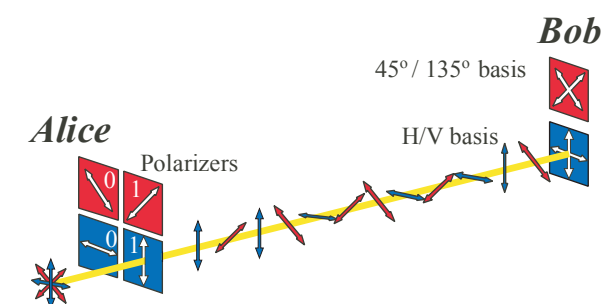
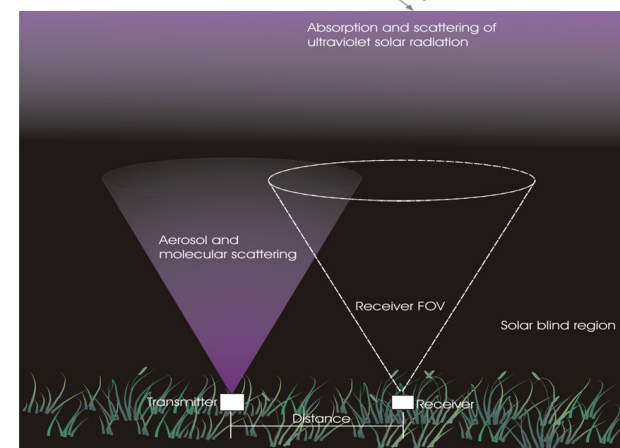
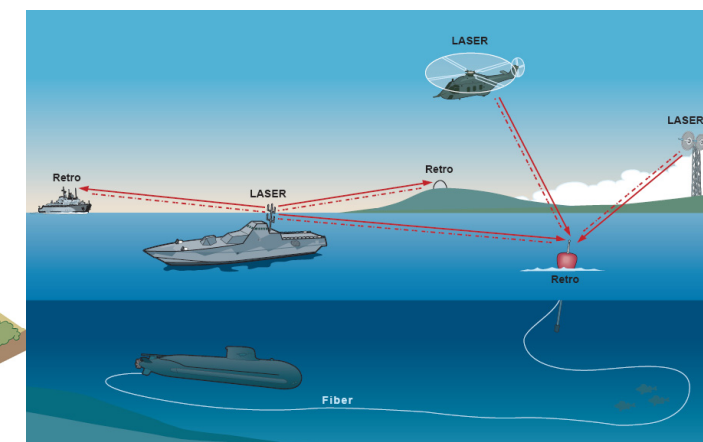
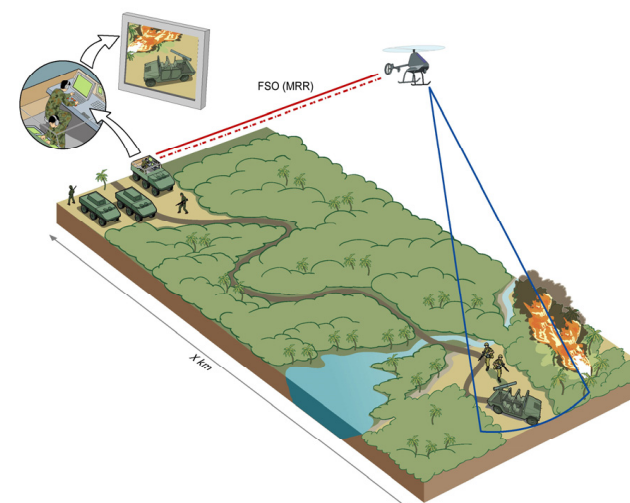


JOHAN ÖHGREN, FREDRIK KULLANDER, LARS SJÖQVIST,
MAGNUS PETTERSSON OCH PER JONSSON



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

Johan Öhgren, Fredrik Kullander, Lars Sjöqvist,
Magnus Pettersson och Per Jonsson

Fri optisk kommunikation på FOI 1999 till 2007

Titel	Fri optisk kommunikation på FOI 1999 till 2007
Title	Free space optical communication at FOI 1999 to 2007
Rapportnr/Report no	FOI-R--2422--SE
Rapporttyp Report Type	Användarrapport User report
Sidor/Pages	35 p
Månad/Month	December/December
Utgivningsår/Year	2007
ISSN	ISSN 1650-1942
Kund/Customer	Försvarmakten
Forskningsområde Programme area	7. Ledning med MSI 7. C4I
Delområde Subcategory	71 Ledning 71 Command, Control, Communications, Computers, Intelligence
Projektnr/Project no	E 3076
Godkänd av/Approved by	Lena Klasén
FOI, Totalförsvarets Forskningsinstitut	FOI , Swedish Defence Research Agency
Avdelningen för Sensorsystem	Sensor Systems
Box 1165	P.O. Box 1165
581 11 Linköping	SE-581 11 Linköping

Sammanfattning

Den här rapporten är en sammanställning av den forskning och de tekniker som har tagits fram på FOI inom ramen för fri optisk kommunikation 1999–2007. Fri optisk kommunikation är en alternativ teknik till traditionell radioöverföring och fiberoptiska nät. Tekniken kan ge höga överföringshastigheter (mer än 10 Gbit/s) och länkarna kan vara mobila. Den optiska strålen är dessutom oftast smal och välriktad, vilket gör kommunikationen svår att avlyssna, störa eller ens upptäcka.

FOI har forskat på teknik för taktiska tillämpningar. Framförallt har så kallad retrokommunikation undersökts, en form av asymmetrisk länk med en retromodulator och en laserenhet. Retromodulaton består endast av en retroreflektor kombinerad med lämplig optisk modulator. Laserenheten skickar ut en kontinuerlig laserstråle mot retromodulaton som modulerar och reflekterar strålen tillbaka till laserenheten. Moduleras istället laserstrålningen vid laserenheten kan data överföras i motsatt riktning. Fördelen med tekniken är att retromodulaton inte kräver komplicerad inriktningsmekanik och kan göras liten, lätt och energisnål. Olika typer av retromodulatorer baserade på kvantbrunnsstrukturer i halvledare eller glasceller med vätskekristaller har studerats. Flera olika laborationssystem har testats och utvärderats både i laboratoriemiljö och i fältförsök, bland annat har signaler överförts från en boj i vattnet till en transceiver på land.

Vid sidan av retrokommunikation har även andra tekniker för fri optisk kommunikation undersökts. Några exempel är icke-mekanisk strålstyrning med spatiella ljusmodulatorer, luft hopp från fiber till fiber, överföring utan fri siktsträcka och kvantoptisk nyckelöverföring (så kallad kvantkryptografi) för säker överföring av kryptografiska nycklar.

Nyckelord

fri optisk kommunikation, laserkommunikation, retrokommunikation, ultraviolett kommunikation, icke-mekanisk strålstyrning, kvantoptisk nyckelöverföring, modulator, retroreflektor, spatiell ljusmodulator, vätskekristall, kvantbrunn.

Summary

This report summarizes the research and development undertaken at FOI in the frame of free-space optical communications (FSO) 1999–2007. FSO is an alternative to traditional radio or fiber-optical communication. Communication at high transfer rates (more than 10 Gbit/s) is possible and the links can be mobile. Furthermore, the optical beam is usually narrow and directed, which makes it difficult to eavesdrop, jam or even detect the communication.

FOI have studied methods particularly applicable to tactical applications. The main focus has been on communication based on modulated retroreflectors (MRR). Such asymmetric links have a laser transceiver in one end and an MRR assembly in the other. A MRR consists of a retroreflector with an optical modulator. The laser transceiver transmits a continuous wave laser beam towards the MRR which modulates the optical beam and reflects it back to the transceiver. Information can be sent in the opposite direction by modulating the transceiver output beam. The main advantage with the MRR technology is that complex beam steering is avoided. Moreover, small and lightweight installations with low energy consumption can be envisaged. Different types of optical modulators, based on quantum well structures in semiconductors or glass cells with liquid crystals have been studied. Several laboratory systems were tested and evaluated in laboratory trials and in field trials, e.g. signals have been transmitted from a buoy in water, carrying an MRR assembly, to a transceiver on the shore.

Some examples of other activities within the field of FSO are non-mechanical beam steering with spatial light modulators (SLMs), air jump between optical fibers, non line-of-sight communication and quantum key distribution (so-called quantum cryptography).

Keywords

free-space optical communication, FSO, laser communication, retrocommunication, ultraviolet communication, non-mechanical beam steering, quantum key distribution, modulator, retroreflector, MRR, spatial light modulator, SLM, liquid crystal, LC, quantum well.

Innehållsförteckning

1	Inledning	7
2	Tillämpningar	8
3	Retrokommunikation med vätskekristall- och kvantbrunnsmodulatorer	12
3.1	Tekniköversikt	12
3.2	Projekt på FOI	14
3.3	Framtagen teknik på FOI	17
4	Icke-mekanisk strålstyrning	22
4.1	Tekniköversikt	22
4.2	Projekt på FOI	22
4.3	Framtagen teknik på FOI	22
5	Kommunikation i urban miljö med ultraviolett strålning eller väggreflektioner	24
5.1	Tekniköversikt	24
5.2	Projekt på FOI	24
5.3	Framtagen teknik på FOI	25
6	Kvantoptisk nyckelöverföring	27
6.1	Tekniköversikt	27
6.2	Projekt på FOI	27
6.3	Framtagen teknik på FOI	29
7	Övrigt	31
8	Referenser	32

1 Inledning

FOI – Totalförsvarets forskningsinstitut – bedriver en bred och avancerad verksamhet inom optisk forskning. 1999 togs fri optisk kommunikation (FSO) upp som ett särskilt studieområde, det vill säga olika tekniker för att kommunicera med lasrar genom fria rymden och inte genom optiska fibrer. Intresset var stort med tanke på de möjligheter till informationsöverföring som finns i olika militära och civila tillämpningar. Kapitel 2 beskriver dessa tillämpningar närmare.

Under året 2007 stod det klart att förutsättningarna för att vidareutveckla framförallt retrokommunikation inom ramen för försvarsmaktens finansiering inte fanns. Den civila marknaden för FSO med de tekniker som studerats på FOI bedöms fortfarande som begränsad i Sverige, vilket därmed gör det svårt att konkurrera om forskningsmedel. Även enskilda aktörer som kan ha stor nytta av tekniken i speciella tillämpningar hade visat ett försiktigt intresse för den nya tekniken. Arbetet med FSO på FOI upphör därför, åtminstone för tillfället, i och med att detta projekt avslutas.

Den här rapporten är en sammanställning av den forskning och de tekniker som har tagits fram. Den har tillkommit för att säkerställa att resultaten bevaras och för att underlätta en nystart inom området.

De olika tekniker som har använts för FSO beskrivs i de följande kapitlen 3–6. Kapitel 3 behandlar en särskild form av laserkommunikation som kallas retrokommunikation och där olika typer av retroreflektorer och modulatorer har använts. Kapitel 4 beskriver en teknik för att styra laserstrålar på icke-mekanisk väg. I stället används elektrooptiska metoder, vilket ökar snabbheten betydligt. Strålstyrning är visserligen inte i sig en form av optisk kommunikation, men det är en mycket viktig del i praktiska kommunikationstillämpningar. Dessa inledande kapitel behandlar tekniker som i huvudsak kräver fri sikt för kommunikationen. För operationer i urban miljö, i huvudsak stadsmiljö, finns inte alltid fri sikt. Därför har även två tekniker studerats för att komma runt problemet: dels användning av ultraviolett strålning, som sprids i atmosfären, dels utnyttjande av reflexer i väggar och fönster. Dessa tekniker tas upp i kapitel 5. Optiska tekniker för kvantoptisk nyckelöverföring, även kallat kvantkryptografi, har fått ett eget kapitel, kapitel 6. Detta är ett sätt att överföra säkra kryptonycklar som utnyttjar kvantmekaniska fenomen och ljuskällor med enstaka fotoner.

Vart och ett av teknikkapitlen inleds med en tekniköversikt, som förklarar tekniken och hur den kan användas. Sedan ges en översikt av de projekt på FOI som behandlat tekniken. Avslutningsvis finns ett avsnitt som beskriver den teknik och utrustning som tagits fram på FOI under arbetet och som är tänkt att vara till hjälp för den som vill använda sig av utrustningen.

Efter teknikkapitlen, i kapitel 7, behandlas övrigt som har anknytning till projekten inom optisk kommunikation.

Rapporten avslutas med en referenslista i kapitel 8. Referenslistan är omfattande, men gör inte anspråk på att vara fullständig. Urvalet av referenser har koncentrerats till rapporter och konferensartiklar som tagits fram på FOI. Upptagna på listan är även rapporter som har skrivits av personer som FOI har samarbetat med och som har ett innehåll med koppling till FSO. Inte upptagna i listan är ett stort antal artiklar i ämnet som publicerats av forskningsinstitut i andra länder.

2 Tillämpningar

Optiska signaler i fibrer lägger grunden för vårt moderna informationssamhälle. Det är idag möjligt att sända optiskt med en datahastighet över en Terabit/s (1 000 000 000 000 bitar/s – 1 Gigabyte sänds på bråkdelen av en sekund!). En optisk länk (laserstråle) i luften kan i princip bära samma informationsmängd men är i dagsläget begränsad av atmosfärs effekter och komponenter. Potentialen finns dock där och komponenter utvecklas snabbt. För stationära fria optiska länkar närmar sig den möjliga datahastigheten redan den i fiber.

FSO kan bli ett mycket betydelsefullt verktyg för extremt snabb, tyst och helt säker (kvantoptisk) överföring av stora datamängder mellan sensorer, plattformar och ned till den enskilde soldaten. Övergång utan skarvar mellan optiska fibrer och fria optiska länkar kommer att vara speciellt viktig för militära tillämpningar där rörlighet krävs.

Optisk retrokommunikation som gör det möjligt att sända med hög riktverkan från ostabila plattformar, har varit en central teknik inom ramen för de studier som bedrivits vid FOI. Kvantnyckelöverföring och optisk kommunikation över bruten siktlinje bland annat med utnyttjande av ultraviolett strålning är andra tekniker som studerats inom ramen för taktiska tillämpningar.

För att bättre förstå nyttan av just retrokommunikation i taktiska tillämpningar har olika militära scenarion, särskilt med koppling till uppgifter för den internationella insatsstyrkan, studerats. Slutsatsen från analyser var generellt att tekniken inte i första hand är lämpad för det övergripande kommunikationsnätverket utan snarare i specifika tillämpningar, som till exempel:

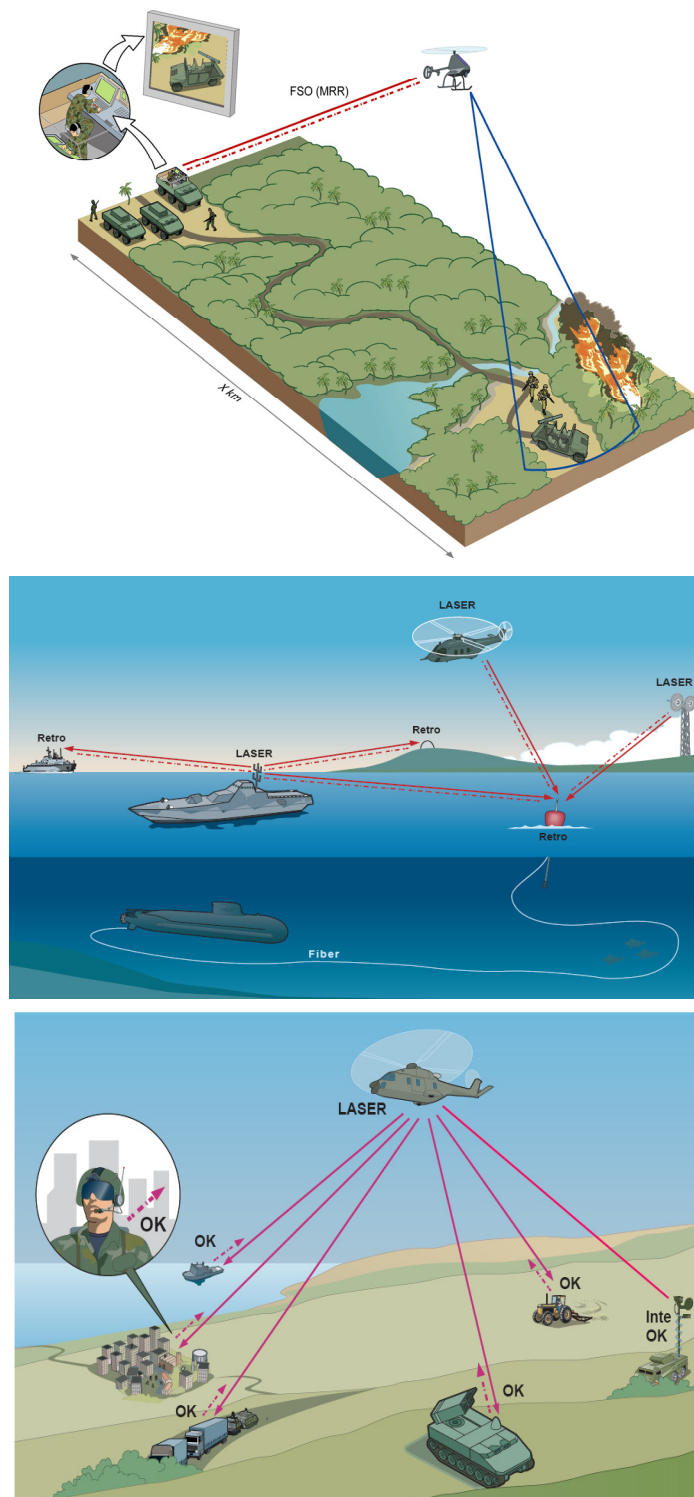
- Kommunikation med hög datahastighet från mobila plattformar eller enskilda soldater
- Snabb och effektiv distribution av säkra kryptonycklar i kombination med optisk informationsöverföring
- Snabbt upprättade lokala kommunikationsnätverk utan frisiktskrav och utan radiosamband
- Optisk märkning för identifiering, följning och lokalisering till exempel vid sök- och räddningsoperationer.

De viktigaste tekniska egenskaperna för retrokommunikation som kan bidra till informationsöverläge finns vara:

- Hög kapacitet
- Snabb dataöverföring
- Svårupptäckt, svårstörd och avlyssningssäker kommunikation
- Små kommunikationsenheter med liten effektförbrukning för små plattformar och individuella soldater.

Tillämpningar som forskningen primärt inriktades mot illustreras i Figur 1 och var

- Extraktion av sensordata från UAV, helikopter eller autonoma sensornätverk
- Kommunikationslänkar för specialförband i framskjuten spaning
- Marina länkar, till exempel från boj för att kommunicera från undervattenssystem
- Optisk märkning för identifiering, följning och lokalisering, till exempel vid sök- och räddningsoperationer.

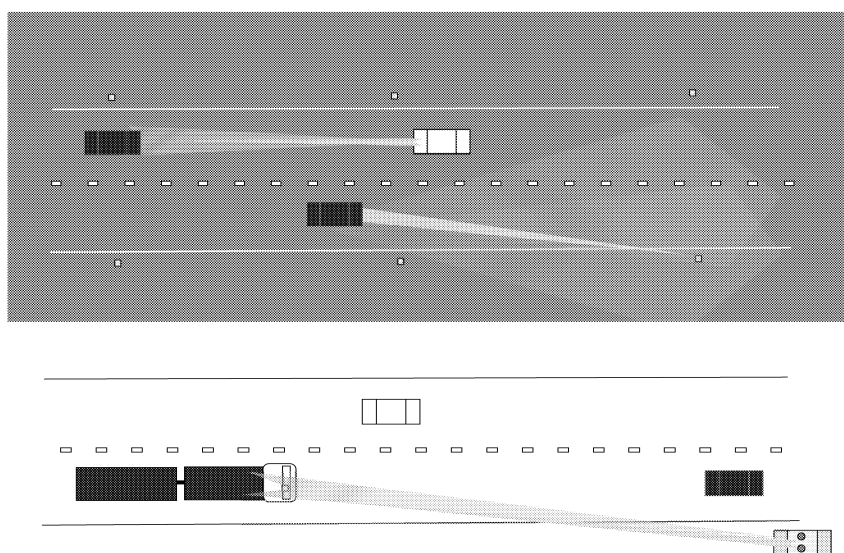


Figur 1 Exempel på taktiska tillämpningar för FSO: Videolänk till UAV. Marina länkar, till exempel från boj för att kommunicera information från undervattenssystem. Optisk märkning för identifiering, följning och lokalisering till exempel vid sök- och räddningsoperationer.

För att vinna acceptans i taktiska tillämpningar har följande aspekter funnits vara väsentliga att beakta:

- Enkla och lätta laserenheter med automatisk fininriktning av strålen är nästan alltid önskvärda och ibland helt nödvändiga. Komplexa och bulkiga inriktningssystem måste undvikas.
- Handhållna system utan komplex teknik för inriktning kan i vissa fall vara fördelaktigt, till exempel för enskild soldat i urban miljö
- Förbättra den optiska effektbudgeten för att primärt ge säkra länkförbindelser uppåt 10 km
- Kapacitet, > 10 Mbit/s
- Låg tillverkningskostnad
- Ögonsäkerhet
- Liten energiförbrukning
- Låg vikt och volym.

I civila sammanhang finns flera potentiella applikationsområden med motsvarande krav som för taktiska tillämpningar. Inom trafiksektorn kan optiska retromodulatorer användas till exempel för trafikövervakning och förmedlande av trafikinformation (Figur 2). Optiska retromodulatorer utnyttjar retromodulation för att överföra information från en nod (där modulorn är placerad) genom att en strålkälla (företrädesvis laser) riktas mot modulorn, eller snabbt sveps förbi den. Strålen moduleras vid retromodulorn och reflekteras tillbaka till en mottagare. Strålkällan är generellt sett tänkt att vara enkelt uppbyggd, till exempel som en konstant svepande laserfyr, med möjlighet att både ta emot och sända optiska signaler eller som en infraröd stråle som sänds ut via fordonens strålkastare med en detektor för att ta emot den returnerade signalen. Modulatorer i omgivningen kan förse ett fordon med ljud, bild eller annan information. Länkens datatakt är en viktig parameter även om informationsmängden inte alltid är hög eftersom uppkopplingstiden mellan modulator och mottagare kan förväntas bli kort, till exempel då en skannande laserstråle från ett passerande fordon sveper förbi eller omvänt då modulorn är placerad på fordonet.



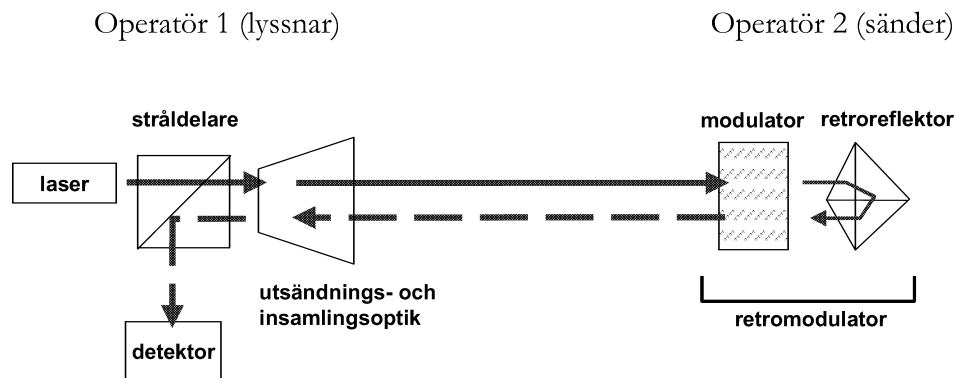
Figur 2 Illustration av tillämpningar i trafiken där trådlös kommunikation med optisk retromodulatorer utnyttjas mellan fordon eller för förmedlande av till exempel trafikinformation från vägkant (övre) samt kommunikation till och från fordon i yrkestrafik.

Optiska trådlösa lokala nätverk för inomhus- och utomhustillämpningar är ett annat område där retromodulatorer kan användas för distribution av information. Optiska kommunikationsnoder i trådlösa lokala nätverk installerade i exempelvis allmänna utrymmen, inom företag, bankvärlden och sjukhus kan ses både som ett komplement och som ett alternativ till traditionell trådlös RF-teknik. Den optiska tekniken ger högre bandbredd och enkla och effektiva lösningar och det kan ibland finnas problem med radioteknik då det gäller bland annat integritet och frekvensallokering. Inom säkerhetsområdet är intresset för nya flexibla kommunikationslösningar stort. Retromodulatorer kan användas för att skapa kommunikationsnoder både i stationära punkter och på rörliga farkoster eller fordon. Sensorer (kameror med mera) i nätverk för övervakning i industri- och miljötillämpningar kan via retromodulatorer kopplas in för att länka exempelvis bildinformation. Det är även tänkbart att använda dem som transpondrar vid räddningsuppdrag i samband med olyckor, till exempel i nödvästar.

3 Retrokommunikation med vätskekristall- och kvantbrunnsmulatorer

3.1 Tekniköversikt

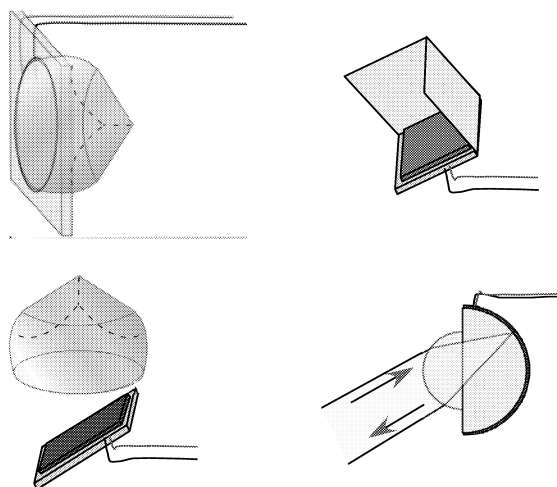
Retrokommunikation är en särskild typ av optisk kommunikation där lasern (strålkällan) i länkens ena ände har ersatts med en så kallad retromodulator. Det finns ingen inbyggd laser i retromodularen, utan den som vill upprätta länken måste själv lysa mot den med en laser. Retromodularen fångar upp laserstrålen och dess ena huvuddel, retroreflektorn, returnerar automatiskt strålen samma väg som den kom in. Retromodulatorns andra huvuddel är som namnet antyder en modulator av något slag, med vars hjälp kodad information förs på strålen. Den som sände ut strålen får alltså tillbaka den igen, fast med informationen från retromodularen inkodad. Figur 3 illustrerar principen.



Figur 3 Principen för retrokommunikation.

Kommunikation kan förstås också ske i riktning mot retromodularen. Det enda som krävs är att laserstrålen moduleras redan när den lämnar lasern och att retromodularen kompletteras med en detektor.

Retroreflektorn består ofta av en kubhörnsreflektor, antingen i form av ett glasprisma eller tre vinkelräta speglade ytor. Denna reflektor har ett stort synfält, cirka 40°, inom vilket den kan reflektera en laserstråle. Retroreflektorn kan också vara en fokalplansreflektor (på engelska "cat's eye"), vilken har ett mindre synfält, runt 15°. Genom att kombinera flera retromodulatorer är det möjligt att täcka ett större synfält.



Figur 4 Olika principer för retromodulatorer: Transmissiv modulator med kubhörnreflektor, reflektiv modulator med kubhörnreflektor, reflektiv modulator i spegelreflektor, reflektiv modulator i kattöga (fokalplansreflektor).

Dataakten i en optisk länk kan ökas ytterligare, till exempel genom att använda flera laserstrålar och modulatorer, eller genom att multiplexera laserkanaler med olika våglängder.

En sorts modulator bygger på vätskekristallteknik (flytande kristall). Laserstrålen moduleras då den passerar genom vätskekristallen och därvid påtvingas ett visst polarisationstillstånd. Fördelen med denna typ av modulator är att den går att tillverka till en låg kostnad och står emot påfrestningar. Begränsningen ligger främst i materialets omslagshastighet som medger dataakter på maximalt 100 kbit/s.

En annan sorts modulator är uppbyggd av tunna halvledarskikt och utnyttjar den så kallade kvantbrunnseffekten. I detta fall är det laserstrålens intensitet som moduleras. Mycket stora dataakter kan uppnås, tiotals Mbit/s har visats och potentialen finns upp mot 1 Gbit/s. Nackdelen med kvantbrunnsmodulatorens är att tillverkningen fortfarande är avancerad och kostsam, och att den är relativt ömtålig.

Fördelen med kubhörnreflektorn är dess stora synfält och att öppningen kan göras stor för att släppa in mer effekt. Fokalplansreflektorn däremot innehåller som regel linser som ska fokusera strålen på en spegel. Det betyder att synfältet blir mindre och om linserna är stora är det svårt att erhålla ett bra fokus. Fördelen med fokalplansdetektorn är att den kan kombinera en stor apertur med en liten, och därmed snabb, modulator i fokalplanet (eftersom RC-konstanten är omvänt proportionell mot detektorarean). Med fokalplansmatriser som kan fungera både som detektor och modulator kan olika pixlar aktiveras beroende på infallsvinkel. På så sätt kan retroenehten användas för att bestämma riktningen till laserkällan och olika pixlar kan modulera strålen med olika signaler.

Teknikutvecklingen inom vätskekristallområdet går framåt. Visserligen är det användningen i bildskärmar som är ett av de största forskningsområdena i dag, men även andra användningsområden studeras. Exempelvis finns det forskare på Chalmers tekniska högskola som arbetar med nya tekniker. Kolesteroliska vätskekristaller som blandas på rätt sätt kan användas till snabba modulatorer som i princip släpper igenom allt ljus i öppet läge och blockerar allt ljus i stängt. En annan teknik är att blanda nanorör med en vätskekristall

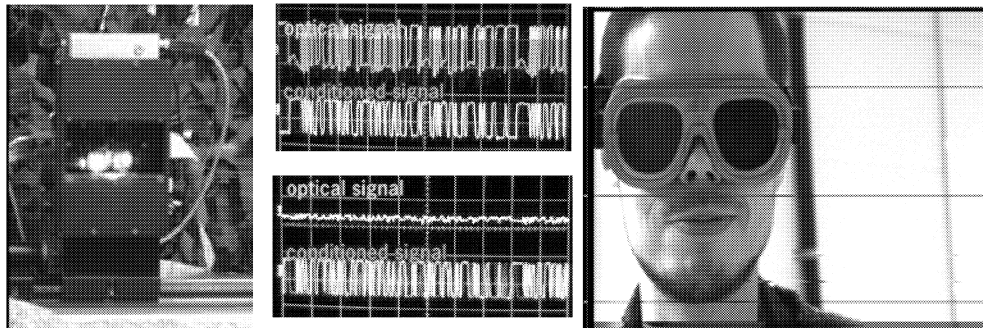
och på så sätt skapa en komponent som går från att vara helt genomsläpplig till att uppträda som en polarisator. Sådana komponenter skulle kunna fungera som ljusmodulatorer och ge bra kontrast. Däremot är det oklart om komponenterna är snabbare än de som tidigare studerats.

Det finns även ett starkt intresse av att utveckla kvantbrunnskomponenter, vilka bland annat kan användas som modulatorer. Strukturer och material kan varieras för att skapa funktionalitet vid fler våglängder än i dag. Modulationsförmågan och därmed kontrasten i en kommunikationssignal kan ökas. Halvledande nanostrukturer, så som kvantprickar, kan också komma att få betydelse inom komponentutvecklingen.

3.2 Projekt på FOI

Kvantbrunnsmodulatorer

I försvarsmaktens fotonikprojekt som startade 1999 initierades utveckling av kvantbrunnsmodulatorer tillsammans med Acreo. Acreo tog fram modulortekniken och FOI utvärderade och provade dem i retrokommunikationssystem. År 2003 genomfördes en slutdemonstration vid FOI. I ett system med både icke-mekanisk strålstyrning och kvantbrunnsmodulatorer genomfördes teknikdemonstrationer med videoöverföring och över 10 Mbit/s i dataakt. Tekniken utvecklades till att börja med för våglängder vid cirka 850 nm på grund av tillgången på material. Ny teknik finns nu tillgänglig för ett ögonsäkert våglängdsband kring 1550 nm. Acreo har tillverkat komponenter baserat på sådana substrat. Försök med 1550 nm-modulator i cat's eye-konfigurationer genomfördes under de senare åren.



Figur 5 Demonstration av kvantbrunnsmodulatorer i kombination med icke-mekanisk strålstyrning. Videosignaler med en dataakt på 115 kbit/s (RS-232) sändes på ett avstånd av 180 meter. Bitströmmar med maximalt upp till 16 Mbit/s kunde överföras. Länken kunde vidmakthållas och återupptagas med icke-mekanisk strålstyrning.

Vätskekristallmodulatorer

Med instruktioner från Chalmers tekniska högskola lärde sig FOI att på egen hand tillverka vätskekristallmodulatorer av tomma glasceller och vätskekristall. Ett antal vätskekristallmodulatorer har tillverkats för försöksändamål på FOI.

En mätupställning byggdes upp i laboratoriet 2004 för att karakterisera modulatorerna både optiskt och elektriskt. En klimatkammare användes för att ge modulatorerna rätt temperatur. Med hjälp av en datormodell, implementerad i MATLAB, bestämdes optiska parametrar för modulatorerna. En ny typ av vätskekristallmodulatorer från Chalmers har också provats och jämförts med de modulatorer som tagits fram på FOI. De nya modulatorerna

designades specifikt för den typ av hörnkub som användes med en cirkulär aktiv yta på 17 mm i diameter. De nya modulatorerna visade sig ha en bandbredd på över 50 kHz. Vätskekristallmodulatorer kan möjligen ge ännu högre datatakt uttryckt bit/s i kombination med digital kodning i flera nivåer. De är därmed inte helt ointressanta även om det bör betonas att de framförallt har setts som ett verktyg för att kunna testa andra systemaspekter.

Bojförsök

För undervattenssystem är utgångspunkten att plattformar, vapen och sensorer är dolda och mycket svårupptäckta. Detta är en taktisk fördel som är högst väsentlig och ställer stora krav på kommunikationssystemet. Inte desto mindre ökar behovet av att kommunicera mellan olika enheter i takt med att undervattenssystemen får nya typer av uppgifter. Ett koncept som tidigt bedömdes kunna bli betydelsefullt och därmed ingick i ett mer omfattande undervattenskommunikationsprojekt var retrokommunikation från boj till luft. Under 2003 utrustades en boj med en hållare för modulatorer för ett synfält på 180°. Bojen provades hösten 2003 på sjön Roxen och data överfördes i 1 kbit-takt 400 m från bojen på sjöns yta till en transceiver på land. Fältprover vid Vättern hade dessförinnan visat att det på flera kilometers avstånd var möjligt att rikta och låsa en laserstråle mot en boj med en retroreflekterande anordning.



Figur 6 Försök med retrokommunikation från boj

Andra länkförsök

Flera andra försök med syfte att prova och demonstrera FSO har genomförts från FOI:s horisontlaboratorium. Tidigt gjordes långtidsförsök med både ett kommersiellt tillgängligt FSO-system och ett experimentsystem med ett så kallat hopp från fiber till fiber. Flertalet prover har gjorts med lasertransceivrar och retrokommunikationsenhet på olika länkavstånd, med början i den optiska mäthallen och därefter med avstånd på upp till några kilometer över fälten utanför FOI. Fältförsök har genomförts med laserenheten placerad i horisontlaboratoriet på FOI och vätskekristallmodulatorer placerade på olika platser med av-

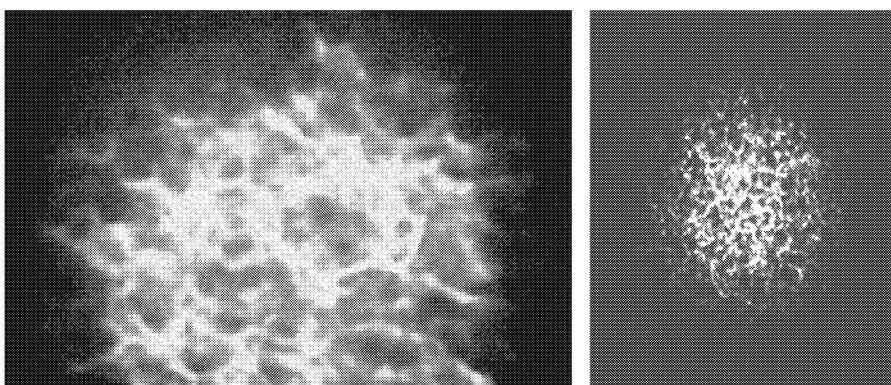
stånd från några hundra meter upp till 8 km. På 8 km har retromodulatorerna monterats i en TV-mast. Syftet har varit att studera kommunikationskanalens egenskaper med signal-amplitudfluktuationer orsakade av turbulens i luft. Endast svaga signaler kunde fångas upp från modulatorerna i masten. Försök gjordes med att kommunicera med retrotekniken från TV-masten men det lyckades aldrig.

Fokalplansteknik ("cat's eye"-teknik)

Flera försök genomfördes med retrokommunikation baserad på "cat's eye"-retromodulatorer. En ny princip där fokalplansmatriser (arrayer) med kvantbrunnsstrukturer kan användas både som retromodulatorer och detektorer har studerats. Fördelen med en sådan lösning är bland annat att en liten modulatoryta kan kombineras med ett stort synfält. Detektorfunktionen gör det möjligt att styra ut retromoduleringen i riktningen för infallande ljus. Det går även att hantera laserstrålar som kommer in från olika håll och skicka olika information i olika riktningar. Komponentens egenskaper testades i olika fokalplansmonteringar med avseende på överföringsavstånd, vinklinskänslighet och överhörning mellan element. Signaler sändes och togs emot i en testuppställning med 180 m avstånd till laserenheten. I kombination med flernivåkodning visade vi nyligen att en datatakt på 160 Mbit/s kunde uppnås över en retrokommunikationslänk. I Figur 10 visas ett par anordningar som provats.

Strålpropagering

Många av de praktiska försök som genomfördes syftade till att förstå atmosfärens inverkan på retrokommunikationslänken och på vilket sätt den kan motverkas optimalt. Parallellt med provverksamheten genomfördes såväl analytiskt som simuleringsarbete för att bättre kunna beskriva turbulensens inverkan på länkprestanda. Detta arbete genomfördes i nära samverkan med andra projekt med näraliggande problem. För att kompensera för turbulens kom vi fram till att första ordningens tip-tilt korrigering var den metod som till rimlig kostnad skulle kunna implementeras för att signifikant förbättra länkprestanda under turbulenta förhållanden.



Figur 7 Exempel på uppmätt och simulerad strålprofil efter propagering genom turbulent atmosfär.

Studie av kodningsmetoder

Retromodulatorns hastighet utgör en begränsande faktor för hur hög datatakt som kan uppnås i ett retrokommunikationssystem. Genom att införa flernivåmodulation kan det vara möjligt att väsentligt öka datatakten i situationer med höga signalstyrkor. Felrättande kodning och diversitetstekniker kan förbättra kvalitén i det mottagna meddelandet (det vill

såga reducera antalet bitfel). Adaptiv modulation i kombination med felrättande kodning visade sig vara en väl lämpad teknik för användning i retrokommunikationssystem då kanalen relativt enkelt kan estimeras i dessa system. Genom adaptiv modulation och kodning kan systemet anpassas till kanalens förutsättningar. Då signalstyrkan är stark kan en hög datatakt erhållas, medan ett robust system kan uppnås under svåra kanalförhållanden genom att använda en binär modulation och en kraftig felrättande kod.

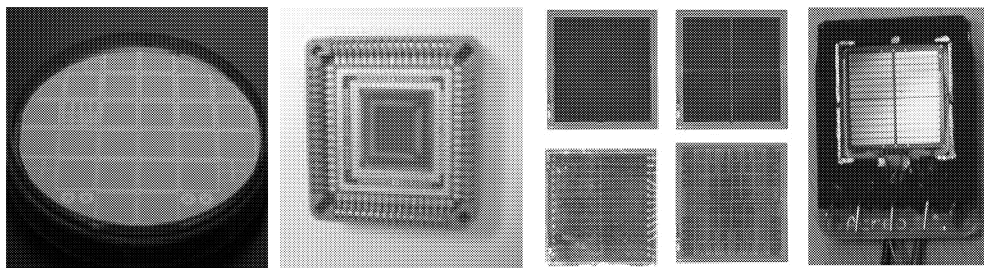
Jämförelse med radioteknik

En grov jämförelse av prestanda för retrokommunikationssystem och några olika befintliga och experimentella radiosystem, främst för UAV-tillämpningen, har genomförts. Ett radiosystem som opererar på 60 GHz har många likheter med retrokommunikationssystem, bland annat relativt goda smygegenskaper och potential för hög datatakt, och det är i huvudsak ett line-of-sight-kommunikationssystem med begränsad räckvidd. I likhet med retrokommunikation så är 60 GHz radiosystem fortfarande på forsknings- och utvecklingsstadiet. Om räckvidden istället är viktigare än smygegenskaperna för en specifik tillämpning så kan ett radiosystem som opererar på frekvenser omkring 38 GHz vara intressanta då det är möjligt att uppnå långa räckvidder och höga kapaciteter. Övriga radiosystem som kan jämföras med retrokommunikation finns inom IEEE 802.XX standarderna. De kan möjligen ge radiosystem som kan mäta sig med retrokommunikationssystem i fråga om storlek, effektsnålhet och pris.

3.3 Framtagen teknik på FOI

Kvantbrunnsmodulatorer

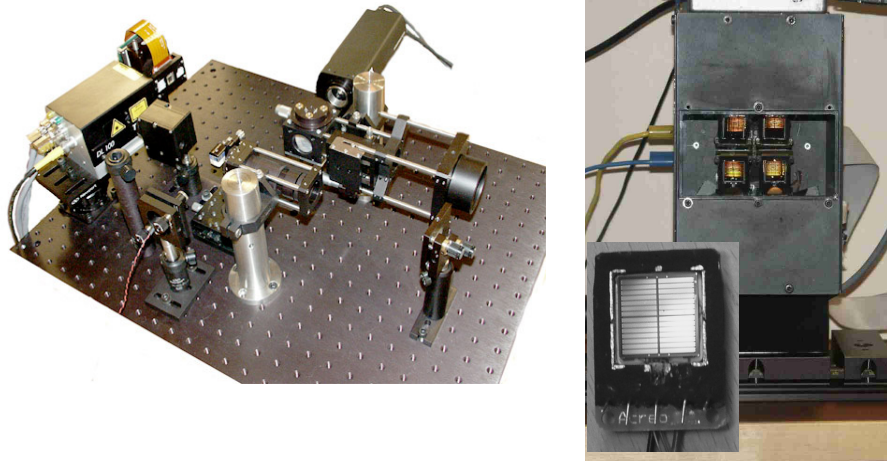
FOI har tillsammans med Acreo utvecklat en hel serie kvantbrunnsmodulatorer, där Acreo tillverkat komponenterna och systemtest utförts hos FOI. I flera fall har FOI behållit modulatorerna med tanke på framtida försök. En av de tidigaste modulatorerna har beteckningen TS2-S7. Beteckningen "TS" härstammar från Acreo. En senare modulator kallas TS9e_E7. Båda dessa modulatorer kommer att placeras i mätbänken på parkeringsytan för utrustning.



Figur 8 Exempel på kvantbrunnskomponenter i olika skeden, framtagna på Acreo och provade på FOI. Dessa modulatorer arbetar vid cirka 850 nm.

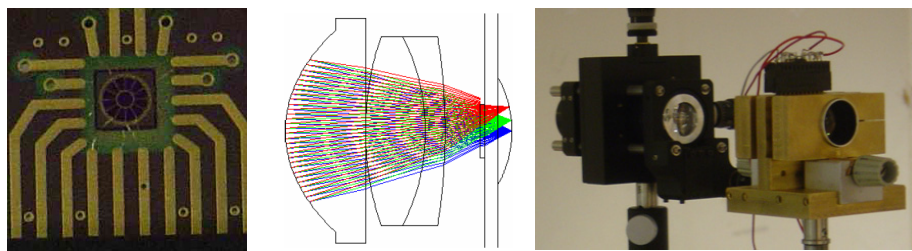
Inför visningen hösten 2003 byggde Acreo in fyra kvantbrunnsmodulatorer i en skyddande låda med fönster. De arbetar reflektivt och speglar laserstrålen i var sitt kubhörnsprisma. Varje par av modulator och reflektor kan vinklas fritt och på så vis bidra till ett större synfält. Eftersom modulationsvåglängden är temperaturberoende förseddes varje modulator med ett peltierelement och två fläktar hjälpte till att kyla lådan. Det visade sig dock att den första styrelektroniken för peltierelementen var instabil och inte kunde hålla modulatorerna vid rätt temperatur. På FOI byggdes därför ny styrelektronik för peltierelementen

och ett reglerprogram skrevs i LabVIEW. Programmet kördes på en bärbar dator och skickade ut styrsignaler från ett D/A-kort på en bandkabel till styrelektroniken som satt i en egen låda. Styrelektroniken var i sin tur kopplad till modulatorlådan via en bandkabel. Modulatorlådan, styrelektroniken och bandkablarna kommer att placeras i mätbalken på parkeringsytan för utrustning. Den bärbara datorn och D/A-kortet används dock i andra projekt.

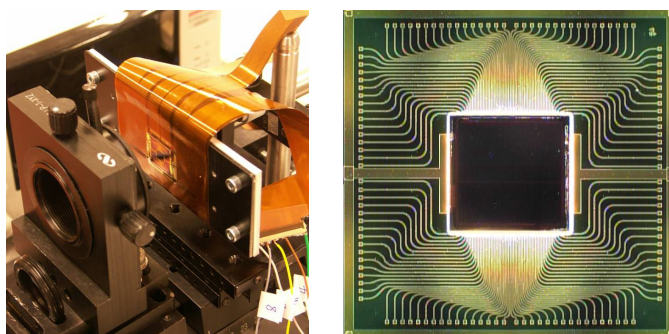


Figur 9 Demonstratorutrustning för retorkommunikation med kvantbrunnsmodulatorer. Till vänster visas den laserenhet som iordningställdes för proverna. Modulatorerna som användes är infällda i bilden till höger.

Två varianter av 1550 nm modulatorer för försöken med fokalplansmodulatorer ("cat's eye") har också tagits fram: En kombinerad arraydetektor och modulator med en rad med 64 element längs en linje, där varje element kan fungera antingen som detektor eller modulator och drivas separat och en cirkulär array med 8 element i en krans kring ett centrumelement.



Figur 10 Den segmenterade modulatorn för 1550 nm som användes vid "cat's eye"-retroförsök 2006, den optiska designen samt två realiseringar: en som byggdes på FOI med standardkomponenter och en som togs fram av Acreo.



Figur 11 "Cat's eye"-konfigurationen samt modulern för 850 nm som användes vid försök 2005.

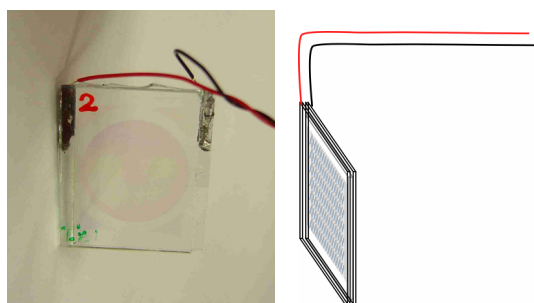
Vätskekristallmodulatorer

Vätskekristallceller har tagits fram på FOI med stöd från Chalmers tekniska högskola sedan 2001. De första åren färdigställdes celler i några olika serier med bokstavsbe-teckningar A–E. Dessa celler hade växlande funktionalitet och har i många fall inte bevarats.

De två sista serierna med beteckningarna F och G framställdes på ett standardiserat sätt, och alla komponenter som finns kvar från dessa serier kommer att sparas. Vätskekristallcellerna kommer att placeras i mäthallen på parkeringsytan för utrustning.

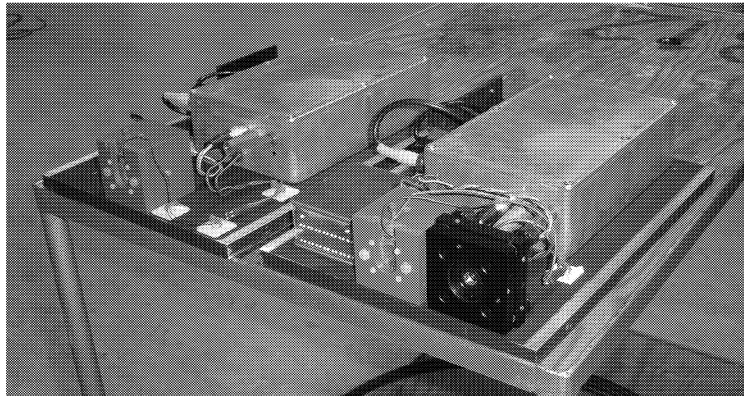
Sex modulatorer med den ferroelektriska vätskekristallen FELIX-020 tillverkades särskilt på Chalmers i celler med olika tjocklek (två på 1,5 μm , två på 1,7 μm , en på 2 μm och en på 6 μm). Dessa sitter fasttejpade i ett plastark, färdiga med ledare. Vätskekristallcellerna kommer att placeras i mäthallen på parkeringsytan för utrustning.

Chalmers framställde även en serie med vätskekristallceller som hade en ovanligt stor aktiv area (ITO-skikt) i form av en cirkulär skiva med diametern 16 mm. Cellerna skulle användas tillsammans med kubhörnsprismor av motsvarande storlek på bojen. Cellerna har givits beteckningen ch1–ch8. Cellerna ch1, ch3 och ch7 används i annan utrustning och ch 8 har en brännskada. De celler som inte används kommer att placeras i mäthallen på parkeringsytan för utrustning.



Figur 12 Vätskekristallbaserad modulator. I fotografiet skymtar det cirkulära området på 17 mm som styr vätskekristallen.

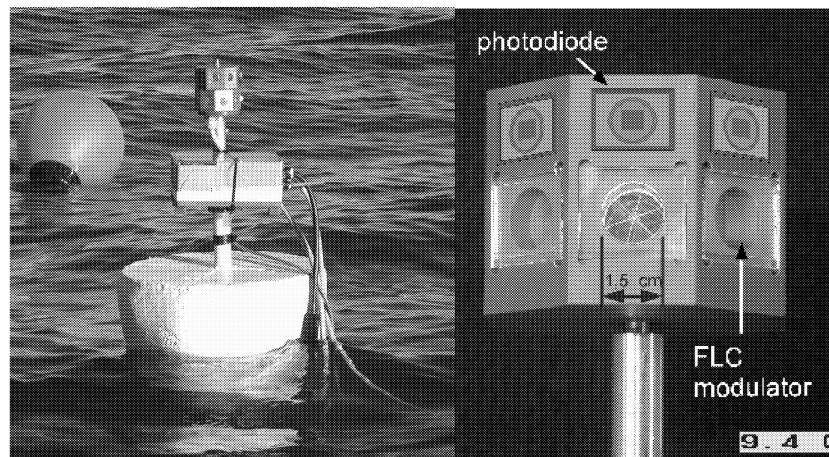
Tre liknande celler som inte är fyllda och som saknar ledare finns också tillgängliga. De ligger i en påse med texten PIN20 och kommer att placeras i mäthallen på parkeringsytan för utrustning.



Figur 13 Moduler som togs fram för montering i masten. Den vänstra omfattar en vätskekristallbaserad retromodulator och den högra även en laser som användes som "fyr" ledljus från retrokommunikationsenheten.

Monterade retromodulatorer på boj

Bojmodulatorens som användes i försöket på Roxen 2003 består av fyra huvuddelar: själva bojen, hållaren för retromodulatorerna, en låda med drivelektronik och ett batteri. Själva bojen består av en stång genom en cirka 50 cm hög frigolit-kon, som ger flytförmågan. Hållaren för retromodulatorerna har varit isärplockad för reparation efter att den vattenskadades och värmeslingorna brann upp. Den renoverades 2006 och testades tillsammans med drivelektroniken utan att några fel kunde påvisas. Det som återstår är att limma runt kanterna på modulatorerna för att täta dem och sedan skruva ihop hållarens två halvor. Batteriet var ett flera kilo tungt bilbatteri och fungerade som stabilisator genom att hänga under vattnet längst ned på bojstången. De ledande delarna är inneslutna i silikongummi. Bojens olika delar ställs nu undan i mätshallen på parkeringsytan för utrustning.

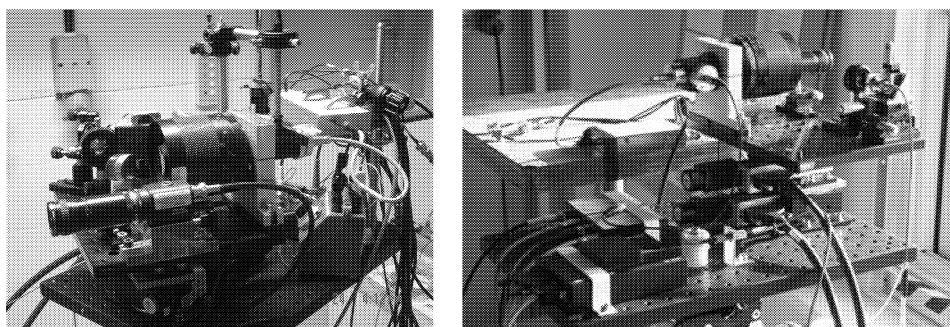


Figur 14 Bojsystem för sjötester samt tidig variant av modulatorkrans.

Laserenhet med tip-tilt-korrektion

En sändar-/mottagarenhet (laserenhet) med strålstyrning har konstruerats. Enheten skulle med utnyttjande av dynamisk vinkelkorrigering av lasertrålens riktning följa och kompensera för snabba ändringar i retroenhetens skenbara läge. Sådana ändringar uppstår på

grund av plattformens vibrationer och atmosfärens turbulens. Laserenheten designades för ljuskällor vid både 850 nm och 1550 nm för att möjliggöra tester med både kvantbrunns- och vätskekristallmodulatorer. Den innefattade polarisationsavkännande detektorer för avläsning av vätskekristallmodulatorer. Mottagaren konstruerades kring ett 500 mm objektiv med 8 cm apertur. Den styrbara spegeln reglerades med signalerna från en positionskänslig detektor för att hålla kvar laserstrålens inriktning mot retroenheten, även under inverkan av störning.



Figur 15 Laserenheter som har använts vid försök 2005–2007. Till vänster är den modifierad för att kunna sända och ta emot två laservåglängder, 850 nm och 1550 nm. Till höger är den modifierad för att kunna mäta polarisation med två ortogonala detektorer.

4 Icke-mekanisk strålstyrning

4.1 Tekniköversikt

Även om en retromodulator inte behöver någon särskild inriktning så är strålstyrning en viktig del för lasertransceivern som ska upprätthålla kommunikationslänken. Strålstyrning och strålförning är även viktigt för andra lasersystem som verkar på avstånd. Laserstrålar kan styras och formas med optiska komponenter som flyttas med elektriska servon, till exempel speglar, linser och prismor. Sådana system är relativt långsamma. En teknik som ger nya möjligheter att styra och forma laserstrålar är spatiella ljusmodulatorer (SLM:er) med vätskekristall. Dessa har en pixelerad struktur där vätskekristallens brytningsindex i varje pixel kan styras på elektronisk väg. Komponenten arbetar alltså icke-mekaniskt och blir därför snabb. Med en SLM följer nya möjligheter att kontrollera laserstrålens rörelse och position, skapa elektroniska linser, generera multipla strålar och strålförning. Komponentens vikt, volym och effektförbrukning kan reduceras. Exempel på tillämpningar utöver optisk kommunikation är DIRCM, kommunikation, spanings- och måligenkänningssystem. Forskning på SLM:er fortgår, exempelvis på Chalmers tekniska högskola. En begränsning för SLM:erna är den hastighet med vilken vätskekristallen slår om när det elektriska fältet ändras. Den pixelerade strukturen och de diskreta nivåerna för brytningsindex mellan varje pixel kan också leda till att ljus diffrakterar i oönskade riktningar. SLM:er som är pixelerade men använder kvantbrunnsteknik i stället för vätskekristaller har tagits fram i laboratorieskala. Dessa har potentialen att bli mycket snabba och dessutom kompakta.

4.2 Projekt på FOI

Verksamhet inom icke-mekanisk strålstyrning pågick på FOI mellan åren 2001 och 2004 som del i ett doktorsarbete. Tekniken som användes var spatiella ljusmodulatorer (SLM:er) med nematisk vätskekristall. Ett par olika utrustningar för att styra och forma laserstrålar togs fram. Med en utrustning visades hur en laserstråle kunde följa ett föremål som rör sig och även delas upp i flera delstrålar. En mer avancerad utrustning för följning av en retrokommunikationslänk togs fram och visades upp hösten 2003. Laserstrålen styrdes ut av en SLM och det reflekterade ljuset detekterades av en snabb videokamera som återkopplade signalen till strålstyrningen. Kommunikationsenheten kunde följas i en dimension i ett vinkelområde på 10 mrad och med en vinkelhastighet på 1 mrad/s.

4.3 Framtagen teknik på FOI

Studien med icke-mekanisk strålstyrning inleddes med två kommersiellt tillgängliga SLM:er; en 128×128 tvådimensionell SLM och en 1×4096 endimensionell. Båda använde sig av nematiska vätskekristaller med pixlarna mot en reflekterande kiselyta. Inför visningen köptes en nyutvecklad SLM in. Även den specificerades som en reflektiv endimensionell komponent med 1×4096 pixlar. Den skulle optimeras för 850 nm och kunna uppdateras med 30 Hz. Tillverkaren skickade med program för individuell styrning av pixlarna.

En transceiver konstruerades för att följa retromodulatorer i rörelse och samtidigt kommunicera med dem (Figur 9, sidan 18). En laser belyste SLM:en som styrde ut strålen genom ett teleskop. Teleskopet fungerade dels som en utväxlare för strålvinkeln, dels samlade det in den återreflekterade strålen från retromodulatorn. En snabb kamera med förmågan att återge 600 bilder/s kände av positionen på den återreflekterade strålen. Ett datorprogram med kontrol-loop utvecklades på FOI och programmet styrde SLM:en med ledning av data

från kameran så att strålen kunde följa retromodulatore. Den återreflekterade strålen fick sedan falla på en detektor som läste av informationsinnehållet i den modulerade strålen. Transceivern finns inte längre kvar, utan har plockats ned i sina beståndsdelar. Några av SLM:erna finns bevarade på FOI.

Chalmers utvecklade senare en SLM för strålstyrning baserad på ferroelektrisk vätskekristall med "V-shaped switching". Komponenter var endimensionell med 1×256 pixlar och ljusstyrkan i en viss riktning varierade kontinuerligt. Anti-ferroelektrisk vätskekristall studerades också, eftersom den kan styras till tre olika lägen.

5 Kommunikation i urban miljö med ultraviolett strålning eller väggreflektioner

5.1 Tekniköversikt

Militära operationer i urban miljö innebär att soldater ofta till fots kommer att röra sig utomhus, inne i byggnader och under marknivå i kulvertar och dylikt. Händelseförloppen är ofta snabba och lägesuppfattning för varje enskild soldat som position och status på gruppmedlemmarna kan vara kritisk information för att lösa uppgiften. Då sensorer och autonoma farkoster införs som en taktisk del måste även dess information utan omvägar nå förbanden i området. Trådlösa kommunikationssystem är därför synnerligen viktiga för strid i urban miljö. Radio är naturligtvis det främsta medlet men FSO kan vara ett alternativ i urban miljö tack vare störtåligheten, dess smygegenskaper, den höga datatakten samt att licens och frekvensallokering ej är nödvändig. Den optiska kommunikationen i urban miljö har dock en del nackdelar jämfört med radio. Det normala kravet för FSO är en fri siktsträcka mellan sändare och mottagare vilket inte alltid är möjligt i stadsmiljö. Dagens FSO länkar är heller inte konstruerade för rörliga plattformar utan enbart för dubbelriktad kommunikation mellan byggnader. Intressanta möjligheter specifikt för urbana miljöer ges därför av indirekt FSO och retrokommunikation. Retrokommunikation enligt tidigare beskrivning har förts fram som en potentiell lösning för mobila och lätta kommunikationssystem. Indirekt FSO där väggreflexer eller diffus spridning från atmosfären används för att länka kommunikationssignalen över brutna siktlinjer. Ett exempel är att lysa med en modulerbar lasersändare mot en vägg som observeras med specialkonstruerade kikare/laseravståndsmätare av förbandsmedlemmar som befinner sig utom siktlinjen. Konceptet skulle kunna realiseras och integreras i olika utföranden, från kikarlasar till mer avancerade lasersystem. Ett annat koncept är att belysa atmosfären med modulerat ultraviolett (UV) ljus. Genom att använda UV-ljus i det ultravioletta området under cirka 280 nm försvinner solbakgrunden och det blir i princip helt mörkt i bakgrunden. Detektorer med hög känslighet kan då användas för att på platser vid sidan av registrera vad som sänds upp mot himlen från en UV-laser sändare. Nya ljuskällor och detektorer inom UV området för närvarande under utveckling kan bidra till att öka möjligheterna med denna teknik.

5.2 Projekt på FOI

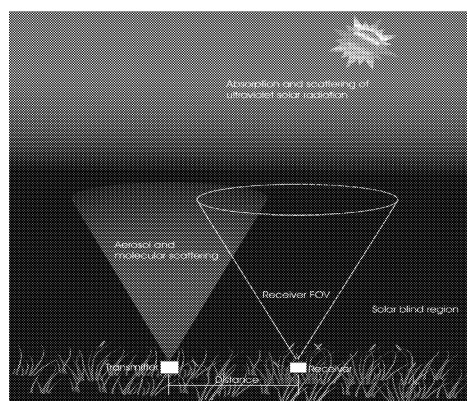
KOMET (urban miljö)

I KOMET genomfördes utvärdering av retrokommunikation och kommunikation med bruten siktlinje i urban miljö. Möjligheten att utnyttja reflektioner från exempelvis väggar för att nå mottagaren har studerats. Mätningar av spridningen och dämpningen av signalen med olika typer av ytor och med olika aktuella våglängder har genomförts. Beräkningar utifrån mätningarna visar på en begränsad räckvidd för denna typ av system vilket beror på den begränsade lasereffekten och både spridningen och dämpningen av signalen då den reflekteras mot ytan. Ett avstånd på upp till 50 meter mellan den reflekterade ytan och mottagaren fanns vara möjlig, under förutsättning att bakgrundsbruset i form av solljus och andra ljuskällor kan filtreras bort på ett effektivt sätt.

Ultraviolett kommunikation

Under 2005 startade ett IFV-projekt kallat "Ultraviolett kommunikation" (I 3485) med syfte att undersöka möjligheterna med att kommunicera med ultraviolett laser. År 2006

förlängdes arbetet med ett framtagande av ett mätsystem innehållande sändare, mottagare och datainsamling. Det konstruerade mätsystemet möjliggjorde mätningar utomhus med spridning i atmosfären i det solblinda våglängdsområdet. En sändare med en ultraviolett laser riktades upp mot atmosfären. Strålen har därefter spridits för att sedan kunna detekteras av en mottagare nere på marken. Försök har utförts med olika avstånd mellan sändare och mottagare (mellan 10 m och 81 m). Olika divergenser har testats hos den utsända strålen (cirka 1°, 8°, 19° och 43°). Vidare har sändarenheten och mottagarenheten testats att vinklas i olika grader upp mot atmosfären. Med 10 m mellan enheterna visade det sig att signaler togs emot relativt lätt. På mätningarna då avståndet var 40 m uppnåddes förväntningarna om signalernas uppförande gällande divergens och lutning av sändar-/ mottagarenheter. Vid mätningarna då enheterna ställdes 81 m från varandra, började det bli allt svårare att detektera signalerna.

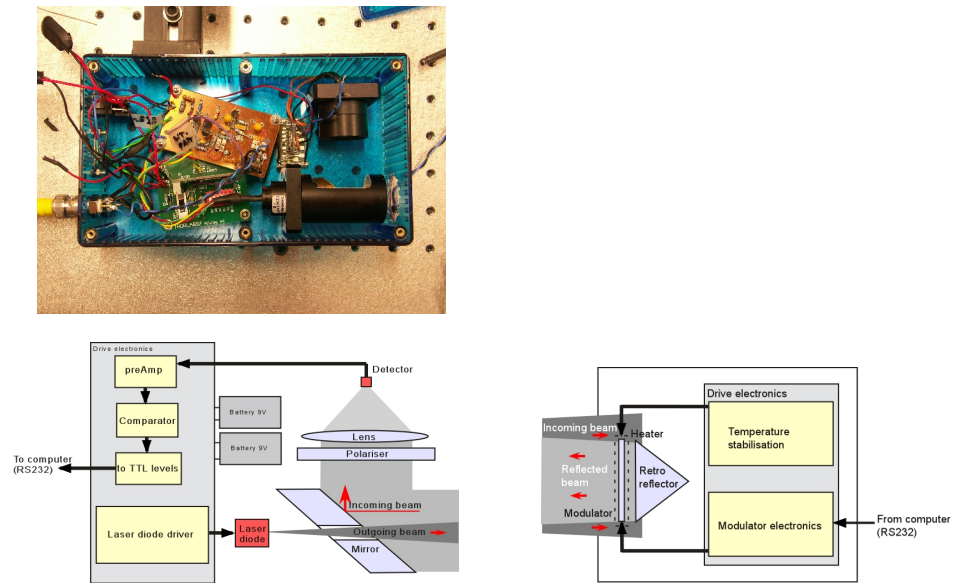


Figur 16 Illustration av kommunikation via spridning i atmosfären. UV-ljus i det solblinda området, under 280 nm gör solbakgrunden blir obefintlig. Det blir med andra ord svart i bakgrund och kommunikationssignalen kan lättare detekteras

5.3 Framtagen teknik på FOI

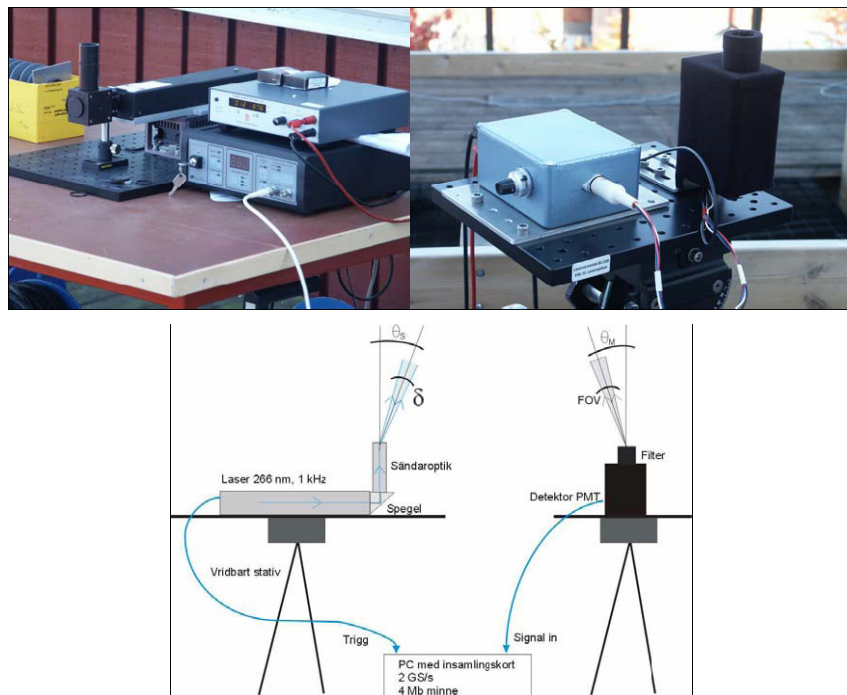
Handhållen retrokommunikationsutrustning

En laserenhet avsedd för enkel handburen inriktning mot retrokommunikationsenheter på avstånd under en kilometer har tagits fram. Systemet demonstrerades 2005 på kortare avstånd. Vätskekristaller användes i retromodulatorerna. Data kunde överföras från retromodulatore till transceiver på relativt korta avstånd medan transceivern hölls i handen och riktades mot retromodulatore. Utrustningen visades upp vid olika demonstrationstillfällen bland annat på Försvarshögskolan.



Figur 17 Enklare handhållen laserenhet och retromodulator. Utrustningen togs fram för demonstrationer på kortare avstånd.

Sändare och mottagare för prover av ultraviolett kommunikation via atmosfärspridning.



Figur 18 Sändare med laser, kylning, linser och spegel. Mottagare med PMT (detektor), optiskt bandpassfilter, bländare och elektronik för inställning av förstärkning. Mätuppställningen: Till vänster visas sändarenheten som består av en laser (266 nm) med tillhörande optik. Laserstrålen sänds med vinkeln θ_s och divergensen δ . Till höger visas mottagarenheten med PMT. Mottagarens synfält anges som FOV (field of view).

6 Kvantoptisk nyckelöverföring

6.1 Tekniköversikt

Kvantoptisk nyckelöverföring (även kallat kvantkryptografi) är ett sätt att säkert överföra krypteringsnycklar utan att överföringen kan avlyssnas utan att det upptäcks. Denna säkerhet är garanterad av fysikaliska lagar till skillnad från de flesta kryptografiska metoder som används till exempel på Internet idag och förlitar sig på att vissa beräkningar tar tid och datorkraft att genomföra. Modern fotonisk teknologi har gjort det praktiskt möjligt att ta fram system för kvantoptisk nyckelöverföring. Fiberbaserade system finns redan kommersiellt. Även FSO-system för kvantoptisk nyckelöverföring utvecklas i flera forskningsgrupper.

Den enklaste formen av kvantoptisk nyckelöverföring för FSO baseras på att enstaka fotoner kodas med avseende på deras polarisation. Så kan till exempel vertikal och horisontell polarisation användas för binär kodning med två tecken. För att detta skall fungera helt utan avlyssningsrisk måste varje puls innehålla endast en foton samt att varianter av polarisationstillståndsbaser blandas slumpmässigt. Efter den kvantoptiska överföringen genomförs flera steg för att extrahera en säker nyckel. I detta ingår bland annat felrättning och så kallade säkerhetsförstärkning. Nyckelextraktionen sker genom kommunikation på en öppen kanal, det vill säga en kanal som kan avlyssnas. Om kvantkommunikation avlyssnas kommer man att upptäcka det genom bitfelet ökar. Om kvantkanalen inte avlyssnas blir slutresultatet är att en slumpmässig bitsträng som direkt kan användas som krypteringsnyckel på en godtycklig kommunikationskanal, till exempel telefon, Internet, radio eller en optisk länk.

De flesta kvantoptiska nyckelöverföringar fram till idag har gjorts med dämpade lasrar som källa. Denna källa ger emellanåt pulser med mer än en foton och därför försöker man framställa bättre källor som aldrig ger mer än en foton per puls. Det vanligaste sättet för att skapa en sådan källa är att isolera en enstaka emitter, till exempel en atom eller en molekyl, och sedan välja ut en enskild energiövergång så att endast en foton kan emittera åt gången. Även mer komplicerade protokoll baserade på så kallade sammanflätade fotoner har föreslagits och testats.

6.2 Projekt på FOI

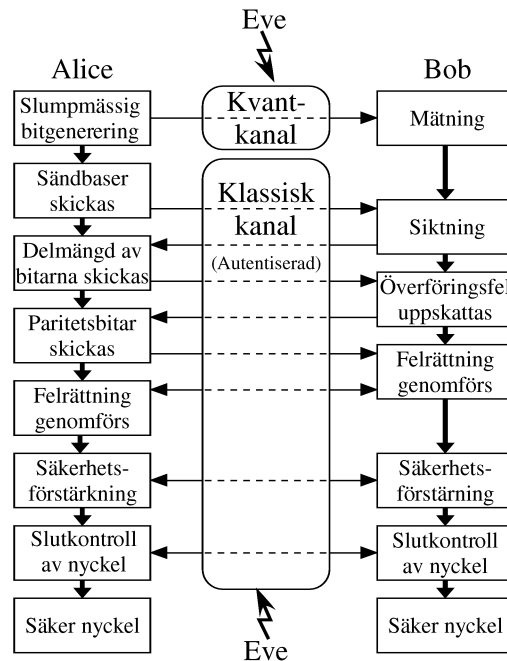
Förstudie

En förstudie på området presenterades 2004. Kvantoptisk nyckelöverföring presenterades i allmänhet och tillämpningar i fria rymden i synnerhet. De då senaste årens experiment på kvantoptisk nyckelöverföring i fria rymden och hur metoden kan användas i militära tillämpningar gicks igenom och förslag på fortsatt verksamhet gavs.

Koder för nyckelextraktion

Nyckelextraktionen vid kvantoptisk nyckelöverföring studerades under 2005. Det blir oundvikligen fel i kvantkanalen, dels på grund av brister i systemet och dels på grund av eventuell tjuvlyssning. Dessa fel måste rättas för att den slutliga nyckeln skall vara användbar. Detta görs med felrättning där information överförs på en klassisk kommunikationskanal. En potentiell tjuvlyssnare kan skaffa sig information både via kvantöverföringen och via den efterföljande kommunikationen vid nyckelextraktionen. Tjuvlyssnarens information kan dock reduceras genom så kallad säkerhetsförstärkning i ett sista steg, där

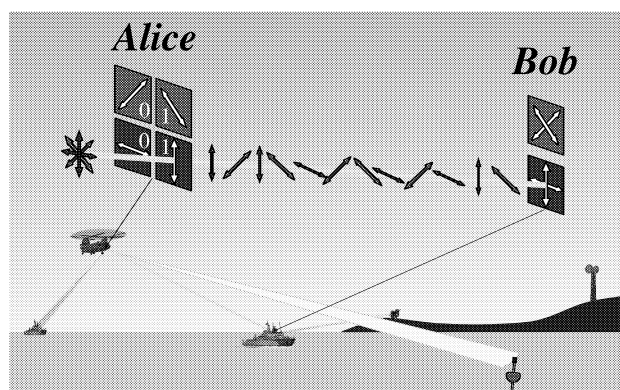
bitar i nyckeln offras för att en önskad säkerhetsnivå skall uppnås. På FOI genomfördes en omfattande analys av olika metoder för nyckelextraktion och fyra protokoll implementerades. Protokollens prestanda utvärderades med Monte Carlo-simuleringar. Slutsatsen var att tre av de testade protokollen hade egenskaper som gör dem användbara för kvantoptisk nyckelöverföring



Figur 19 Flödesschema för kvantmekanisk nyckelöverföring

Kvantnyckelöverföring i taktiska tillämpningar

En särskild studie med koppling till retrokommunikation och taktiska tillämpningar genomfördes 2005. Som redan nämnts krävs två kanaler för att genomföra kvantoptisk nyckelöverföring. Den ena kanalen används för att överföra enstaka fotoner och den kallas normalt kvantkanal. På den andra kanalen, som brukar kallas klassisk eller öppen kanal, kommunicerar därefter sändare och mottagare för att extrahera en säker nyckel utifrån informationen som sänds på kvantkanalen. Flera fördelar med att implementera även den klassiska på en FSO-länk lyftes fram. Speciellt studerades hur kvantkanalen skulle kunna integreras med en retrokommunikationslänk och ett förslag till integration och realisering gavs. Även en teoretisk analys av turbulensen inverkan på en sådan länk genomfördes.



Figur 20 Kvantnyckelöverföring i taktiska tillämpningar.

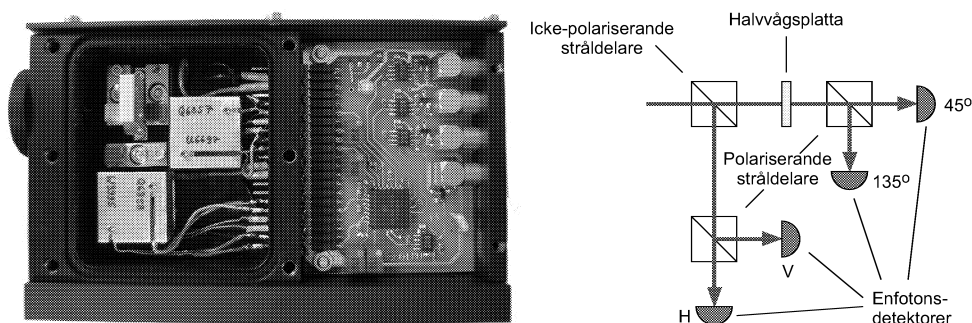
6.3 Framtagen teknik på FOI

Programkod

Fyra protokoll för nyckelextraktion vid kvantoptisk nyckelöverföring har implementerats i programspråket Java: Cascade, Yamamura and Ishizuka's, Low Density Parity-Check Codes och Winnow.

Kvantmottagare

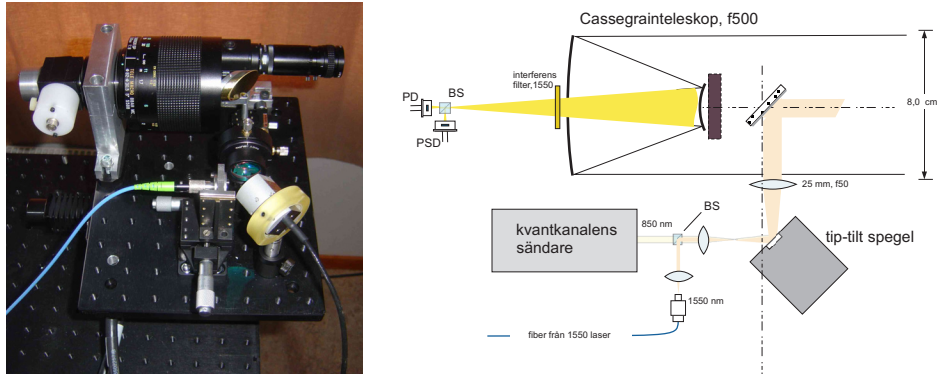
En mottagare för kvantoptisk nyckelöverföring upphandlades på uppdrag av FMV. Den kanske mest kritiska komponenten för kvantoptisk nyckelöverföring är kvantmottagaren. Denna skulle kunna konstrueras med en modulator, lite polarisationsoptik och en enfotonsdetektor. I stället för att utveckla en egen kvantmottagare valde vi att köpa in denna komponent. Mottagaren vi köpte är i princip identisk med de som både LMU och QinetiQ använder i sina system. Mottagaren köptes från Qutools, ett företag som några medarbetare vid LMU har startat eftersom universitetet inte har rätt att sälja produkter. Mottagaren är principiellt uppbyggt som visas i Figur 21. Som enfotonsdetektorer används fyra passivt återställda lavinfotodioder i kisel. I modulen ingår även förstärkare och diskrimineringskretsar för att avgöra vilka pulser som ska anses vara en detektion (ett klick). På utgången erhålls cirka 20 ns långa pulser med en spänning på cirka 1 V för varje klick.



Figur 21 Fotografi av Qutools kvantmottagare samt principskiss.

Lasersändare för prover av kvantteknik i taktiska tillämpningar.

En lasertransceiver för prov av taktisk kvantnyckelöverföring designades och iordningställdes under 2005.



Figur 22 Till vänster visas ett fotografi på en laserenhet som utprovades för kombinerad 850/1550 nm-sändning. Tip/tilt-spegeln syns i undre högra hörnet. Kvantkanalen enligt ritningen finns inte med. I ritningen till höger visas schematiskt de grundläggande komponenterna i laserenheten. Kvantkanalens sändare vid 850 nm blandas med 1550 nm-strålen i en stråldelare (BS) som kan vara dikroisk eller anpassad för 1550 nm. Tip/tilt-spegeln styr gemensamt riktningen för de båda utgående strålarna i synfält för cassegrainteleskopet.

7 Övrigt

Vid sidan av de tekniska projekt som redovisats i de föregående kapitlen har FOI dessutom genomfört eller medverkat i flera riktade studier.

- Tidigt genomfördes en förstudie för hela området fri optisk kommunikation.
- År 2001 genomfördes en riktad studie mot marina tillämpningar.
- FOI bidrog 2003 till en omfattande studie om kommunikationssystem till ubåtsprojektet Viking.
- En studie om laserkommunikation för spridning av data för verkan-motmedelssystem (VMS) inom fartygsförband genomfördes 2005.
- Initiativet till en europeisk studie på området togs 2005 av FOI. Samverkansprogrammet "Free Space Optical Communication for Tactical Applications", Erg No. 1, TA 108.077 genomfördes 2005–2006. Sex länder deltog (Sverige, Storbritannien, Danmark, Nederländerna, Spanien och Belgien) och FOI ledde gruppen.

FOI har utvecklat ett stort antal tekniker och metoder som har varit viktiga för arbetet och som inte har publicerats tidigare. De är inte heller upptagna i denna rapport. Avsikten är därför att i närtid publicera en rapport som beskriver dessa tekniker.

8 Referenser

Referenserna ges i kronologisk ordning så långt det är möjligt.

1. Sverker Hård, Stellan Jacobsson, Björn Löfving, Ulf Olin, Per Rudquist, Lars Sjöqvist, Ove Steinvall och Sten Walles: *Laser Beam Steering - An Introductory Study*. FOA-R--99-01158-408--SE, Försvarets forskningsanstalt (FOA), Linköping, juni 1999.
2. Göran Bolander, Anders Ekdahl, Björn Knuthammar, Lars Sjöqvist och Ove Steinvall: *Fri optisk kommunikation - En förstudie*. FOA-R--99-01296-504--SE, Försvarets forskningsanstalt (FOA), Linköping, december 1999.
3. Lars Sjöqvist, Koen D'havé, Sverker Hård, Tomasz Matuszczyk, Per Rudquist och Sten Walles: *Laser beam steering - Final report*. FOA-R--00--01684-408--SE, Försvarets forskningsanstalt (FOA), Linköping, december 2000.
4. Lars Sjöqvist, Fredrik Kullander, Mikael Lindgren och Ove Steinvall: *Optisk kommunikation i undervattenstillämpningar*. FOI-R--0111--SE, Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI), Linköping, mars 2001.
5. Ove Steinvall: *Reduktion av turbulensfädnings hos laserkommunikationslänkar*. FOI-R--0200--SE, Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI), Linköping, september 2001.
6. David Engström, A. Magnusson, Sverker Hård, Per Rudquist, Koen D'havé, Tomasz Matuszczyk, Lars Sjöqvist och Emil Hällstig: *Beam steering by combination of two binary liquid crystal SLM's*. Konferensbidrag: Budapest, oktober 2001: EOS Topical meeting on diffractive optics.
7. Lars Sjöqvist, Emil Hällstig, Johan Öhgren, David Engström, Koen D'havé, Tomasz Matuszczyk, Per Rudquist, Sverker Hård, Stéphane Junique, Qin Wang och Bertrand Noharet: *Retroreflective free-space optical communication using non-mechanical laser beam steering and MQW modulators*. Konferensbidrag: Optik i Sverige, Stockholm, 8 november 2001: Proc. Summaries of contributions to the conference. Särtryck: FOI-S--0317--SE, Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI), Linköping, 2002.
8. Johan Öhgren, Fredrik Kullander och Lars Sjöqvist: *Retrocommunication with ferroelectric liquid crystal modulators - Preliminary results*. FOI-R--0325--SE, Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI), Linköping, december 2001.
9. Lars Sjöqvist: *Retroreflective free-space optical communication - Start report*. FOI-D--0016--SE, Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI), Linköping, 2001.
10. Lars Sjöqvist: *Retroreflective free-space optical communication - Status report S2*. FOI-D--0032--SE, Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI), Linköping, 2001.
11. Lars Sjöqvist, Sverker Hård, Stéphane Junique, Bertrand Noharet, Per Rudquist: *Retroreflective free-space optical communication - System analysis and performance*. FOI-R--0344--SE, Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI), Linköping, 2001.
12. Fredrik Levander och Per Sakari: *Design and analysis of an all-optical free-space communication link*. FOI-R--0486--SE, Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI), Linköping, maj 2002.
13. Daniel Ågren, Stéphane Junique och Qin Wang: *Final report WP B2 MQW retro-modulators*. Acreo, Kista, oktober 2002.
14. Johan Stigwall: *Optimization of a spatial light modulator for beam steering and tracking applications*. FOI-R--0552--SE, Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI), Linköping, december 2002.

15. Lars Sjöqvist: *Retroreflective free space optical communication - Status report S3*. FOI-D--0048--SE, Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI), Linköping, 2002.
16. Johan Öhgren, Andreas Olsson och Stan Zyra: *Utvärdering av vätskekristallmodulatorer och retroreflektorer för laserkommunikation*. FOI-R--0794--SE, Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI), Linköping, januari 2003.
17. Rolf Dahlberg och Magnus Levin: *Teknisk prognos fotonik FMV analys*. 21841/10115:03, Försvarets materielverk (FMV), mars 2003.
18. Lars Sjöqvist: *Novel technologies for free-space optical communication by combining multiple quantum well modulators and non-mechanical beam steering*. Konferensbidrag: Northern Optics 2003, Espoo, 16–18 juni 2003: Helsinki University of Technology publications in Engineering Physics, TKK-F-A822, p. 110 (Invited talk). Särtryck: FOI-S--1249--SE, Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI), Linköping, 2004.
19. Åsa Waern, Peter Johansson, Bengt Lundborg, Elisabeth Löfsved, Per Sakari: *The communication channel in urban operations - A first survey*. FOI-R--0884--SE, Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI), Linköping, juni 2003.
20. Per Sakari och Magnus Pettersson: *Optical communication in urban areas - focus on non line-of-sight optical communication*. FOI-R--0944--SE, Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI), Linköping, september 2003.
21. Elisabeth Löfsved, Gunnar Eriksson, Peter Holm, Peter Johansson, Magnus Pettersson, Per Sakari och Åsa Waern: *Litteratur- och konferensbevakning 2003*. FOI-R--1051--SE, Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI), Linköping, 2003.
22. Fredrik Kullander, Andreas Olsson, Erland Sangfelt, Lars Sjöqvist, Stan Zyra och Johan Öhgren: *Free-space optical communication with underwater systems using modulated retro-reflectors*. FOI-R--0951--SE, Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI), Stockholm, 2003.
23. David Engström: *Beam steering using liquid crystal based spatial light modulators*. Technical report no. 483L, Chalmers tekniska högskola (CTH), Göteborg, 2003.
24. Alfred Möller, Gert Vedstrup, Lars Brandt, Hans Henrik Schultz, Bjarne Damsgård, Erland Sangfeldt, Tommy Öberg, Arne Lindblad, Fredrik Kullander, Jan Nilsson, Stig Lodoen och Robert Macdonald: *Viking communication study – Final report*. Danish Defence Research Establishment, DDRE report no. I-11/2003, 2003.
25. Per Jonsson: *Review of free-space quantum key distribution*. FOI-R--1165--SE, Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI), Linköping, januari 2004.
26. Lars Sjöqvist, Emil Hällstig, Johan Öhgren och Lars Allard: *Retrocommunication - final report*. FOI-R--1220--SE, Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI), Linköping, mars 2004.
27. Åsa Waern, Peter Johansson och Magnus Pettersson: *Kommunikation vid urban krigsföring - Radio och laser*. FOI-R--1279--SE, Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI), Linköping, juni 2004.
28. Johan Öhgren, Emil Hällstig, Per Jonsson, Fredrik Kullander, Magnus Pettersson, Per Sakari, Lars Sjöqvist och Ove Steinvall: *Ny teknik för fri optisk kommunikation*. Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI), Linköping, oktober 2004. Reklamblad för konferens.
29. Johan Öhgren, Emil Hällstig, Per Jonsson, Fredrik Kullander, Magnus Pettersson, Per Sakari, Lars Sjöqvist och Ove Steinvall: *Novel techniques in free-space optical communication*. Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI), Linköping, oktober 2004. Reklamblad för konferens.

30. Johan Öhgren och Claes Vahlberg: *Utveckling av nya vätskekristallmodulatorer - bestämning av optiska och elektriska egenskaper*. FOI-R--1486--SE, Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI), Linköping, december 2004.
31. Per Sakari, Magnus Pettersson och Johan Öhgren: *Retrokommunikation i stadsmiljö*. FOI-R--1466--SE, Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI), Linköping, december 2004.
32. Emil Hällstig: *Nematic liquid crystal spatial light modulators for laser beam steering*. ISBN 91-554-6110-7, ISSN 1104-232X, Acta universitatis Upsaliensis, Uppsala, 2004.
33. Stéphane Junique: *Surface-normal multiple quantum well electroabsorption modulators based on GaAs-related materials*. KTH/MVT/FR--05/1--SE, ISSN 0348-4467, KTH Microelectronics and information technology, Stockholm, januari 2005.
34. Fredrik Kullander, Per Sakari, Lars Sjöqvist och Johan Öhgren: *System trials with modulated retro-reflective optical communication links*. Konferensbidrag: SPIE, Brügge, Belgien, 26–28 september 2005: Proc. of SPIE European symp. on Optics/Photonics in Security & Defence 2005, vol. 5986, p. 598612-1--12. Särtryck: FOI-S--2064--SE, Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI), Linköping.
35. Per Sakari och Magnus Pettersson: *Laserkommunikation för spridning av VMS-data inom fartygsförband*. FOI-R--1718--SE, Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI), Linköping, september 2005.
36. Per Grönberg och Per Jonsson: *Key reconciliation in quantum key distribution*. Konferensbidrag: London, 7 december 2005: IEE seminar on quantum cryptography: secure communications, proc. 14/1-20. Särtryck: FOI-S--2108--SE, Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI), Linköping, 2005.
37. Dong Zhang: *A free space optical communication link with a combined modulator-detector array*. Acr-017212, Acreo AB, Kista, 15 december 2005.
38. Jouni Rantakokko: *Kan prestanda för retrokommunikationssystem förbättras genom att använda traditionella radiosystemtekniker?* FOI-R--1883--SE, Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI), Linköping, december 2005
39. Fredrik Kullander, Lars Allard, Jouni Rantakokko, Per Sakari, Lars Sjöqvist och Johan Öhgren: *Optisk retrokommunikation - statusrapport*. FOI-R--1847--SE, Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI), Linköping, 2005.
40. Åsa Waern, Bengt Lundborg, Elisabeth Löfsved, Gunnar Eriksson, Johan Öhgren, Jouni Rantakokko, Magnus Pettersson och Per Sakari: *Slutrapport för projekt KOMET*. FOI-R--1810--SE, Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI), Linköping, 2005.
41. Per Grönberg: *Key reconciliation in quantum key distribution*. FOI-R--1743--SE, Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI), 2005.
42. David Engström: *Multi-level lossless phase modulation in liquid crystals for high-speed spatial light modulators*. ISBN 91-7291-795-4, Technical report MC2-71, ISSN 0346-718x, Chalmers university of technology, Göteborg, juni 2006.
43. Fredrik Kullander, Lars Sjöqvist och Per Jonsson: *Effects of turbulence on a combined 1535 nm retro reflective and a low intensity single path 850 nm optical communication link*. Konferensbidrag: Stockholm, 11–14 september 2006: SPIE vol. 6399, p. 639906-1--12. Särtryck: FOI-S--2371--SE, Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI), Linköping, 2006.
44. Jouni Rantakokko och Peter Holm: *Improved robustness and capacity in modulated retro-reflective (MRR) optical communication links*. Konferensbidrag: Stockholm, 11–14

september 2006: Advanced free-space optical communication techniques/applications III. Särtryck: FOI-S--2350--SE, Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI), Linköping, 2006.

45. Fredrik Kullander, Lars Sjöqvist, Johan Öhgren och Jouni Rantakokko: *Laser communication with modulated retro reflectors - progress report*. FOI-R--2196--SE, Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI), Linköping, december 2006.

46. Per Jonsson, Fredrik Kullander och Lars Sjöqvist: *Studie av ett taktiskt system för kvantoptisk överföring av krypteringsnycklar*. FOI-R--1942--SE, Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI), Linköping, 2006.

47. Anders Eriksson, Markus Henriksson, Per Jonsson, Lars Sjöqvist och Ove Steinvall: *Ultrakorta laserpulser i verkanslaser och sensortillämpningar*. FOI-R--2071--SE, Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI), Linköping, 2006.

48. Fredrik Kullander och Lars Sjöqvist: *Free-space optical communications for tactical applications WP1 - Systems and applications from a user perspective*. FOI-R--2066--SE, Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI), Linköping, 2006.

49. Johan Öhgren, Fredrik Kullander, Lars Sjöqvist, Kun Wang, Qin Wang, Stéphane Junique, Susanne Almqvist och Bertrand Noharet: *A high-speed modulated retro-reflector communication link with a transmissive modulator in a cat's eye optics arrangement*. Konferensbidrag: SPIE, Florens, 17–20 september 2007: Unmanned/Unattended Sensors and Sensor Networks IV, sidorna 673619-1--11. Särtryck: FOI-S--2662--SE, Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI), Linköping.

50. Stéphane Junique: *Surface-normal multiple quantum well electroabsorption modulators - for optical signal processing and asymmetric free-space communication*. KTH/ICT-MAP/AVH-2007:8-SE, ISSN 1653-7610, Royal institute of technology (KTH), Stockholm, september 2007.

51. Marie Andersson, Magnus Pettersson, Per Jonsson och Stan Zyra: *Ultraviolet kommunikation*. FOI Memo 2044, Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI), Linköping, 2007.

52. Kun Wang: *Remote transceiver for optical wireless communications*. IMIT/MAP/Optics 2007-1, Stockholm, 2007. Examensarbete vid Kungliga tekniska högskolan (KTH) och Acreo AB.

53. Kun Wang, Bertrand Noharet, Stéphane Junique, Qin Wang, Susanne Almqvist, Johan Öhgren, Fredrik Kullander och Sergei Popov: *A cat's eye design for 1550 nm free-space optical links*. Okänt publiceringsår.