

Johan Öhgren, Andreas Olsson, Stan Zyra

Utvärdering av vätskekristallmodulatorer och retroreflektorer för laserkommunikation

TOTALFÖRSVARETS FORSKNING SINSTITUT

Sensorteknik
Box 1165, SE-581 11 Linköping
Systemteknik
SE-172 90 Stockholm

FOI-R--0794--SE

Januari 2003

ISSN 1650-1942

Underlagsrapport

Johan Öhgren, Andreas Olsson, Stan Zyra

Utvärdering av vätskekristallmodulatorer och retroreflektorer för laserkommunikation till boj

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Systemteknik SE-172 90 Stockholm	Rapportnummer, ISRN FOI-R--0794--SE	Klassificering Underlagsrapport
	Forskningsområde 4. Spaning och ledning	
	Månad, år Januari 2003	Projektnummer E 6033
	Verksamhetsgren 5. Uppdragsfinansierad verksamhet	
	Delområde 43 Undervattenssensorer	
Författare/redaktör Johan Öhgren Andreas Olsson Stan Zyra	Projektledare Erland Sangfelt	
	Godkänd av Fredrik Kullander/Erland Sangfelt	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning Försvarmakten	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig Fredrik Kullander	
Rapportens titel Utvärdering av vätskekristallmodulatorer och retroreflektorer för laserkommunikation till boj		
Sammanfattning (högst 200 ord) Rapporten behandlar teknik för kommunikation med undervattenssystem via en boj på vattenytan. Kommunikationen sker på en retrolänk, där en fri laserstråle med våglängden 1,55 µm moduleras och retroreflekteras. Utvecklingsarbetet sker genom tillverkning och utvärdering av delkomponenter, upprättande av testlänkar i inomhusmiljö och fälttest med laser mot boj. Modulatorens byggs på celler med ferroelektriska vätskekristaller (FLC). Cellerna tillverkas på FOI. Vätskekristallen används för att modulera polarisationstillståndet hos laserstrålen. Modulationshastigheten är för närvarande 20 kHz och modulationsdjupet 0,90. Drivkort med anpassade egenskaper har tillverkats. Hur retroreflektorn rör sig har betydelse för möjligheten att upprätthålla länken. Därför har mätningar gjorts med vinklade reflektorer i inomhusmiljö, och fältprov har utförts med reflektorer på en boj i vattnet. Mätningar visar att reflekterad irradians är större än 50 % inom en vinkel på 20 grader till en retroreflektor. Det var möjligt att följa en boj ute på sjön med laser på 3,5 km avstånd. Länkbortfall uppstod endast undantagsvis och det gick inte att koppla till sjöstillståndets inverkan eller atmosfärsturbulens. Testlänkar inomhus har kunnat överföra information på upp till 180 m. Kortare textmeddelanden överfördes snabbare än 1 kbit/s.		
Nyckelord laser, kommunikation, retromodulator, vätskekristall, FLC, undervattenskommunikation, kommunikationsboj		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 29	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency System Technology SE-172 90 Stockholm	Report number, ISRN FOI-R--0794--SE	Report type Base data report
	Programme Areas 4. C4ISR	
	Month year January 2003	Project no. E 6033
	General Research Areas 5. Commissioned Research	
	Subcategories 43 Underwater Sensors	
Author/s (editor/s) Johan Öhgren Andreas Olsson Stan Zyra	Project manager Erland Sangfelt	
	Approved by Fredrik Kullander/Erland Sangfelt	
	Sponsoring agency Swedish Armed Forces	
	Scientifically and technically responsible Fredrik Kullander	
Report title (In translation) Investigation of Liquid Crystal Modulators and Retroreflectors for Laser Communication to Buoy		
Abstract (not more than 200 words) <p>This report describes a technique for communication with underwater systems via a buoy on the surface of the sea. The communication takes place on a retrocommunication link, where a free-space laser beam at 1.55 μm is modulated and retro-reflected.</p> <p>The technique is developed by manufacturing and testing of sub-components, by setting up indoor test links, and by field tests with buoy and laser.</p> <p>The modulator is based on glass cells with ferroelectric liquid crystal (FLC). The final cells are manufactured at FOI. The liquid crystal is used to modulate the polarisation state of the laser beam. For the time being, the modulation speed is 20 kHz and the modulation depth is 0.90. Drive cards adapted to the application have been developed.</p> <p>The way the retroreflector moves is affecting the ability to maintain the link. Measurements have therefore been performed indoors on tilted reflectors and field tests have been made with reflectors on a buoy on the surface of the sea. Results show that reflected irradiance from a retroreflector is larger than 50 % within a cone angle of 20 degrees. It was possible to follow a buoy on the sea at a distance of 3.5 km with a laser. Link interruption occurred only in exceptional cases, and it could not be derived to the seaway or atmospheric turbulence.</p> <p>Indoor test links have been used to transfer information up to 180 m. Short text messages were transferred at rates faster than 1 kbit/s.</p>		
Keywords laser, communication, retromodulator, liquid crystal, FLC, underwater communication, communication buoy		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 29	
	Price acc. to pricelist	

Innehållsförteckning

Inledning	5
Delsystem.....	6
Vätskekristallceller av FLC-typ.....	6
Elektronik för drivning av FLC-celler	8
Retroreflektorer.....	9
Simulering av retromodulator	11
Fältförsök med retroreflektorer.....	13
Bakgrund.....	13
Genomförande.....	14
Utrustning	14
Resultat	18
Retrolänksystemet.....	20
Uppställning.....	20
Informationsöverföring.....	20
Alternativa konstruktionssätt för laserenhet och retromodulator.....	23
Diskussion.....	25
Slutsatser.....	27
Förkortningar	29
Referenser	29

Inledning

Ett framtida ledningssystem för försvarsmakten är tänkt att vara nätverksbaserat, vilket bland annat innebär att information ska kunna överföras på ett säkert sätt mellan informationssystem av olika slag. En viktig del i förändringsarbetet är demonstratorer för utveckling och prov av samfunktion och systemprestanda. [1]

Institutionen för Marina Sensorsystem på FOI driver ett projekt för att ta fram teknik och metoder för samband med enheter och system under vattnet, där en metod av flera är laserburen kommunikation. Ett viktigt motiv är att kunna upprätta nya och förbättrade samband till och från ubåt, obemannade undervattensfarkoster och andra undervattenssystem.

Institutionen för Lasersystem på FOI deltar i arbetet genom byggandet av en demonstrator för kommunikation från land eller luft till undervattenssystem, via en kommunikationspunkt på vattenytan. Kommunikationen från punkten på vattenytan sker på en retrolänk där en fri laserstråle moduleras och retroreflekteras. Enheten som både modulerar och reflekterar kallas för retromodulator. Modulationen utförs med hjälp av en polarisator och en cell med vätskekristaller, vilken har förmågan att ändra strålningens polarisationstillstånd. Reflektionen sker i ett kubiskt hörn, antingen i form av speglar eller av ett solitt glasprisma.

Målet är att vidareutveckla de befintliga försöksuppställningarna för retrolänken. Modulatorn med vätskekristall utvecklas därför för att uppnå större irradiansvariationer i modulationen. Att förstå hur reflektorn påverkar modulationen är också viktigt. Hur reflektorn rör sig har betydelse för möjligheten att upprätta och upprätthålla länken, och därför har fältprov utförts med retroreflektorer på en boj i vattnet, liksom mätningar på vinklade reflektorer i laboratoriemiljö. Det har också funnits ett behov av att konstruera ny elektronik för att driva modulatorn.

Delsystem

Vätskekristallceller av FLC-typ

Tillverkning och egenskaper

FOI Lasersystem har färdigställt 15 egna vätskekristallceller under projektets gång. Tomma glasceller¹ har värmts på ett temperaturbord och fyllts med vätskekristall. Hållrummet i cellerna bildas av två glasplattor som är åtskilda ett par μm . Storleken på detta cellgap har varit olika, och några olika sorters vätskekristall har provats. Tillverkningen har följt en färdig plan med temperaturändringar och pålagt elektriskt fält, och samtidigt har processen övervakats med ett polarisationsmikroskop.

Alla vätskekristaller som provats har ferroelektriska egenskaper, vilket benämns FLC, ferroelectric liquid crystal. Molekylerna i vätskekristallen kan vridas till två olika ändlägen med hjälp av ett elektriskt fält med olika riktning. Ändlägena är fixa och ändras inte med fältstyrkan, vilket kan vara en fördel. Till detta kommer att vätskekristallen är bistabil, vilket innebär att molekylerna stannar i sitt ändläge även om fältet försvinner. Vanligen utnyttjar man inte mellanlägen, men möjligheten finns hos vissa FLC:er. De vätskekristaller som vi provat har egentligen inte FLC-egenskaperna i sig själva, utan för att åstadkomma detta krävs att vätskekristallen hålls i ett tunt skikt mellan två ytor som hjälper till att ordna molekylerna. En fullständigare beteckning för vätskekristalltyperna är därför SSFLC, surface stabilised ferroelectric liquid crystal.

För att få vätskekristallen att slå om mellan de två ändlägena räcker det i princip att lägga en bipolär fyrkantspänning mellan cellens två ytor. Omslagshastigheten kan emellertid ökas genom att spänningspulserna formas med en inledande stark spänningstopp. Resten av pulsen behöver bara ha en låg så kallad hållspänning.

Karakterisering

Cellerna modulerar polarisationstillståndet för polariserad strålning, och genom att placera cellen mellan två polarisatorer kommer irradiansen på den strålning som passerar att moduleras. Flera av cellerna har fått sin modulationsförmåga karakteriserad genom att placeras i en sådan uppställning. Irradiansen på den transmitterade strålningen har mätts med en fotomottagare. Ett mått på modulationsförmågan är *modulationsdjupet* (MD), som definieras med hjälp av den modulerade signalens två irradiansnivåer I_{max} och I_{min} :

$$\text{MD} = (I_{\text{max}} - I_{\text{min}}) / I_{\text{max}}$$

¹ E.H.C., Japan.

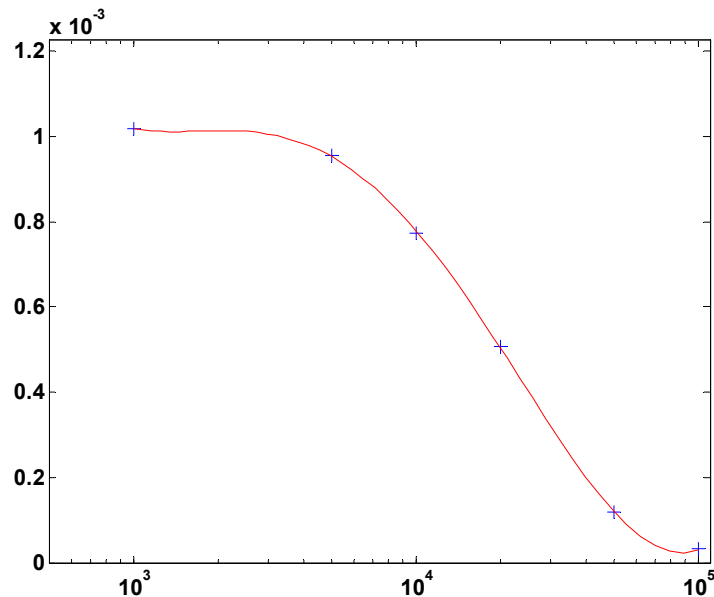
Modulationsdjupet (MD) för några FLC-celler redovisas i Tabell 1.

Tabell 1 Uppmätta modulationsdjup.

cellbe- teckning	modula- tionsdjup (MD)	frekvens (kHz)	elektrisk fältstyrka (V/ μm)	cellgapstjock- lek (μm)	vätskekristall
C1	0,94	20	± 13	6	ZLI-4654-100 ²
C2	0,41	20	± 13	6	ZLI-4851-100 ²
C3	0,66	20	± 6	6	FELIX-017/100 ³
C4	0,72	20	± 13	6	FELIX-018/100 ³
D1	0,56	20	± 5	4	FELIX-017/100 ³
D2	0,49	20	± 5	4	FELIX-018/100 ³

Nyligen införskaffades ytterligare en sorts vätskekristall, FELIX-020. Det är en av de vätskekristaller på marknaden som ska ha den kortaste omslagstiden.

Vätskekristallgruppen på Chalmers fyllde ett par celler med denna kristall, och cellerna utvärderades i mätupställningen på Lasersystem. Figur 1 visar hur uppmätt spänningsvariation i kvadrat (motsvarar elektrisk effekt) varierar med ökad frekvens.



Figur 1 Modulationskaraktistik för vätskekristall FELIX-020.

Fotomottagarens spänningsvariation i kvadrat (elektrisk effekt) är mätt som funktion av drivspänningens frekvens.

Horisontalaxeln: Frekvens (Hz)

Vertikalaxeln: Detekterad spänning i kvadrat (V^2)

Spänningsvariationen minskar till hälften vid ungefär 19 kHz, vilket alltså kan sägas vara denna modulators bandbredd. Detta är betydligt långsammare än vad tillverkaren

² Merck KGaA, Darmstadt, Tyskland: Licristal, ferroelectric smectic mixture.

³ Hoechst AG, FELIX Ferroelectric Liquid Crystals

anger: Under ideala förhållanden ska vätskekristallen kunna slå om med 200 kHz med bibehållen modulerad spänning.

En eller ett par nya celler med detta material kommer att tillverkas vid Lasersystem för att se om modulationshastigheten kan förbättras.

Elektronik för drivning av FLC-celler

Elektronikens uppgift

Elektronikens uppgift är att anpassa en styrsignal med låg spänningsnivå till en drivsignal med hög nivå. Drivsignalen skall driva FLC-cellerna och variera deras dubbelbrytande förmåga. Därigenom moduleras polarisationen hos laserstrålen så att den blir informationsbärande.

FLC-cellernas parametrar är ännu inte givna fullt ut, utan är föremål för utprovning och varierar beroende på konstruktion. De elektriska parametrar vars magnitud inverkat mest på drivelektronikens konstruktion är FLC-cellernas kapacitans och drivspänning. Drivspänningen är tänkt att variera från några volt till hundratalet volt.

Kurvformen skall kunna väljas vara komplex och bipolär med en frekvens upp till 100 kHz. Gränssättande är FLC-cellernas kapacitans som sänker pulsernas omslagshastighet (slewrage, V/s). Det vill säga, ju högre kapacitans desto längre tid att uppnå given spänning och desto lägre övre gränshastighet för drivningen.

Drivelektroniken har konstruerats, genom överdimensionering, så att den bör klara de hitintills givna drivförhållandena.

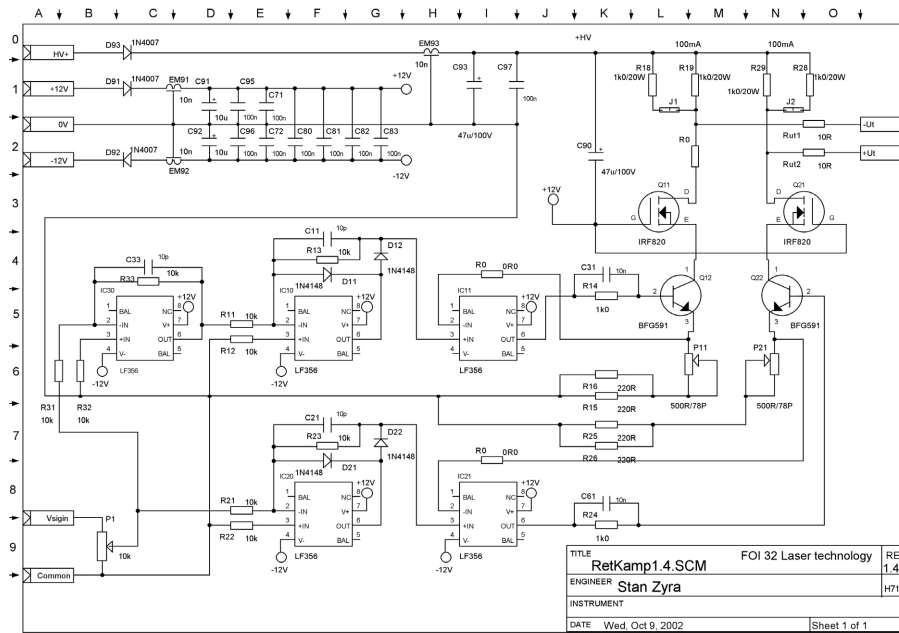
Utförande och funktion

Elektroniken består av två kort utförda i enkelt Europaformat. Det första kortet är ett drivkort⁴, vilket består av en uppsättning DC/DC-omvandlare som drivs av en spänning på 12 V. Ut från kortet ges drivspänningar på +12 V, -12 V samt en högspänning. Dessa spänningar är galvaniskt skilda från drivspänningen. Högspänningen kan varieras från noll till 85 V. Spänningen väljs först grovt genom bygling till ett område tiotalet volt över önskad utspänning. Därefter finjusteras spänningen till önskad spänning med potentiometern.

Det andra kortet, ett förstärkarkort⁵, består av en differentiell högspänningseffektförstärkare med ingångar (V_{sign} , Common; se Figur 2) samt utgångar (+ U_t , - U_t) att kopplas till elektroder på FLC-cellen.

⁴ Produktbeteckning RetKdriv2.4 per 2002-10-08, konstruerat av Stan Zyra vid FOI Lasersystem.

⁵ Produktbeteckning RetKamp1.4 per 2002-10-09, konstruerat av Stan Zyra vid FOI Lasersystem.



Figur 2 Förstärkarkort som skapar bipolär drivspänning till FLC-cellen.

Den bipolära ingångssignalen vars amplitud kan justeras via potentiometern P1 påföres en inverterare (IC30). Signalen före inverteraren förs vidare till en likriktarkrets, på samma sätt som signalen efter inverteraren. Likriktarkretsarna efterföljs av drivsteg i varsin gren av en differentiell förstärkare. En bipolär utsignal bildas som skillnadsspänning mellan differentialförstärkarens båda utgångsgrenar (+Ut, -Ut).

Framtida utförande

Vid en produktifiering kommer de då använda vätskekristallcellerna ha väl kända egenskaper. Detta medför att drivelektroniken kan optimeras till dessa parametrar och därigenom utföras enklare. Vad som då kommer vara känt, som idag är okänt, är främst drivspänning och pulsutseende. Eftersom pulsutseendet inte är känt idag så har ingen pulsformare implementerats i drivelektroniken. En framtida produkt torde ha en sådan pulsformare.

Retroreflektorer

Vridning kring längsaxeln

Ser man in i en retroreflektor utefter längsaxeln (normalen till frontytan) så är den indelad i tre likadana sektorer kring axeln. Geometriskt sett spelar det ingen roll var strålen går in; den kommer alltid ut i motsatt riktning (fast från en annan punkt). Däremot verkar det som att polarisationstillståndet för den linjärpolariserade strålningen kan ändras av reflektorn, och det har betydelse eftersom irradiansen ut från modulatern påverkas.

Ett första test har utförts där ett glasprisma vridits kring sin längsaxel och reflekterad irradians mätts upp. Prismat ingick i en retrolänk med en polariserande stråldelare i laserenheten. När prismat vreds ett varv kunde man tydligt se irradiansen variera i tre perioder, motsvarande prismats tre sektorer. Irradiansen sjönk som mest från maximumvärdet med 30–50 %. Från detta enkla test kan vi dra slutsatsen att irradiansen påverkas av prismats orientering och att det förmodligen beror på att polarisationstillståndet påverkas. Testet sade dock ingenting om på vilket vis

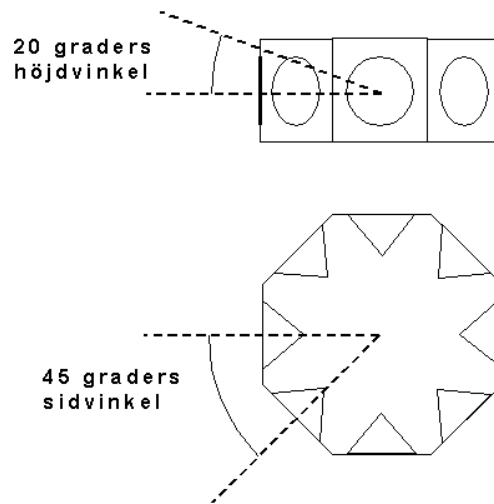
polarisationen ändrades. Vi kan inte heller utesluta att själva geometrin hos retroreflektorn haft betydelse, vilket den har om bestrålningen är ojämn.

Ett noggrannare test är nära förestående, där polarisationsplanen både för ingående och utgående stråle kommer att vara kända. Våglängden kommer att vara en annan, 856 nm, eftersom mätningen ingår i ett angränsande projekt. Det kan därför vara svårt att direkt överföra resultatet till vår aktuella våglängd 1550 nm. Ett liknande test skulle även kunna utföras med 1550 nm om befintlig testbänk byggs om.

Vinkling i sida och höjd

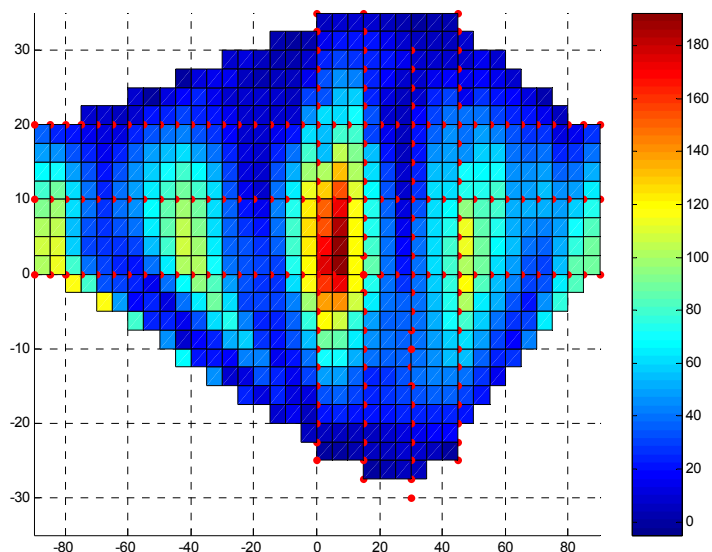
En uppsättning retromodulatorer som monteras på en boj för kommunikation kommer att röra sig kring såväl en vertikal som en horisontal axel. Den stråle som sänds ut från laserenheten kommer därför att träffa reflektorerna med olika vinkel. Därmed kommer också irradiansen att variera hos den reflekterade strålen.

För att undersöka irradiansvariationen och för att se hur enkla system med retromodulatorer fungerar så monterades åtta glasprismor kring ett cylindriskt åttkantigt block, se ritning i Figur 3. Framför dessa sattes glasceller av samma sort som används till modulatorerna. Emellertid användes inga kompletta modulatorer, utan dels saknade glascellerna vätskekristallfyllning, dels sattes inga polarisatorer framför prismorna och cellerna.



Figur 3 Uppsättning med åtta stycken glasprismor i ring.

Blocket med prismor och en laserenhet placerades i inomhusmiljö på så vis att laserstrålen fick en gångväg på 180 m dem emellan. Blocket kunde vridas varvet runt i sidled och ges en höjdsvinkel mellan $\pm 30^\circ$ (Figur 3). En fotomottagare som hörde till laserenheten mätte irradiansen hos den reflekterade laserstrålen och gav ut en spänning.



Figur 4 Uppmätt irradians från vinklad uppsättning med prismet.
Irradiansen har maximum för de vinklar där något prisma är riktat rakt mot laserstrålen. *Horisontalaxeln*: sidvinkel (grader); *vertikalaxeln*: höjdvinkel (grader); *färgskalan*: reflekterad irradians (relativa enheter).

Blocket ställdes in med ett av prismorna riktat rakt mot strålen, och fokuseringen hos laserstrålen justerades med hjälp av laserenheten för att täcka uppsättningen och ge en stark signal. Blocket vinklades sedan i höjd- och sidled och signalen från reflekterad stråle mättes upp. Det visade sig att vinklingen påverkade irradiansen avsevärt. Man skulle annars kunna tro att vinkeln inte spelar så stor roll, eftersom prismorna på ömse sidor om det förstnämnda prismet också bidrar till reflektionen. Irradiansen sjönk inte lägre än halva maximumvärdet så länge sid- och höjdvinkeln höll sig inom 20 grader. Irradiansen hade också maximum vid -90 , -45 , 0 , 45 och 90 grader, vilket var de positioner då något prisma var riktat rakt mot laserstrålen.

Simulering av retromodulator

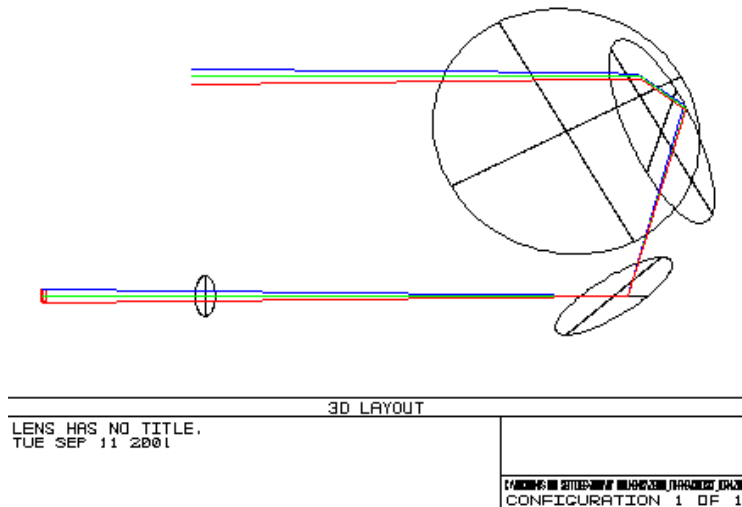
Retromodulatorn med dess polarisator, vätskekristall och retroreflektor kan relativt enkelt modelleras med Jones-formalism (beskrivet t.ex. i [2]). Modellen implementeras sedan i exempelvis Matlab⁶, vilket har gjorts på Lasersystem. Man kan därefter enkelt variera parametrar såsom ingående stråles irradians, påverkan av polarisatorn, axlarnas vinklar i vätskekristallen och dess dubbelbrytning. Med ett enkelt användargränssnitt är det snabbt gjort att ändra parameterinställningarna och på nytt simulera utgående irradians. Programmet kan också själv göra beräkningar för en hel uppsättning med parametrar, exempelvis för varje grad då polarisatorn vrids ett varv.

Simuleringsprogrammet användes för att ge en uppfattning om vad modulationsdjupet skulle bli för till exempel olika cellgapstjocklekar. Vi kunde därmed välja rätt sorts cell för den senaste vätskekristallssorten.

⁶ The MathWorks, Inc.: Matlab 6.0 Release 12.

Vid sammansättningen av demonstratorn kommer vi att kunna använda programmet för en första inställning av polarisatorns vinkel. Programmet kan också modifieras om retromodulatorn eller lasersändaren ändras, till exempel med andra polariserande komponenter. När det blir känt hur retroreflektorn påverkar polarisationsriktningen måste detta också tas med i modellen. Det låter sig göras mer eller mindre enkelt beroende på hur sambandet ser ut.

Ett annat simuleringsverktyg är ZEMAX⁷ som kan användas för att konstruera och optimera optiska system genom att räkna på strålgången. Ett försök att modellera en retroreflektor ses i Figur 5. ZEMAX har god potential för att modellera viktiga komponenter som stråldelare, strålbreddare, dubbelbrytande kristaller, retroreflektorer med mera. Man kan till exempel beräkna vad irradiansen blir på en tänkt fotomottagare under olika förhållanden. Att inte det här programmet använts i någon större utsträckning hittills beror på att användarkompetensen rörande ZEMAX ännu inte byggs upp vid Lasersystem.



Figur 5 Strålgång i retroreflektor (kubiskt hörn av speglar).

Ett par personer på Lasersystem kommer därför att gå en introduktionskurs i ZEMAX i närtid, och förhoppningen är att programmet ska kunna användas för simuleringar i det fortsatta arbetet.

⁷ Focus Software, Inc, Tucson, USA: ZEMAX-EE Optical Design Program.

Fältförsök med retroreflektorer

Bakgrund

Ett sätt att etablera en kommunikationslänk till undervattenssystem är att kommunicera med utnyttjande av laser på en plattform i luften eller på land som rikttas och låses till en boj på vattenytan. Kommunikation från undervattenssystemet sker genom modulering av laserstrålen via retromodulatorer på bojen.



Figur 6 Laserenheten "Vita valen" positionerad på Ombergs västra sluttning.

Det här mättillfället var tänkt att ge en första praktisk erfarenhet av att låsa ett lasersystem mot en boj försedd med retroreflektorer. En osäkerhet var hur bojen skulle röra sig på vattenytan och om dess rörelser skulle ge upphov till avsevärd störning av en etablerad laserlänk. För mätningen anordnades en boj med viss stabilisering på enkelt sätt. Bojen bestyckades med en krans av retroreflektorer så att den återspeglade oberoende av dess orientering kring vertikalaxeln. Reflektorerna var av typen med tre speglar som bildar ett hörn på en kub. De var förhållandevis stora med ett ostört synfält. En tidigare utvecklad laser med följefunktion användes som sändar- och mottagarsystem (syns i Figur 6). Mätningen kan ses som en förberedelse för kommande mätningar mot en boj bestyckad med typ och mängd av reflektorer motsvarande ett mer realistiskt fall för retrokommunikation. Såväl den effektiva arean på reflektorerna som deras synfält förväntas begränsas avsevärt då en amplitudmodulator ska monteras i anslutning till retroreflektorn.

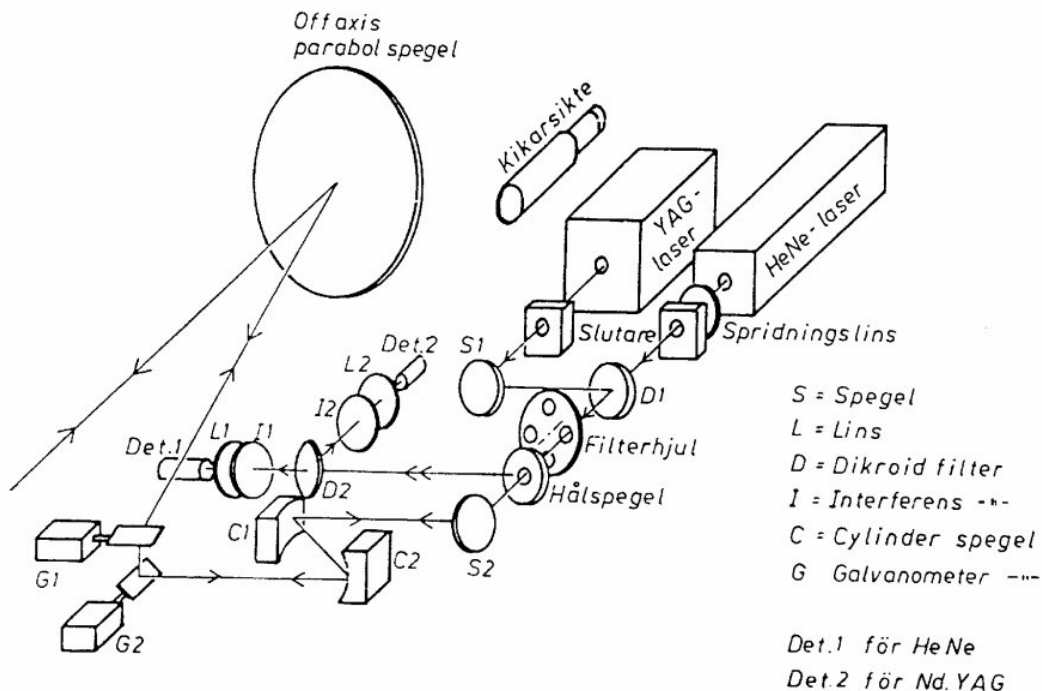
Genomförande

Mätningarna ägde rum vid Vätterns östra strand på sluttningarna av Omberg alldeles i närheten av Borghamn (Figur 6). Det var växlande väder med tidvis regn och vind uppskattningsvis mellan 4–8 m/s från SSV. Lasersystemet, den så kallade Vita valen utvecklad av Göran Bolander med flera på FOI, riggades upp på en klippavsats på uppskattningsvis 30 m höjd (± 10 m). Tält användes för att regnskydda utrustningen. Bojen placerades ut i nära västlig riktning ut från klippavsatsen. FOI:s båt med utombordare användes för att placera ut bojen. Först förankrades bojen på nära håll, cirka 250 m, därefter genomfördes mätningar mot reflektorerna på båten med ökande avstånd uppåt 4 km. Slutligen fälldes bojen och fick driva fritt på avstånd mellan 1300 och 2300 m. Under loppet av det sistnämnda monterades bländare med olika apertur framför reflektorerna. Med de förhållanden som rådde kom mätningarna att ske med vågornas huvudriktning ungefär från sidan i förhållande till siktlinjen mot bojen.

Utrustning

Laser (Vita valen)

I följande figur visas den principiella mätuppställningen. Lasersystemet beskrivs i [3]. Observera att där ND:YAG-laser nämns använde vi i stället en GaAlAs-laser på 820 nm i fältförsöket.



Figur 7 Sprängskiss av lasersystem (Vita valen).

Nd:YAG-laserstrålen ensas med HeNe-laserstrålen med hjälp av en dichroidspegel D1 som är transparent för våglängden under 700 nm och reflekterande för längre våglängder. Inriktningen underlättas av den snedställda spegeln S1. HeNe-lasern har försetts med en spridningslins (fokallängd 125 mm) för att ge samma divergens som Nd:YAG-lasern. Elektromekaniska slutare framför respektive laser kan styras från datorn. Ett programmerbart filterhjul med tre gråfilter (transmission 9,4 %, 1,2 % och

0,12 %) samt en filterplats utan filter för 100 % transmission. Laserstrålen har liten stråldiameter (mindre än 2 mm) när den passerar i den hålspegel som sedan följer. Den mottagna laserreflexen har betydligt större diameter (cirka 12 mm) och riktas av hålspegeln mot detektordelen. Större delen av den reflekterade strålen (cirka 90 %) kommer att speglas in mot detektordelen och det är betydligt gynnsammare än om en halvgenomskinlig spegel skulle använts, vilket skulle ha gett ett maximalt utnyttjande av 25 % (utgående stråle 50 % och reflekterad 50 %) av den tillgängliga lasereffekten.

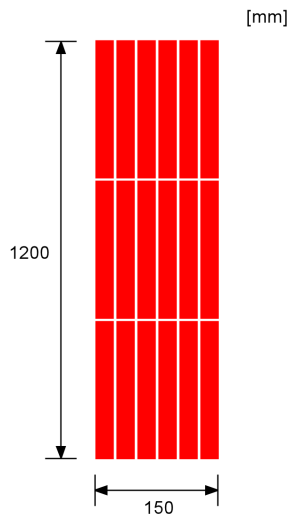
Med en spegel S2 riktas laserstrålarna mot två cylinderspeglar C1 (krökningsradie i horisontalplanet, fokallängd 77,5 mm, och bredd \times höjd = 15 \times 12 mm) och C2 (krökningsradie i vertikalplanet, fokallängd 38,5 mm, och bredd \times höjd = 11 \times 11 mm) vilka reglerar stråldivergensen i vertikal- respektive horisontalled. Båda cylinderspeglarna kan injusteras var för sig. I horisontalplanet skall divergensen vara diffraktionsbegränsad (cirka 0,1 mrad) och 2–4 mrad i vertikalplanet.

Galvanometerskannrarna⁸ som avlänkar laserstrålarna i vertikal- och horisontalled är placerade innanför fokus av off-axis-parabolspegeln P1. Storleken på respektive galvanometerspegel avpassas efter randstrålarna hos den mottagna laserreflexen och dimensionerna på efterföljande optikkomponenter. Den första spegelgalvanometern avlänkar laserstrålen i horisontalled och den andra i vertikalled. Resultande täckningsyta visas i Figur 8. Storleken på speglarna är 17 \times 11 respektive 25 \times 35 mm. Avsökningfrekvensen är maximalt cirka 200 Hz vid fullt spegelutslag.

Efter skannerspeglarna riktas laserstrålen mot en off-axis parabolspegel och har där ett tvärsnitt av cirka 20 \times 25 mm. Laserstrålens avsökning i objektplanet åstadkoms genom att skannerspeglarna, belägna mellan fokus och parabolspegeln, sveper över parabolspegeln och utnyttjar en del av denna momentant.

Off-axis-parabolspegeln (aluminium, fokallängd 250 mm, diameter 200 mm, vinkel mellan optisk axel och mittpunkt på parabolspegeln är 25°) är måttbeställd och diamantsvarvad av Aero Research Inc. i USA. Parabolspegeln är försedd med ett dielektriskt skikt med goda reflexionsegenskaper ($R > 90\%$) inom ett brett våglängdsområde (500 nm–10 μ m). Vid leveransen upptäcktes defekter såsom fina repor och partiklar inbakade i det dielektriska skiktet. Detta bedöms dock inte begränsa prestanda i nämnvärd utsträckning.

⁸ General Scanning



Figur 8 Täckningsyta för laserstråle som avlänkas 5 ggr i horisontalled och 2 ggr i vertikalled. Måttangivelserna ovan är beräknade utifrån antagandet att lasern befinner sig på ett avstånd av 500 m från reflektorn. Avlänkningen i x-led antas satt till 10, y-led 300, vilket åstadkommer ovanstående täckningsyta.

Vid detektering av laserreflexer från mål som träffas av laserstrålen utnyttjas den del av parabolspiegelns apertur som ligger inom cirka 50 mm radie runt utgående laserstråle. Därefter leds laserreflexen returvägen via skannerspeglar, cylinderspeglar och hålspegel mot detektoroptiken där en separation av laserreflexen från HeNe- och Nd:YAG-laser sker med en dichroidspegel D2. Framför respektive fotodetektor selekteras laservåglängderna med smalbandiga interferensfilter I1, I2 för att sedan fokuseras med antireflexbehandlade samlingslinser L2, L3 (fokallängd 40 mm) på fotolavindioderna.

Fokuseringsavstånden av laserreflexerna blir ej lika i vertikal- och horisontalplanet (astigmatism) beroende på att cylinderspeglarna är olika fokuserade (se utgående laserstrålförning). Detta medför att bästa fokus i praktiken är svårt att ställa in eftersom detektorytan är något mindre för att reducera mörker- och bakgrundsbrus. En TV sammonterades med laserradarn och synfältet anpassades med zoomobjektiv⁹.

Datainsamling

Mätningarna dokumenterades på VHS-videoband. En videomixer användes för att dela upp videobilden i fyra rutor. Tre mätsignaler från lasersystemet mättes kontinuerligt med oscilloskop. Ett LeCroy-oscilloskop kopplades till utgångar från laserns följesystem. Momentana värden för regleringen av lasersystemets tip- och tilt-speglar visades i XY-mod på oscilloskopet. På det sättet åstadkoms en punkt (signallinje) på oscilloskopet motsvarande laserns pekriktning. X-led på oscilloskopet motsvarade horisontalled (tilt-spegeln) och Y-led motsvarade vertikalled (tip-spegeln). Ett Tektronixoscilloskop presenterade den på lavinfotodioden utlästa signalen. Tabell 2 visar värdena från de båda oscilloskopen och övrig relevant information. Båda oscilloskopen triggades på signalen från tip-spegeln. Videosignaler registrerades dels från lasersystemets interna videosystem, dels från en extern

⁹ Ermitec 17,5 - 1 05 mm

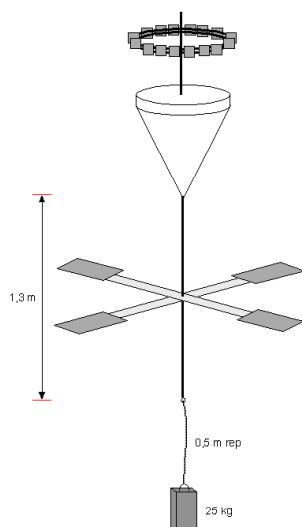
videokamera med vilken bojen kunde zoomas in (åtminstone på de närmsta avstånden). Ingen datorbaserad insamling användes. Två videoband spelades in.

Tabell 2 Mätprotokoll.

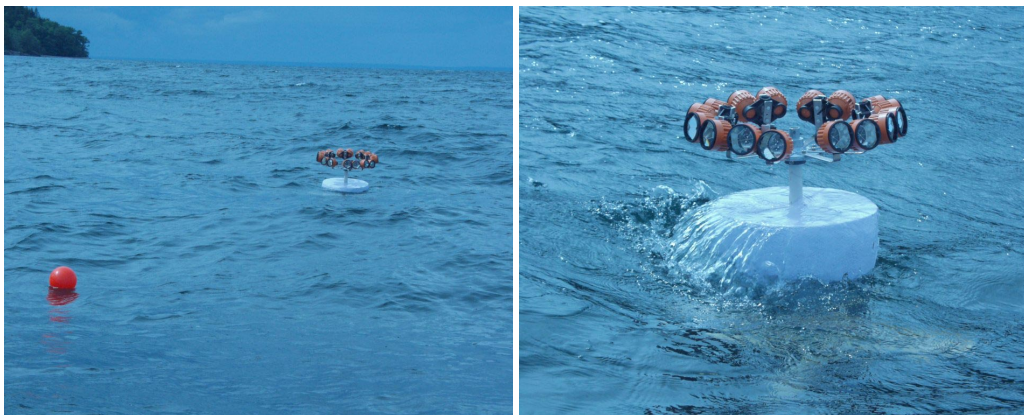
xled	yled	avstånd (m)	klockslag	tracking	fotolavindiod-spänning	kommentarer
5	50	995	12:08	ja	50	boj vid båtfören
5	50	1515	12:17	ja	200	boj vid båtfören
5	50	1640	12:18	ja	200	boj vid båtfören
5	50	1805	12:18	ja	200	boj vid båtfören
5	50	2170	12:20	ja	200	boj vid båtfören
5	50	2305	12:20	ja	200	boj vid båtfören
5	50	2600	12:22	nej	200	laserriktningsändr.
5	50	2725	12:23	ja	200	boj vid båtfören
5	50	2855	12:23	ja	200	boj vid båtfören
5	50	3490	12:26	ja	200	boj vid båtfören
5	50	2810	12:29	ja	200	boj vid båtfören
5	50	1300	13:58	ja	100	regn
5	200	-	14:21	se komm	100	minsta bländare
10	100	-	14:24	se komm	170	tappar ofta läsning
10	100	1725	14:30	se komm	170	större bländare
15	200	-	14:42	se komm	170	tappar läs. ibland
8	200	-	14:44	se komm	170	trackar skapligt
6	200	2240	14:52	ja	170	ej bländare, viktminskning

Boj

Bojen byggdes på Lasersystem och visas i Figur 9 och 10. En 2 m lång aluminiumstång användes som bas. Ett konformat flytblock med måtten diameter 40 cm och höjd 40 cm i skumplast kunde sättas fast på valbar höjd. Blyvikter hängdes i stångens nederände och en stabilisator i form av två korslagda brädor med horisontella fenor kunde anbringas i stångens nederände. En krans med 16 st. retroreflektorer monterades i aluminiumstångens överdel. I princip kunde alla höjder justeras.



Figur 9 Bojkonstruktion.



Figur 10 Bojen med de 16 retroreflektorerna vid mätning 250 m från land.

Resultat

Bortsett från prov med liten bländare för retroreflektorerna var det genomgående enkelt att låsa lasern mot bojen och länkbortfall uppstod endast undantagsvis. Det gick inte att koppla några bortfall till sjötillståndets inverkan. De berodde antingen på att bojen hamnade utanför laserns sökområde eller att siktlinjen bröts av personal på plats.

Räckvidden med den hårdvara som vi här hade var inte begränsad av de 3,5 km vi mätte vid. Följning av bojen uppskattas vara möjlig på väsentligt längre avstånd. Vi studerade dock inte detta närmare eftersom det inte är helt relevant mot bakgrund av att aperturen för de retroreflektorer som kommer i fråga då modulatorer skall ingå i systemet blir väsentligt mindre.

Turbulens gav inga märkbara effekter som till exempel avbrott i följningen. Detta är värt att notera eftersom den kan förväntas ge effekter på de avstånd vi mätte vid. Två saker kan tänkas mildra turbulensinverkan: Dels att lasern står på en höjd en bit ovanför vattenytan, dels att det är just vatten och inte land under strålen. Turbulensgraden var kanske helt enkelt låg.

Vi mätte genomgående med laserlinjen ungefär längs med vågdalar och toppar vilket bör ha minskat inverkan av de synbara krängningseffekterna. De största krängningarna uppstår med förmodan i vågornas utbredningsriktning. En mätning från ett annat håll kan därför ha givit ett sämre resultat. Vi konstaterade dock att det mestadels är en fråga om att anpassa retromodulatorinstallationens synfält efter de maximala krängningar som kan uppstå, vilket principiellt är trivialt om än det kan vålla vissa tekniska problem.

I övrigt, under de omständigheter som rådde under den här mätdagen, fann vi inte att sjötillståndet medförde några särskilda problem. Andra yttre omständigheter; oväder, snö, is etcetera måste naturligtvis tas i beaktande för att ge en fullständig bild av hur väl en dylik boj kan fungera i den här tillämpningen.

Det går att följa och låsa på en boj i sjötillstånd på olika avstånd, och prestanda beror på laserut effekt och retroreflektorapertur. En förutsättning, som möjligen inte är ett måste, är att lasersystemet har en viss höjd i förhållande till vattenytan. Ett ”normalt” sjötillstånd bör inte medföra några särskilda problem vad avser att upprätta en stabil kommunikationslänk. Kortare bortfall, exempelvis om vatten sköljer över bojen, bör kunna hanteras genom att anpassa kommunikationskodningen.

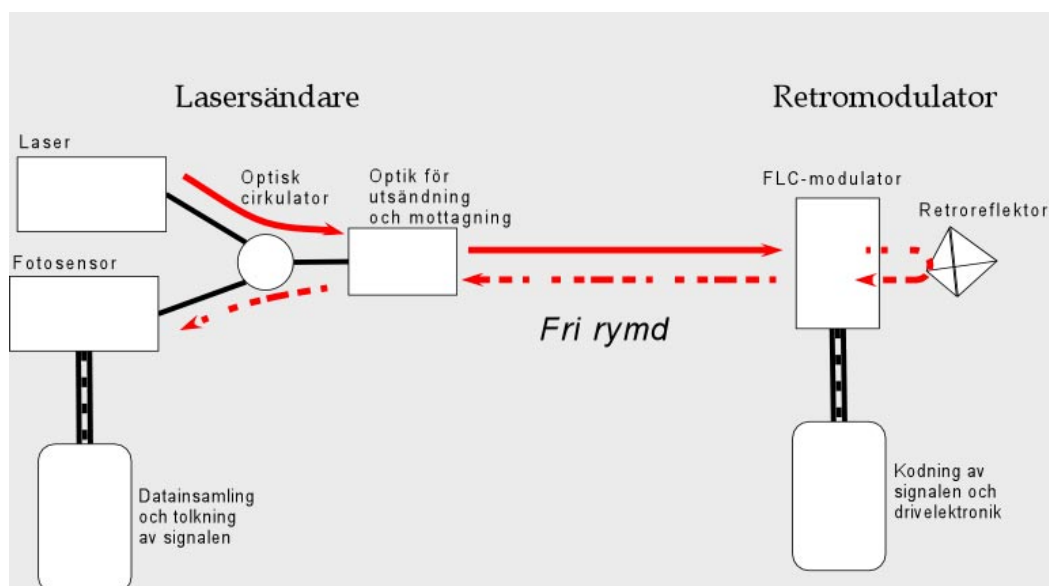
Samma typ av mätning som denna behöver inte upprepas och nästa försök bör ske mot en boj bestyckad med retroreflektorer som är anpassade för de retromodulatorer som vi kan bygga med vätskekristallteknik. Vi planerar därför att modifiera bojen så att vi möjliggör mätningar mot en installation av retroreflektorer med ett antal motsvarande vad vi kommer att ha då modulering provas.

Retrolänksystemet

Uppställning

Ett helt system för att skapa en retrolänk har satts upp i några olika provversioner under året. Systemet har satts upp i inomhusmiljö i en mätthall på FOI i Linköping. Där är det möjligt att prova olika avstånd upp till 180 m mellan lasersändare och retromodulator. För detta avstånd används en spegel för att vika strålgången.

Lasersändarens första uppgift är att tillhandahålla en laserstråle på 1550 nm, vilken breddas och fokuseras på lämpligt sätt och överförs till retromodulatorens. Retromodulatorens i sin tur modulerar strålen och retroreflekterar den till lasersändaren. Strålen går in genom samma öppning som den lämnade lasersändaren, och lasersändarens andra uppgift blir att länka av den modulerade strålen och omvandla irradiansen till en elektrisk signal i en fotomottagare. (Figur 11 visar hela systemet.)



Figur 11 Lasersändaren (delsystem) överför en laserstråle via en optisk fiber genom en optisk cirkulator till optiken för utsändning och mottagning. Retromodulatorens (delsystem) modulerar strålen med ett kodat meddelande och reflekterar tillbaka den. Lasersändaren samlar in strålen och skickar den åt andra hållet genom samma fiber. Den optiska cirkulatorens länkar av den till en sensor. Signalen läses av och tolkas för att återskapa meddelandet.

Informationsöverföring

Bästa resultat

Länken testades först på det korta avståndet 8 m. Ett meddelande kodades och lades ut på retromodulatorens. Både modulatorens styrspänning och uppfångad signal i laserenheten registrerades. I det här fallet gjordes ingen avkodning av uppfångad signal, men fortfarande vid så hög bithastighet som 20 kbit/s var signalen av så god kvalitet att det borde ha varit möjligt med avkodning. Länken provades sedan på det stora avståndet 180 m. Den här gången såväl kodades som avkodades meddelandet. Ett 100 tecken (ASCII-tecken, motsvarar ca 800 bitar) långt meddelande överfördes

med hastigheten 1 kbit/s. Då var signalkvaliteten så god att inga bitfel uppstod. Försök gjordes med överföringar upp mot 10 kbit/s, men då uppstod en hel del bitfel.

Gränssnitt i LabVIEW

Information överförs i länken genom att irradiansen (egentligen polarisationen) hos laserstrålen moduleras till två olika nivåer. Det är därför naturligt att koda informationen binärt. Kodningen av informationen kan emellertid göras på flera olika sätt, till exempel med olika kodsystém, bitrepresentation, start- och stoppssekvenser, indelning i kodpaket och så vidare.

Vi valde enkel information och ett enkelt sätt att koda den för överföringstesterna i länken. Informationen var ett textmeddelande på högst 100 tecken. Varje tecken kodades enligt ASCII i 8 bitar. Först sändes en startsekvens och sedan utan avbrott informationsbitarna. Logiska ettor omvandlades till en positiv spänning (typiskt 20–60 V) och nollor till motsvarande negativa spänning. De här spänningarna användes direkt för att driva modulaton. Det fick inte vara något mellanrum mellan två bitar, så spänningen varierar inte så länge två bitar av samma sort följde på varandra. För att skriva in meddelandet, koda det och sända det använde vi en kommersiell och spridd mjukvara¹⁰ för PC tillsammans med ett datainsamlingskort¹¹.

Samma mjukvara användes för att utläsa informationen i den insamlade signalen. Här var det nödvändigt att tänka på några saker. Eftersom det inte finns någon gemensam trigging i den här retrolänken så måste istället programmet läsa av den insamlade signalen och vänta på bitarna i startsekvensen. När den kommer så triggas programmet att samla in data. Sedan är inte startsekvensen intressant längre, utan kan kastas bort. Ett sätt att direkt göra det är att ha en tillfällig tidsfördröjning innan insamlandet. Avläsningen sker en gång per bit, vilket är den lägsta möjliga hastigheten. Tidsfördröjningen kan justeras så att man säkert läser på signalens stabila nivåer och inte på flankerna. Insamlad data omvandlas sedan till de ursprungliga tecknen med hjälp av ASCII, och meddelandet återskapas.

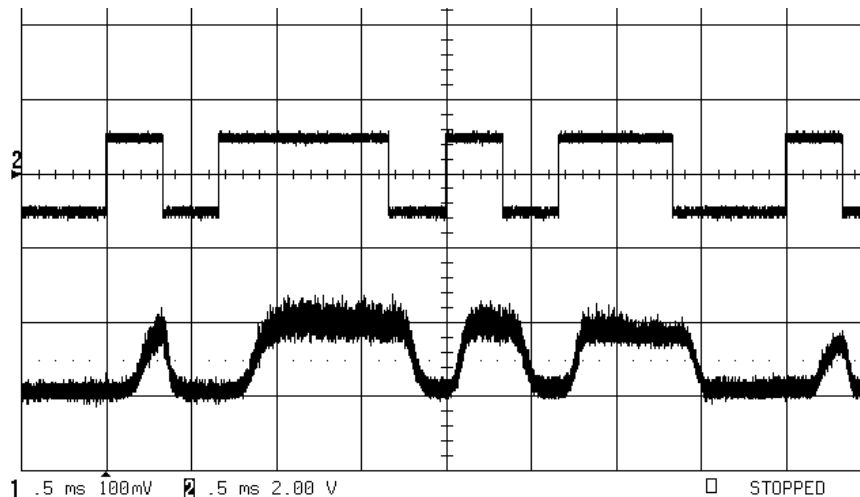
Signalmottagningens begränsningar och förbättringsmöjligheter

Att koda ett textmeddelande och lägga ut det som spänningsvariationer på modulaton är inget större problem. Bithastigheter upp mot 100 kbit/s och därutöver kan åstadkommas med fin pulsform. Men andra faktorer som påverkar signalens utseende är vätskekristallens omslagsförmåga, optiska förluster i retromodulaton och laserenheten, brytningsfenomen i luften, bakgrundsstrålning med mera.

Vid insamlingen av signalen kommer den att ha förvanskats på olika sätt. Figur 12 visar signalen som läggs på modulaton (överst) och det uppmätta svaret (underst). Man ser att signalvariationen blir mycket mindre i förhållande till brus, och om signa/brus-förhållandet blir för dåligt så kan de binära nivåerna i signalen inte längre skiljas åt. Man ser också att svaret blivit förskjutet i tiden. Det beror framförallt på modulatonens omslagstid. I det här provet triggades insamlingen av en startbit, så det spelar ingen roll om signalmönstret blir förskjutet i tiden. På grund av att signalen har en viss omslagstid så får bitarna ett mer ”utslätat” utseende. Eftersom avläsningen (samplingen) sker i jämn takt - samma som utsändningshastigheten - är det viktigt att signalen hinner slå om innan den avläses. Annars finns risk för att biten feltolkas. På grund av instabilitet i länksystemet och ändringar i transmissionsförhållandet kan signalstyrkan ibland variera så att medelnivån och därmed ”kodbilden” förflyttas. Signalvariationens min- och maxvärden kan alltså variera storligen från tid till annan. I det fallet kan man inte använda en fast spänningsnivå för att skilja mellan bitarna.

¹⁰ National Instruments: LabVIEW 6.0

¹¹ National Instruments: PCI-MIO-16E-4



Figur 12 Styrspänning till modulatern, kodad för meddelande (överst) och uppmätt signal i laserenheten (nederst).

Sammanfattningsvis har vi bland andra följande faktorer som begränsar möjligheten att avkoda signalen rätt:

- signal/brus-förhållande
- variationer i signalens medelnivå
- asynkron eller synkron insamling och trigging
- bandbredden

För att komma till rätta med insamlingen och avkodningen av signalen kan vi prova olika tekniker. Signal/brus-förhållandet, till att börja med, kan förbättras på ett par olika sätt: Man kan rättfram öka irradiansen på reflekterad strålning, antingen genom att använda en laser med högre effekt, eller genom att styra geometrin på strålen och fokusera mer av strålningen på retromodulatern. Det senare ställer högre krav på laserenheten att följa retromodulatern. Bruset kan också minskas genom ett våglängdsfilter för fotomottagaren, eller möjligen genom byte till annan detektor med mindre internt brus.

Bandbredden bestäms främst av vätskekristallcellen. Ju snabbare vätskekristallen kan fås att slå om, desto brantare flanker får man och desto mer tid används för att markera de två bitnivåerna. Ett antivikningsfilter kan vara till god hjälp för att filtrera bort oönskade frekvenser i signalen.

De relativt långsamma omslagstiderna vid höga bithastigheter kräver att man läser av (samplar) vid rätt tidpunkt för att få rätt värde. Det finns en tendens att omslagstiden blir olika lång vid olika bitar, vilket exempelvis ses i Figur 12. Denna oregelbundenhet har olika möjliga förklaringar. Till exempel kan omslagstiden bli olika om inte vätskekristallen hinner slå om fullständigt mellan bitarna. Eventuellt finns det också en minnesegenskap hos vätskekristallen, beroende på att ordningen bland molekylerna inte blivit fullständig vid tillverkningen. Omslagstiden skulle då möjligen vara beroende på hur länge vätskekristallen befunnit sig i sitt ändläge. Om man väljer att läsa av signalen i slutet av varje bit kan man öka sannolikheten för att signalen har hunnit slå om. Ett alternativ är att läsa av betydligt oftare än bithastigheten (översampla). Genom att se på flera punkter åt gången kan man urskilja signalvariationen, antingen för att den nått en viss nivå, eller för flanken slår om tillräckligt tydligt. Man skulle också kunna tänka sig en algoritm som studerar

signalförloppet i tiden för att förutsäga ungefär vilket värde nästa bitnivå bör ha, och som anpassar avläsningen till detta.

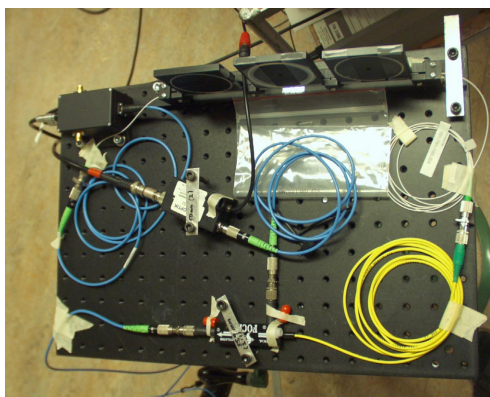
Problemet med att signalens medelnivå varierar med tiden löses enkelt genom att filtrera bort de långsamma frekvenserna (AC-koppla). Driften är betydligt långsammare än signalmodulationen så i stort sett ingen information går förlorad.

Några av teknikerna är enkla och kan användas direkt inför nästa provomgång. Andra har goda möjligheter men kräver programmering, och sedan finns det de som kräver mycket arbete med osäkert resultat.

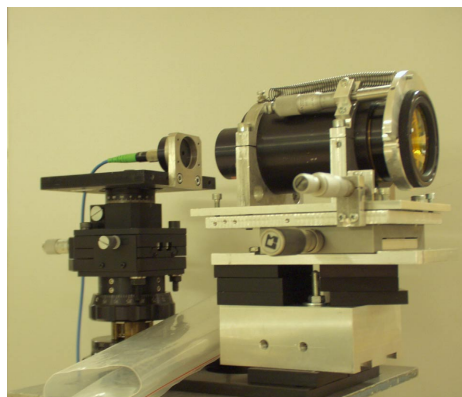
Alternativa konstruktionssätt för laserenhet och retromodulator

Laserenheten har provats med två principiellt olika uppkopplingar; den ena traditionell med fristående komponenter och strålgång i luft, den andra med komponenterna förenade med optisk fiber.

Lösningen med optisk fiber provades tidigt och gav ett system som var lätthanterligt. En uppställning visas i Figur 13 och Figur 14. En diodlaser med våglängden 1550 nm var kopplad till en fiber, som ledde strålningen till en optisk cirkulator. Strålningen passerade cirkulatorn och gick ut i luft från en fiberport. Där var en strålbreddare placerad i form av ett teleskop. Efter att strålen retromodulerats leddes den in i fibern igen med hjälp av strålbreddaren. I den optiska cirkulatorn länkades strålningen av och gick till en fiberkopplad fotomottagare som registrerade den modulerade signalen. Senare varianter av den här uppkopplingen använde en laser med högre effekt, och teleskopet ersattes med två fristående linser.



Figur 13 Komponenter (fiberkopplade) som ingår i laserenheten.



Figur 14 Överkopplingen från fiber till luft och strålbreddare i laserenheten.

I de senaste försöken har vi frångått fiberlösningen (förutom lasern som fortfarande är fiberkopplad). Orsaken är att vi har använt en annan fotomottagare och provat en typ av polariserande stråldelare, vilka inte är fiberkopplade.

Försöket med den polariserande stråldelaren gav oss möjlighet att ta bort polarisatorn i retromodulatorn och bara behålla vätskekristallcellen och retroreflektorn. Laserstrålen går ut från fibern genom en port och delas i stråldelaren. Den komponent som sedan går genom strålbreddaren till retromodulatorn har fått vertikal polarisation. Vätskekristallen modulerar polarisationen och strålen reflekteras. Den träffar så stråldelaren igen och delas upp. Den ena komponenten går nu till fotomottagaren. Beroende på polarisationstillståndet kommer irradiansen på fotomottagaren att variera.

Prov på 180 m visar att en modulerad signal kan fångas upp. Tyvärr var signal/brus-förhållandet för dåligt för att meddelandet skulle kunna avkodas. Det finns flera förbättringar att göra för att åtgärda detta: Till exempel kan laserenheten riktas in bättre mot retromodulatorens, och fokuseringen hos strålen finjusteras; bruset kan minskas genom våglängdsfilter framför sensorn; och nya vätskekristaller kan ge bättre modulationsförmåga. Varianten med polariserande stråldelare kan också ge fördelar, inte minst för att transmissionen ökar i systemet. En detaljerad undersökning av stråldelarens transmissionsegenskaper har just avslutats för bästa användning.

Nackdelen med att sända ut en polariserad stråle är att modulationen påverkas om polarisationsplanet vrids. Det betyder att vid kommunikation till till exempel en boj på vattenytan så måste man tänka på hur mycket bojen och laserenheten vrider sig. För närvarande vet vi inte hur stora toleranserna är.

Vår avsikt är att förbättra provuppställningen på olika sätt och sedan övergå till fältprov så snart som möjligt, alternativt att genomföra försök inomhus och utomhus samtidigt.

Diskussion

FLC-cellerna har hittills provats i många olika mätuppställningar, vilka alla har fungerat efter samma princip: Laserstrålen passerar FLC-cellen med en polarisator framför och en bakom, och irradiansen mäts med en fotomottagare. Irradiansen ändras (moduleras) beroende på vinklarna som polarisatorerna roterats till. Eftersom vinkelinställningarna inte påverkar modulationshastigheten, så är de hastigheter som uppmätts de bästa möjliga. Modulationsdjupet däremot påverkas av vinkelinställningen, och i de tidiga uppställningarna kunde vinklarna bara ställas in grovt. Mätningarna utfördes också med de båda polarisatorernas vinklar oberoende av varandra. Tanken var nämligen i början att just två polarisatorer skulle användas. Senare visade det sig att det räcker med enbart en polarisator för att modulera. Man kan dock få lika bra modulationsdjup med enbart en polarisator om man anpassar cellgapets storlek i vätskekristallcellen. Uppställningen med två polarisatorer kan användas även för att efterlikna en retromodulator med enbart en polarisator. Det gäller bara att anpassa polarisatorernas vinklar till varandra så att det motsvarar att laserstrålen passerat en polarisator och reflekterats tillbaka mot den. Den senaste mätuppställningen kan lättare användas för att efterlikna en retromodulator. Polarisorerna är nu stegmotordrivna och kan ställas med stor noggrannhet, och programvara används för att automatiskt generera större mätserier. Man kan då anpassa vinkeln för den andra polarisatorn automatiskt till den förstas. Mätuppställningen kan också relativt enkelt byggas om till en äkta retromodulator genom att den andra polarisatorn byts ut mot en retroreflektor. Att ha med själva retroreflektorn i mätuppställningarna är en god idé eftersom inledande mätningar har visat att den kan ha viss påverkan på strålens polarisationstillstånd.

För att bestämma modulationshastigheten utgick vi från början från att svaret skulle efterlikna den fyrkantspänning som drev FLC-cellen. När svaret inte längre var ”fyrkantigt”, vilket är samma sak som att vätskekristallen inte hinner slå om fullständigt, kunde man säga att övre gränsen var nådd. Detta är inte helt sant, utan modulation sker förstås även vid högre frekvenser, fast med sämre modulationsdjup. Under de senaste mätningarna har vi istället använt en drivsignal som är sinusformad och mätt amplituden på den modulerade signalen. Bandbredden kan då bestämmas som den frekvens där amplituden sjunkit till $1/\sqrt{2}$. I princip räcker också dessa data för att bestämma svarets utseende för godtycklig drivsignal; man kan använda sig av fourierberäkningar.

Elektronikkort för att driva FLC-cellerna tillverkades vid Lasersystem eftersom det var svårt att finna kommersiella alternativ som kunde uppfylla de speciella krav som FLC-cellerna ställer. Vätskekristallerna måste i vissa fall drivas med höga elektriska fält vilket kräver spänningar på upp mot ± 80 V. Att spänningen är bipolär är också viktigt eftersom fältet ska byta riktning. Pulser med god fyrkantform behövs genereras vid 20 kHz och i framtiden eventuellt upp mot 100 kHz. Korten är tillverkade men mätningar bör göras för att verifiera funktionen. Korten är inte avpassade för att ge extra spänningstoppar i inledningen av pulserna, vilket är något som kan förbättra omslagstiden för vätskekristallen. Det beror på att spänningens belopp och pulsens utseende behöver vara kända för den mer slutgiltiga FLC-cellen. När detta blir känt kan elektronikkorten kompletteras med en pulsformare.

Om en retroreflektor vrids kring sin längsaxel (normalen till frontytan) när den sitter i en retromodulator visar det sig att den reflekterade irradiansen kommer att variera. Troligen beror det på att laserstrålens polarisationstillstånd ändras i retroreflektorn; mindre troligt är själva geometrin orsaken, eftersom ett test har utförts

där retroreflektorn vreds när hela retromodulaton täcktes av strålen. Det visade sig där att irradiansen som mest sjönk 30–50 % av maximumvärdet. I ett annat projekt utförs ett noggrannare test med en laser på 856 nm. Där är laserstrålens polarisation känd före och efter reflektion, och olika typer av retroreflektorer provas. Det är nämligen troligt att polarisationsegenskaperna skiljer mellan olika reflektorer. Exempel på reflektorer som ska provas är öppna reflektorer med speglar, vanliga glasprismor, och glasprismor som är belagda (med silver). I vårt projekt används emellertid en laser på 1550 nm, och det är osäkert om resultaten är direkt överförbara från 856 nm. Om det finns tecken på att resultatet skulle bli annorlunda så bör mätuppställningen byggas om så att mätningarna kan göras även 1550 nm.

En retroreflektor kan även vridas i sid- eller höjddled, vilket påverkar reflekterad irradians framförallt på grund av ändringen i aperturstorlek. Mätningar på det här fenomenet gjordes inte med en ensam reflektor utan med en uppsättning av åtta stycken i ring monterade kring ett block. Trots att angränsande reflektorer borde bidra till reflektionen av strålen så sjönk den reflekterade irradiansen stort för positioner mellan två reflektorer. Strålen täckte hela blocket, men kanske var irradiansen ojämnt fördelad så att huvuddelen föll på endast en reflektor. Möjligen påverkades mätningen också av att tomma glasceller var placerade framför reflektorerna. Det är oklart om det enbart är själva geometrin hos en vinklad retroreflektor som bestämmer reflektionsgraden, eller om det även uppstår polarisationseffekter. Det nämnda försöket vid 856 nm kan visa detta.

Fältförsöket var ett tillfälle att i praktiken se om man kan låsa på en ring av retroreflektorer som rör sig i sjögång. Resultatet var positivt och diskuteras i avsnittet om fältförsöket. Det gick inte att koppla några bortfall till sjöstillståndets inverkan, vilket betyder att den använda geometrin var tillräcklig vad gäller vinkling av retroreflektorerna. Geometrin liknade den nyss nämnda som provades i inomhusmiljö. Under fältförsöket var det emellertid inte möjligt att mäta hur stor del av irradiansen som reflekterades för vilken vinkel på reflektoruppsättningen. Fältförsöket var värdefullt inte minst eftersom andra faktorer som är svåra att återskapa i inomhusmiljö spelade in, till exempel låsning på långa avstånd, turbulens, krängning i sjö och nederbörd.

Möjligheten att modellera och simulera delsystemen i en retrolänk är god, eftersom modeller finns utarbetade för exempelvis polarisationseffekter i olika komponenter. Simuleringarna kan vara till hjälp när verkliga komponenter för retrosystem ska väljas. Svårigheter kan uppstå när komponenter inte uppför sig idealt, utan korrektionssamband måste införas. Det är också betydligt svårare att simulera hela retrosystemet i en naturlig miljö, eftersom modeller måste återfinnas eller skapas för sjögång, väderlek med mera.

Provuppställningar i inomhusmiljö har visat att det går att upprätta fungerande retrokommunikationslänkar. Överföringstakten har ännu inte kommit upp i 20 kbit/s, vilket är ett delmål, men det återstår fortfarande många möjligheter till förbättringar. I avsnittet om retrolänksystemet diskuteras olika möjligheter att förbättra signalöverföringen och alternativa konstruktionssätt av laserenhet och retromodulator.

Slutsatser

De flesta nödvändiga delkomponenter till en retrolänk har provats och deras egenskaper mätts upp. Några FLC-celler har modulerat upp till 20 kHz (några enstaka ännu snabbare om de värms upp) i mätuppställningar på optikbord.

Modulationsdjupet har varit kring 0,90 vilket är tillräckligt. Signal/brus-förhållandet har varit godtagbart. Modulationshastigheten och modulationsdjupet borde idealt sett vara bättre, varför ytterligare några celler kommer att tillverkas vid Lasersystem.

Vi har en bra mätuppställning där polarisatorerna vrids med stegmotorer och mätningar kan utföras automatiskt med hjälp av datorstyrning. Uppställningen kan simulera en retromodulator med enbart en polarisator, och den kan byggas om för att införliva retroreflektorer. Modulatorernas bandbredd kommer i framtiden att kunna anges enhetligt i tester med sinusformad drivsignal.

Elektronikkort har tillverkats som kan driva FLC-cellerna med deras speciella krav. Korten är också portabla, vilket är en fördel när en demonstrator ska byggas. Mätningar kommer att göras för att verifiera funktionen. Korten kommer att kompletteras med en pulsformare för bättre drivning av FLC-cellerna. Innan dess krävs ytterligare tester av cellerna för att bestämma optimal spänning och pulsform.

Reflekterad irradians varierar när en retroreflektor vrids kring sin längsaxel och variationen kan vara 30–50 % av maximumvärdet. Ett noggrannare test görs med en annan laser med våglängden 856 nm och med olika typer av retroreflektorer. Om resultaten inte är överförbara till vår våglängd 1550 nm så måste mätuppställningen byggas om för mätningar vid rätt våglängd.

En uppsättning med åtta retroreflektorer i ring i ett block som vinklades gav inte det förväntade resultatet att reflekterad irradians skulle vara i stort sett samma för alla vinklar. I stället varierade irradiansen mellan 100 % och 10 %. Den reflekterade irradiansen var däremot större än 50 % inom 20 graders vinkel (full vinkel) till en reflektor. Om försöket vid 856 nm visar att polarisationseffekter uppstår när en reflektor vinklas, så måste kanske motsvarande mätningar göras vid 1550 nm.

Fältförsöket visade att det var möjligt att låsa på och följa en boj med retroreflektorer ute på sjön. Länkbortfall uppstod endast undantagsvis och det gick inte att koppla några bortfall till sjötillståndets inverkan. Följning av bojen uppskattas vara möjlig på väsentligt längre avstånd än 3,5 km. Turbulens gav inga märkbara effekter. Vädret var växlande med tidvis regn och vind uppskattningsvis mellan 4–8 m/s. Andra yttre omständigheter som oväder, snö och is måste naturligtvis tas i beaktande för att ge en fullständig bild. Ett "normalt" sjötillstånd bör inte medföra några särskilda problem vad avser att upprätta en stabil kommunikationslänk. Kortare bortfall bör kunna hanteras genom att anpassa kommunikationskodningen.

Samma typ av mätning som under detta fältförsök behöver inte upprepas och nästa försök bör ske mot en boj bestyckad med retroreflektorer som är anpassade för de modulatorer som vi kan bygga med FLC-teknik. Planer finns därför att modifiera bojen så att mätningar möjliggörs mot en installation av retroreflektorer med ett antal motsvarande vad vi kommer att ha då modulering provas.

En modell av retromodulatern har implementerats i Matlab och varit till hjälp i komponentvalet. Planer finns att använda ZEMAX för att modellera ännu större delar av retrokommunikationssystemet. Simuleringarna kan användas för förutsägelser av resultat och i komponentvalet. Möjligheten att modellera hela retrosystemet med till exempel väderlek och sjögång är oklara och låter sig eventuellt inte göras.

Fungerande retrolänkar har satts upp i ett par provversioner inomhus. Överföring av information har skett på kortare (8 m) och längre (180 m) avstånd. Ett

textmeddelande på 100 tecken kunde överföras med hastigheten 1 kbit/s utan bitfel. Genom att välja en bättre FLC-cell och eventuellt använda en starkare laser borde det vara möjligt att åtminstone komma upp i 20 kbit/s. Prov kommer att göras med nya FLC-celler och en laserenhet med polariserande stråldelare. Avsikten är också att införa fältprov så snart som möjligt, och därmed närma sig en komplett demonstrator för retrokommunikation med laser.

Förkortningar

ASCII	American Standard Code for Information Interchange
FLC	ferroelectric liquid crystal
FOI	Totalförsvarets forskningsinstitut
MD	modulationsdjup
SSFLC	surface stabilised ferroelectric liquid crystal

Referenser

1. Pressmeddelande från Förvarsdepartementet: "Ett viktigt steg mot ett nätverksbaserat försvar", Förvarsdepartementet, 2002-11-07. Internetadress: <http://forsvar.regeringen.se/>
2. A. Gerrard & J. M. Burch: *Introduction to Matrix Methods in Optics*, Dover Publications, Inc., New York, 1994.
3. G. Bolander & A. Widén: *Laserradar med HeNe- och Nd:YAG-laser*, FOA rapport DH 30118-3.4, 1987.