28. Principen för ett retroreflekerande fokalplanssystem.

den här konfigurationen är att en stor apertur samt en liten modulador kan användas. Den stora aperturen medför att en större del av den genom atmosfären transmitterade laserstrålen fångas upp i mottagaren. Nackdelen är att synfältet begränsas och att det ställs höga krav på den fokuserande optiken om modulatoren är liten. Som en riktlinje uppskattas synfältet som, $\theta \sim w/(f)$, där f är det optiska systemets effektiva fokallängd och w modulatorens sida (kvadratisk modulador). Ett retroreflekerande fokalplanssystem ställer således högre pek- och riktningskrav på sändarlasern. Principen lämpar sig bäst för en statisk retromottagare men kan kanske med avancerade stabiliseringssystem även komma till användning i en rörlig retromottagare.

Ett annat koncept som utnyttjar fiberoptik och fiberoptiska komponenter bygger på att ljuset kopplas in i en fiber för att moduleras och sedan reflekteras ut genom fiberändan till kollimerande optik. En fördel här är att utvecklade komponenter för telekommunikation kan användas. Retroreflektion i ordets rätta bemärkelse uppnås dock inte eftersom det återsända ljusets riktning kommer att vara oberoende av det infallande ljusets riktning. En robust konstruktion krävs också för att ljuset ska kunna kopplas in utan allt för stora förluster. Sådana finns dock kommersiellt tillgängliga i olika standardutföranden. Den effektiva arean hos mottagaren ökas genom att använda en matris av linser och ett fiberknippe där ljuset kopplas in (figur 29). Genom att kröka ytan där linsmatrisen är placerad och fokalplanet kan synfältet ökas. Det är dock osäkert om den lösningen kan realiseras från en praktisk synvinkel



Figur 29. Koncept för en retromottagare bestående av en linsmatris som kopplar in ljuset i flera optiska fibrer bestående av en modulator samt reflektor.

5 DISKUSSION

Syftet med rapporten var att belysa intressanta frågeställningar relaterade till undervattenskommunikation och speciellt utnyttjande av principen för retrokommunikation.

För kommunikation till ubåt är det viktigt att studera om en kommunikationsboj på vattenytan kan användas eller om den måste placeras en bit under ytan. Bojens placering kommer att ställa olika krav och begränsningar på det optiska kommunikationssystemet. Väderleksförhållanden kommer att påverka stabiliseringskraven för bojen. Olika boj-och/eller mastkoncept bör utredas vidare.

En annan frågeställning som belyses i den här rapporten är hur lång tid det tar att hitta en kommunikationsboj vars läge är mer eller mindre okänt. Här behöver en optimal metod användas för att etablera säkert samband så snabbt som möjligt. Bestämda lägen eller begränsade avsökningsområden minskar givetvis tiden för länketablering. Det taktiska scenariot kommer till stor del att avgöra vilken metod som lämpar sig bäst. Flera olika parametrar hos det optiska systemet och avsökningsmetoder kommer att påverka om kommunikation kan upprättas på ett säkert "tyst" sätt. En metod att öka avsökningshastigheten är t.ex. att öka strålloben och mottagarens synfält något som dock ökar risken för upptäckt. Våglängden är här en mycket viktig parameter.

Retromodulortekniken bör värderas jämfört med konventionell teknik för optisk kommunikation där kommersiella system idag finns utvecklade. Vilka datataktorer som är möjliga bestäms till stor del av vilken teknologi som väljs för modulatorens. Som tidigare beskrivits påverkar scenariot delvis val av modulorteknik eftersom t.ex. kvantbrunnsmodulatorer baserade på GaAs/AlGaAs inte kan användas för kommunikation under vattenytan. Med de snabbaste modulatorens och vid kommunikation till en boj på ytan bör datataktorer av storleksordningen 10 till 100 Mb/s kunna realiseras på sikt. Tvåvägs-system med direktmodulerande lasrar tillåter datataktorer över 100 Mb/s men här krävs god pekngörannhet för att länken ska fungera utan stora bitfel.

Ett annat alternativ för optisk undervattenskommunikation är att utnyttja blågrön laser mellan ubåt och en undervattensfarkost eller till en fast undervattensstation. Blågrön laser kan användas antingen från den ena änden med enkelriktad kommunikation, med retro-modulator teknik för tvåvägskommunikation eller med laser i båda ändarna. Övergripande frågor som bör utredas är t.ex. hur ubåten och UUV:n hittar korrekt position för samband samt hur optiska komponenter uppför sig i en undervattensmiljö.

Sammanfattningsvis har vi i den här rapporten belyst hur optisk kommunikation kan användas för att kommunicera till en ubåt eller andra undervattenssystem. Exempel på olika koncept för kommunikation har diskuterats där en kommunikationsboj eller mast spelar en central roll. Diskussionen har fokuserats på retromodulator tekniken eftersom den har potential att användas i enkla lätta kommunikationssystem på sikt. Prestandaberäkningar för olika fall av optisk kommunikation har illustrerat möjligheterna och indikerat krav för ett system. Olika tekniska lösningar för modulator teknik har belysts. Förslag till inledande verksamhet presenteras nedan.

6 FÖRSLAG TILL VERKSAMHET ÅR 2001

6.1 Experimentell verksamhet

I det här avsnittet beskrivs förslag till inledande experimentell verksamhet där det första steget är att konstruera och utvärdera en optisk kommunikationslänk ovan vatten (jämför luft till boj på ytan). Syftet är att demonstrera principen för retrokommunikation. Den modulator teknik som valts är baserad på vätskekristallmaterial.

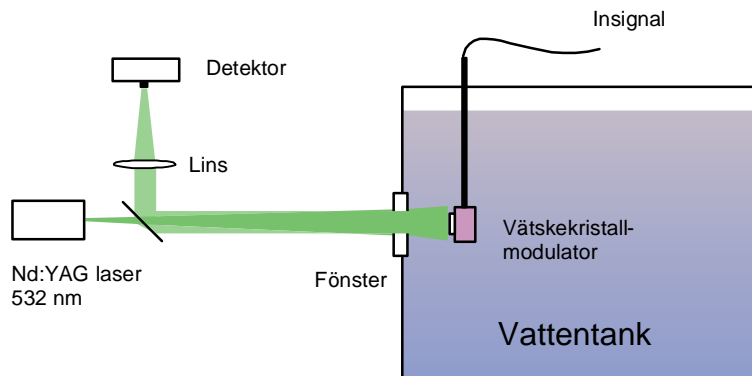
6.1.1 Utvärdering av retrokommunikationslänk baserad på vätskekristallteknik

Som ett första alternativ studeras ferroelektriska vätskekristallmodulatorer där kommersiella modulatorer används. En retroreflektor bestående av en hörnkub av glas eller speglar kombineras med FLC-modulorn. Våglängden väljs till $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ vilken både är ögonsäker och svår att upptäcka med konventionella EO-sensorer. Genom att använda en FLC-modulator kan information överföras med hastigheter av storleksordningen 10 kb/s. En utrustning för att utvärdera retromottagare byggs upp bestående av en "bread-board" där laser, mottagare och lämplig optik för strålformning placeras. För att utvärdera retromottagaren tillverkas styr- och drivelektronik. Ett vridbord som styrs med hjälp av en personator används för att studera riktningberoendet hos retromottagaren. I figur 27 visas ett exempel på hur en experimentell uppställning för att utvärdera och demonstrera en retrolänk kan utformas. Syftet med den experimentella verksamheten under år 2001 är att konstruera och utvärdera en retromottagare baserad på FLC-modulatorer.

6.1.2 Vätskekristallmodulatorer under vattenytan

Ett annan viktig frågeställning är att studera och utvärdera hur modulatorer uppför sig under vattenytan. Som tidigare nämnts transmitterar vätskekristallmodulatorer ljus i det blågröna våglängdsområdet vilket gör dem till intressanta kandidater för retromodulation under vattenytan. Innan mätningar över längre avstånds utförs behöver retromodulatorerna utvärderas för bruk under vatten vilket kan ske i en vattentank enligt

figur 30. Här kan frågor som t.ex. spridningseffekter i vattnet, rikttningsberoende och kontrastförhållande studeras. Den praktiska utformningen av retromodulatorens för undervattensbruk är också något som måste beaktas.



Figur 30. Utvärdering av vätskekristallmodulatorer under vattenytan.

6.1.3 Vätskekristallmodulatorer - nya koncept

Nya vätskekristallmaterial är under utveckling som är betydligt snabbare än konventionella FLC-material. En möjlighet som tidigare nämnts (se 4.1.1) är att reducera omslagsvinkeln något som har visat sig möjliggöra omslagstider under 1 μ s med acceptabelt kontrastförhållande. Här är det av stort intresse att studera och undersöka dessa material för tillämpningar som retromodulator. Elektroklina vätskekristaller är snabbare jämfört med FLC och en snabb materialforskning sker inom området. Ett annat område som är intressant för snabba modulatorer är ickeinjära optiska fenomen i vätskekristaller.

6.2 Teoretiska modeller

Parallellt med den experimentella verksamheten utvecklas modeller för att uppskatta prestanda och utvärdera olika koncept. En övergripande modell bör beskriva lasersändaren, utbredning av laserstrålen genom atmosfären, effekter av retromottagaren samt utbredning tillbaka till sändaren. Om retromottagaren befinner sig under vatten bör även laserstrålens utbredning i vatten inkluderas.

Optiska modeller för olika utformningar av retromodulatorens bör utvecklas. Här är det viktigt att optiska parametrar som påverkar prestanda inkluderas. Polariseringseffekter är ett viktigt fenomen som måste studeras om vätskekristaller används. Utformningen av retroreflektorn och dess inverkan på laserstrålens egenskaper är ett annat exempel. De använda modellerna bör jämföras med experimentella resultat.

6.3 Samverkan med demonstratorförslag inom LedSysT

Verksamheten som beskrivits i rapporten har starka beröringspunkter med det demonstratorförslaget som beskrivs i LedSysT-kommunikation. Här beskrivs bl.a. utvecklande av en kommunikationsboj för demonstration. De operativa behoven för kommunikation till ubåt beskrivs vara av storleksordningen 1 till 300 Mb/s via undervattensnoder. Dagens befintliga system för kommunikation tillåter dataförflyttningar mellan 1 till 10 kb/s, där hydroakustik, långvågig radio eller elektrodsystem används. I LedSysT-kommunikation föreslås en

optisk luftbaserad länk baserad på retrokommunikation som tillåter datatakter av storleksordningen, 200-400 kb/s. Verksamheten beskriven i den här rapporten kan delvis fungera som underlag till utvecklande av en demonstrator.

7 REFERENSER

- [1] G. Bolander, A. Ekdahl, B. Knuthammar, L. Sjöqvist och O. Steinvall, "Fri optisk kommunikation. En förstudie", FOA-rapport, FOA-R--99-01296-504--SE, 1999.
- [2] S. Hård, S. Jacobsson, B. Löfving, U. Olin, P. Rudquist, L. Sjöqvist, O. Steinvall and S. Walles, "Laser Beam Steering - An Introductory Study", FOA Report, FOA-R--99-01158-408--SE, 1999.
- [3] F. Kullander, B. Knuthammar "Fiber laser hydrophones, an introductory survey", FOA Report, FOA-R--00-01779-409--SE, 2000.
- [4] T. Ramquist, "Hydrooptiska transmissionsmätningar utförda vid FOA under 1970-talet i svenska vatten", CH-30136-E1, 1984.
- [5] K.Koppari och O.Steinvall, "FLASH: Slutrapport februari 1991", FOA rapport, FOA CH 30286-3.1, 1991.
- [6] K.Koppari, U. Karlsson, O.Steinvall FOA, R. Ellsén, A.Lundberg, L.Thunberg, "FLASH: Utvärdering prov 1991", FOA rapport, FOA CH 30298-3.1, 1992.
- [7] R.E. Walker och J.W. McLean," Lidar equations for turbid media with pulse stretching", *Appl. Optics*, Vol. 38, no. 12, sid. 2384-2397, April 1999.
- [8] D.E. Kelley, C.Y. Young och L.C. Andrews, "Temporal broadening of ultra-short space-time Gaussian pulses with applications in laser satellite communications", *Proc. SPIE*, vol. 3266, sid. 231-240, 1998.
- [9] J. Tessorf, "Measures of temporal pulse stretching", *Proc. SPIE*, vol. 1750, sid. 407-418, 1992.
- [10] C. Tan och R. T. Carlson, "Liquid crystal for lasercom applications", *Proc. SPIE*, vol. 1417, sid. 391-401, 1991.
- [11] H. Xu, A. B. Davey, T. D. Wilkinson och W. A. Crossland, "Optically enhancing the small electro-optical effect of a fast-switching liquid-crystal mixture", *Opt. Eng.*, vol. 39, sid. 1568-1572, 2000.
- [12] H. Xu, A. B. Davey, T. D. Wilkinson och W. A. Crossland, "A simple method of optically enhancing the small electro-optical response of fast switching electroclinic liquid crystals", *Appl. Phys. Lett.* vol. 74, sid. 3099-3101, 1999.
- [13] C. M Swenson och C. A. Steed, "Low power FLC-based retromodulator communications system", *Proc. SPIE*, vol. 2990, sid. 296-310.
- [14] S. Schmitt-Rink, D. S. Chemla and D.A. B. Miller, "Linear and nonlinear optical properties of semiconductor quantum wells", *Appl. Opt.*, vol. 35, pp. 1180-1186, 1996.
- [15] G.C.G Gilbreath, W.S. Rabinovich, R. Makon et al., "Large aperture quantum well shutters for fast retroreflected optical datalinks in free space", *Proc. SPIE*, vol. 3707, sid. 666-672, 1999.
- [16] G. Charmaine Gilbreath, W. S. Rabinovich, och M. J. Vilcheck, "Modulating Retroreflector Architecture using Multiple Quantum Wells for Free Space Communications", *Proc. SPIE*, vol. 3491, sid. 581-586, 1998.

- [17] I. J. Fritz, T. M. Brennan, B. E. Hammons, A. J. Howard, W. Worobay, G. A. Vawter och D. R. Mayers, "Low-voltage vertical-cavity transmission modulator for 1.06 μm ", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 63, pp. 494-496, 1993.
- [18] I. J. Fritz, B. E. Hammons, A. J. Howard, T. M. Brennan och J. A. Olsen, "Fabry-Perot reflectance modulator for 1.3 μm from (InAlGa)As materials", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 62, pp. 919-921, 1993.
- [19] C. Fan, D. W. Shih, M. W. Hansen, S. C. Esener och H. H. Wieder, "Quantum-confined Stark effect modulators on GaAs", *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 5, pp. 1383-1385, 1993.
- [20] S. Y Wang, G. Hornsburgh, P. Thompson, I. Hauksson, J.T. Mullins, K. A. Prior och B. C. Cavenett, "Room temperature ZnSe/ZnCdSe bistable self-electro-optic effect device operating at 488 nm", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 63, pp. 857-859, 1993.