

Per Sakari, Magnus Pettersson, Johan Öhgren

RETROKOMMUNIKATION I STADSMILJÖ



TOTALFÖRSVARETS FORSKNING SINSTITUT

Ledningssystem

Box 1165

581 11 LINKÖPING

FOI-R--1466--SE

December 2004

ISSN 1650-1942

Teknisk rapport

Per Sakari, Magnus Pettersson, Johan Öhgren

RETROKOMMUNIKATION I STADSMILJÖ

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Ledningssystem Box 1165 581 11 LINKÖPING	Rapportnummer, ISRN FOI-R--1466--SE	Klassificering
	Forskningsområde 5. Uppdragsfinansierad verksamhet	
	Månad, år December 2004	Projektnummer E7063
	Delområde 41 Ledning med samband och telekom och IT-system	
Författare/redaktör Per Sakari Magnus Pettersson Johan Öhgren	Projektledare Åsa Waern	
	Godkänd av Ove Steinvall	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning HKV	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig	
Rapportens titel Retrokommunikation i stadsmiljö		
Sammanfattning (högst 200 ord) I det framtida nätverksbaserade försvaret finns ett ökat kommunikationsbehov. Nya system och sensorer ökar kravet på väl fungerande kommunikationslösningar, inte minst i urban miljö. Fri optisk kommunikation kan vara ett bra alternativ till radio i många tillämpningar. Denna rapport visar studier av hur retroreflekterande teknik kan användas för fri optisk kommunikation. Rapporten ger en tekniköversikt och redovisar beräkningar på möjliga länkprestanda för ett retrokommunikations-system. Vidare redovisas resultat från praktiska försök med vätskekristallmodulatorer. Retrokommunikation på 1 km avstånd med låg lasereffekt (6mW) har visats och teknik för att reducera turbulenseffekter har testats med gott resultat. Resultaten visar på möjligheten att utveckla små, billiga och strömsnåla kommunikationsenheter som skulle kunna användas i en urban miljö. En begränsning med denna modulortyp är dock överföringshastigheten, som vid försöken begränsats till några enstaka kbps. Utvecklingen inom modulatorområdet är dock stor och exempelvis kvantbrunnsmulatorer medger redan idag betydligt högre kommunikationshastigheter. Arbetet har bedrivits inom FoT-projektet "Kommunikationkanalens egenskaper i tätort", (KOMET). Delar av försöken har genomförts i samverkan med FM-projektet "Kommunikationslänk under vattnet".		
Nyckelord Fri optisk kommunikation, laserkommunikation, retrokommunikation, retromodulator.		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 31 s.	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Command and Control Systems P.O. Box 1165 S-581 11 LINKÖPING	Report number, ISRN FOI-R--1466--SE	Report type Technical report
	Programme Areas 4. C4ISTAR	
	Month year December 2004	Project no. E7063
	Subcategories 41 C41	
Author/s (editor/s) Per Sakari Magnus Pettersson Johan Öhgren	Project manager Åsa Waern	
	Approved by Ove Steinvall	
	Sponsoring agency Armed Forces Headquarter, Sweden	
	Scientifically and technically responsible	
Report title (In translation) Retrocommunication in urban areas		
Abstract (not more than 200 words) In the future network centric warfare there is an increasing demand for communication. New systems and sensors require well performing communication systems, not the least in urban environments. Free Space Optical Communication (FSO) could be an excellent alternative to radio in many applications. This report describes studies of how retro-reflective technology could be used for FSO. The report gives a technical overview and calculations of link performance for a retrocommunication system. Results are given from practical tests with liquid crystal modulators. Retrocommunication at a distance of 1 km with low laser power (6 mW) has been shown and technology to reduce turbulence effects has been tested with good results. The results show a good potential for the development of small, inexpensive and low-power communication units that could be used in an urban environment. A limitation with this kind of modulator is the bit rate, which in the experiments has been limited to a few kbps. The R&D for retromodulators makes steady progress and Multiple Quantum Well (MQW) modulators are today showing higher bit rates. This work has been in a project called KOMET that is studying radio and laser communication in urban environments. Parts of the work have been in collaboration with a project studying underwater communication systems.		
Keywords Retrocommunication, modulating retro-reflectors, free space optical communication, laser communication.		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 31 p.	
Price acc. to pricelist		

INNEHÅLL

INLEDNING	6
TILLÄMPNINGAR AV RETROKOMMUNIKATION.....	7
KOMMUNIKATION MED SENSORER	7
KOMMUNIKATION MED UAV ELLER UGV.....	7
IK-SYSTEM BASERADE PÅ RETROKOMMUNIKATION	7
TEKNIKÖVERSIKT	8
PRINCIPEN FÖR RETROKOMMUNIKATION	8
RETROREFLEKTORER	9
MODULATORER	10
LASRAR OCH SÄNDARE/MOTTAGARE	11
STRÅLSTYRNING	11
PRESTANDA FÖR RETROKOMMUNIKATIONSLÄNKAR.....	13
RÄCKVIDD	13
VÄDERBEROENDE	14
KOMMUNIKATION TILL RETROMODULATORENHETEN	15
MÄTNINGAR MED VÄTSKEKRISTALLMODULATORER.....	17
BAKGRUND TILL MÄTNINGARNA	17
GENOMFÖRDA MÄTNINGAR INOM KOMET-PROJEKTET	17
VÄTSKEKRISTALLERNAS MODULATIONSKVALITET	17
VINKELKÄNSLIGHET HOS RETROMODULATORN	19
MÄTNINGAR AV TURBULENSEFFEKTER HOS RETROKOMMUNIKATIONSSYSTEMET	20
SLUTSATSER AV MÄTNINGARNA.....	27
UTVECKLINGSLÄGET FÖR RETROKOMMUNIKATION	28
NAVAL RESEARCH LABORATORY	28
UNIVERSITY OF NEW MEXICO	28
FOI	29
ÖVRIG VERKSAMHET INOM LASERKOMMUNIKATION.....	30
LASERKOMMUNIKATION I KOMET 2005	30
REFERENSER.....	31

INLEDNING

I det framtida försvaret finns ett ökat kommunikationsbehov. Nya system och sensorer ökar kravet på väl fungerande kommunikationslösningar, inte minst i urban miljö. I denna rapport studeras fri optisk kommunikation med retroreflekterande teknik. Dessa länkar kan i vissa lägen fungera som alternativ till radiobaserade system. Rapporten ger en tekniköversikt och redovisar beräkningar på möjliga prestanda för kommunikationssystem som utnyttjar retroteknik. Ett antal praktiska försök med vätskekristallmodulatorer har genomförts och redovisas i rapporten, bland annat med avseende på bandbredd, vinkelkänslighet, samverkan av flera modulatorer samt turbulenseffekter och hur dessa kan undertryckas.

TILLÄMPNINGAR AV RETROKOMMUNIKATION

Kommunikation med sensorer

Retrokommunikation lämpar sig väl för tillämpningar där krav på hög överföringshastighet, icke-röjande strålning och störtålighet är prioriterat. Retrokommunikation är väl lämpat för asymmetrisk dataöverföring från exempelvis distribuerade sensorer, t.ex. kameror eller mikrofoner, där krav på låg effektförbrukning är en viktig faktor. Kravet på fri siktsträcka kan i viss mån begränsa användningsområdet men exempelvis master, UAV:er och aerostater kan fungera som länknoder.

Kommunikation med UAV eller UGV

Ett användningsområde kan vara kommunikation och styrning av UAV och UGV. Kommunikationsflödet till och framför allt från sensorer i till exempel UAV:er kommer att bli omfattande. Mindre UAV:er styrs idag vanligtvis med markbaserade radiolänkar. Dessa fungerar i dagsläget ofta bra men ett ökat intresse för störning av länkar som utnyttjas för styrning av obemannade farkoster medför krav på redundans och störtålighet. En möjlighet är att kombinera radio och laserlänk; då dessa bygger på helt olika teknik kan de komplettera varandra. Att störa ut båda länktyperna samtidigt blir ytterst komplicerat. Retrokommunikationslänken kan också utnyttjas när den egna positionen inte vill avslöjas, till exempel vid radiotystnad.

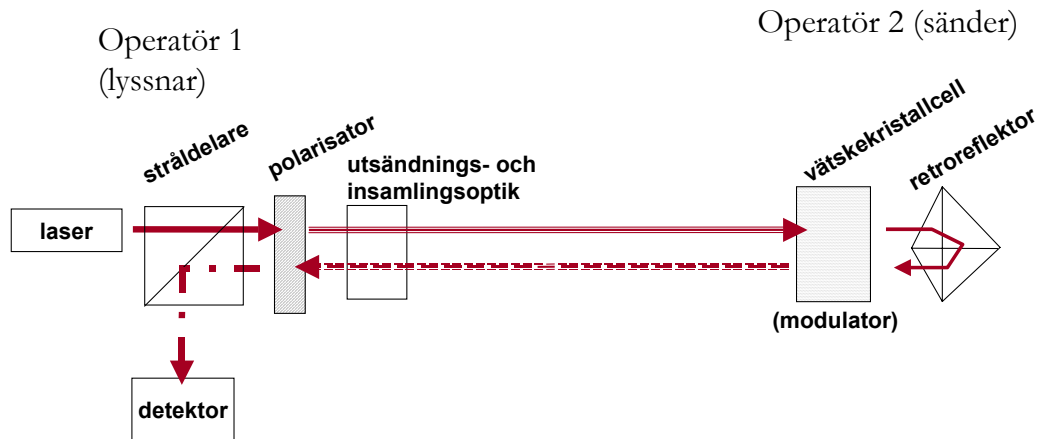
IK-system baserade på retrokommunikation

IK-system kan med fördel utnyttja retrokommunikation. Dessa system skulle kunna byggas mycket kompakta och vara relativt enkla. En tillämpning kan vara identifiering av enskilda soldater och fordon. Genom att rikta in sin laserenhet mot en person eller fordon kan information om identitet med mera automatiskt tankas över.

TEKNIKÖVERSIKT

Principen för retrokommunikation

Det som skiljer retrokommunikation från annan optisk kommunikation är att länken bara innehåller *en* laserkälla som befinner sig i länkens ena ände. I andra änden finns en retromodulator som förmår att modulera strålen och skicka tillbaka den till avsändaren. Figur 1 visar principen för en kommunikationslänk med retroteknik.



Figur 1. Princip för retrokommunikation med en transmissiv modulator.

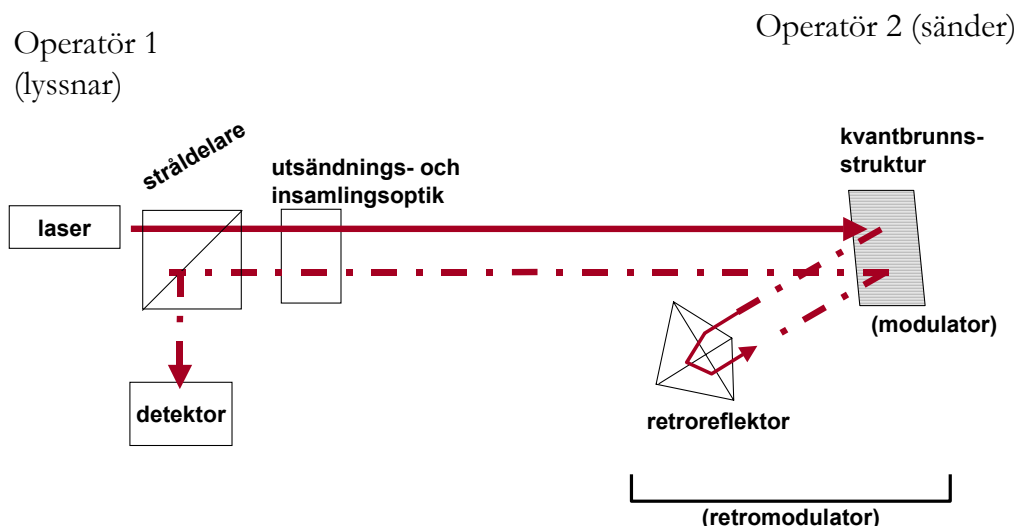
Till vänster i figuren ser vi den del av länken som innehåller laserkällan. Laserstrålen sänds ut i fria luften med hjälp av lämplig optik. I en del fall vill man att laserstrålningen ska ha en viss optisk egenskap, till exempel en viss polarisation, när den sänds ut. Till höger i figuren ser vi den del av länken som tar emot strålen, modulerar och skickar tillbaka den. Det är i princip två komponenter som krävs: en modulator som lägger på informationen på strålen och en retroreflektor som har egenskapen att skicka tillbaka strålen precis samma väg som den kom in. Tillsammans utgör modulorn och reflektorn en *retromodulator*.

Retromodulorn har den stora fördelen att den kan vinklas relativt fritt utan att kommunikationslänken bryts. För retromodulorn behövs därför ingen särskild inriktningsmekanik, vilket däremot är nödvändigt i den ände där lasern är placerad.

Laserstrålen returneras efter modulation och reflektion i riktning mot laserkällan, nu med information pålagd. Informationen finns i strålningens optiska egenskaper, exempelvis dess intensitet eller polarisation. Strålningen samlas in med hjälp av optiska komponenter, ofta samma som sände ut den, och länkas därefter av mot en detektor (eller flera) som läser av informationen. Information kan också sändas åt andra hållet. I så fall lägger man på informationen på laserstrålen i anslutning till laserkällan, och retromodulorn kompletteras med en detektor som läser av informationen.

I figur 1 är modulorn placerad framför reflektorn, så strålningen måste passera genom modulorn – modulorn är *transmissiv*. Modulationen sker i två steg, innan strålen går in i reflektorn och när den är på väg ut. De två modulationsstegen kan i de allra flesta fall behandlas som ett enda, eftersom tiden det tar för strålen att vända i reflektorn är så oerhört liten.

Modulorn kan alternativt vara *reflektiv* och alltså modulera i samband med att strålningen reflekteras mot dess yta. Retromodulorn måste i detta fall konstrueras något annorlunda vilket visas i figur 2.



Figur 2. Princip för retrokommunikation med en reflektiv modulator.

Den konstruktion med reflektiv modulator som visas i figur 2 har nackdelen att synfältet för retromodulorn blir mindre än för en transmissiv modulator. Alternativa konstruktioner är emellertid tänkbara, exempelvis att modulorn byggs in i retroreflektorn och utgör en eller flera av dess sidor.

Även om en transmissiv modulator i de flesta fall är lättare att arbeta med kan det finnas skäl att välja en reflektiv, till exempel om den har en bättre modulationsförmåga.

Retroreflektorer

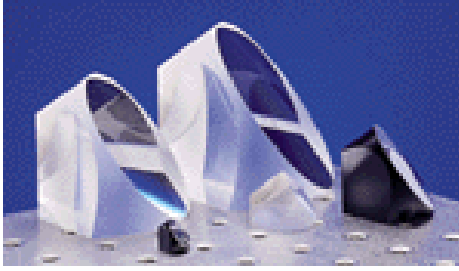
Retroreflektorns uppgift är att sända tillbaka laserstrålen till andra sidan länken. Önskvärda egenskaper hos reflektorn är framför allt

- Att strålen reflekteras i exakt motsatt riktning med hög noggrannhet.
- Att en så stor del av energin i strålen som möjligt tas tillvara.
- Att reflektorn inte påverkar polarisationstillståndet eller andra optiska egenskaper hos strålen.
- Att reflektorn kan vinklas ordentligt i förhållande till strålen (stort synfält).
- Att den tål omgivande miljö.

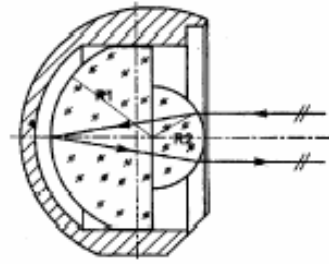
Den vanligaste typen av retroreflektor är kubhörnsreflektorn som är uppbyggd av tre vinklade ytor, i princip de som uppstår om man hugger av hörnet på en kub och studerar hörnbiten.

Kubhörnsreflektorer tillverkas ofta ur en enda solid glasbit, se figur 3. Strålen går från luft till glas i reflektorns öppningsyta och reflekteras sedan i dess tre sidor innan den lämnar reflektorn. Reflektorns sidor kan antingen ha en glas-luft-övergång, vilket leder till totalreflektion, eller så kan glaset vara belagt med silver eller annat lämpligt reflekterande material. Kubhörnsreflektorerna i figuren är i solitt glas. De två minsta reflektorerna har en ytbeläggning som skyddar de speglade ytorna och är fördelaktig för de optiska egenskaperna.

Kubhörnsreflektorer kan också konstrueras som tre speglade ytor vilka fogas samman till ett kubiskt hörn. Här sker alltså ingen övergång till något nytt material i öppningsytan, utan strålen går i luft hela tiden förutom vid de tre reflektionstillfällena. Solida reflektorer har fördelen att de inbördes vinklarna mellan dess sidor kan formas mycket noggrannt så att den reflekterade strålen reflekteras i rätt riktning. "Spegelreflektorer" kan å andra sidan göras stora och reflektera en större del av en bred stråle.



Figur 3. Kubhörnsreflektorer från Edmund Optics.



Figur 4. Fokalplansreflektor eller "cat's eye".
Figuren är hämtad från B. Yang och H. Friedsam:
*Ray-Tracing Studies for a Whole-Viewing-Angle
Retroreflector*, 1999.

Båda typerna av kubhörnsreflektorer kan påverka strålningens optiska egenskaper, exempelvis dess polarisationstillstånd. Svårhanterliga effekter på just polarisationstillståndet går att undvika genom att välja solida reflektorer med silverbelagda sidor eller spegelreflektorer med guldbelagda speglar.

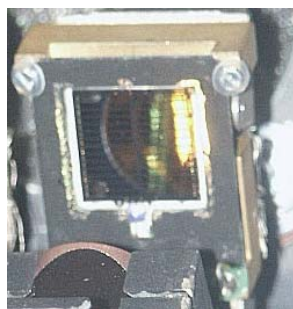
En annan typ av retroreflektor, kallad "cat's eye", bygger på linsverkan och reflektion i fokalplanet, se figur 4. I fokalplanet kan en array med modulatorer placeras, vilket möjliggör snabbare modulering. Reflektor kan också kombineras med en transmissiv modulator vid ingångsyta.

Modulatorer

Som redan nämnts finns det två huvudtyper av modulatorer, *transmissiva* respektive *reflektiva*. I första fallet moduleras strålningen när den passerar genom modulatorens yta och i det senare sker modulationen i samband med reflektion i ytan. Reflektionen kan dock vara av sådan art att strålningen tränger in en bit i ytskiktet innan den går ut igen.

Strålen moduleras genom att strålningens optiska egenskaper förändras på något sätt. Vanligen är det strålningens *intensitet* eller *polarisationstillstånd* som förändras. Möjligheten finns också att ändra dess *färg*, och eventuellt också dess *våglängd*.

Den enklaste modulatorens är den *mekaniska* som kan utgöras av en slutare som släpper fram eller blockerar strålen. Man kan annars använda en mer förfinad teknik, *mikromekanik*, till exempel små speglade ytor som kan vinkla bort strålen. Alternativt kan dessa mikromekaniska speglar förflyttas längs strålens riktning och påverka fasen. Mekaniska och mikromekaniska modulatorer har nackdelen att vara relativt långsamma. *Akusto-optiska* modulatorer bygger på förändringar i optiska material vid elektrisk och mekanisk påverkan. Modulatorer med *vätskekristall* kan användas för att styra strålningens polarisationstillstånd. Modulatorer som bygger på kvantbrunnsteknik är riktigt snabba; de kan ge modulationshastigheter upp mot 1 Gbps. Figur 5 visar en kvantbrunnsmodulator.



Figur 5. Kvantbrunnsmodulator.

Lasrar och sändare/mottagare

Några saker att beakta när det gäller lasern är

- att den har tillräckligt hög effekt
- att dess optiska egenskaper är anpassad för modulatern
- att våglängd och effekt ligger på en säker nivå för människor och utrustning

För de vanligaste modulationsteknikerna har laserns koherenslängd ingen betydelse. Emellertid kan fasmodulation kombineras med koherent detektion för att uppnå smygeffekter, och i detta fall måste koherenslängden beaktas.

Hittills har retrokommunikation ofta skett med våglängder runt 800–900 nm, på grund av att där finns ett stort utbud av lasrar, modulatorer och detektorer. Dessa våglängder är ögonfarliga vid höga effektnivåer. Därför är det intressant att utnyttja våglängder kring 1550 nm som är en ”ögonsäker” våglängd och som är vanlig i fiberoptisk kommunikation.

När laserstrålen sänds ut får den oftast passera genom ett optiskt system så att den kan styras rätt och hållas samlad. Olika typer av teleskop kan användas, uppbyggda kring linser eller speglar, alternativt en kombination av båda. Den finns en stor fördel med att ha en stor utgångsappertur eftersom strålen då kan hållas bättre samlad på stora avstånd.

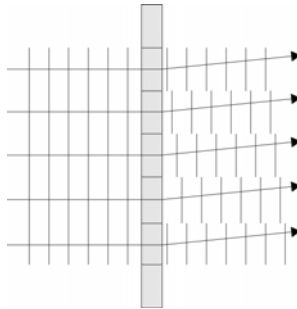
När strålen returnerats från retromodulatern måste den likaledes samlas in med hjälp av ett optiskt system. Det är vanligt att strålen samlas in med hjälp av samma optik som sände ut den. Ett sådant system kallas *monostatiskt*. Ett alternativ är att ha en särskild insamlingsoptik alldeles intill sändaroptiken. Systemet sägs vara *bistatiskt* när utsändningsdelen är fysiskt åtskild från mottagaren.

Strålstyrning

Till skillnad från retromodulatern krävs det särskild styrning för laserkällan, dess optik och mottagardel. Laserstrålen ska riktas mot retromodulatern och även kunna följa den om den rör sig. Strålstyrningen kan ske genom att hela apparaturen sitter monterad i en mekanisk upphängning med vridande motorer. Information måste tillföras om var retromodulatern befinner sig, antingen genom mätning på den reflekterade strålen eller genom ett separat system, exempelvis videokamera. Utifrån dessa data kan en styralgoritm styra upphängningen automatiskt och följa retromodulatern.

Strålstyrning kan också ske *icke-mekaniskt*, d.v.s. utan rörliga delar, se figur 6. Detta åstadkoms genom att strålen får passera en *spatiell ljusmodulator*, som är antingen transmissiv eller reflektiv. Den spatiella ljusmodulatern är uppdelad i små segment (pixlar) i strålens transversella plan och varje segment kan var för sig styra fasen i strålens vågfront. Det betyder att ljusmodulatern kan anta olika roller som lins eller spegel, och också utföra mer avancerade

saker som att dela upp en stråle i flera strålar och styra dessa individuellt. Icke-mekanisk strålstyrning har fördelen att vara snabbare än styrning med mekanik. Hittills har det funnits begränsningar i hur mycket strålen kan styras ut, varför tekniken lämpat sig bäst för finjustering av strålens riktning.



Figur 6. Icke-mekanisk strålstyrning genom fasfördröjning.

PRESTANDA FÖR RETROKOMMUNIKATIONSLÄNKAR

Räckvidd

Ett antal olika parametrar inverkar på prestandan hos ett retrokommunikationssystem. Systemet kan beskrivas med följande samband.

$$P_m = \frac{16P_s A_h A_m \eta_s \eta_m \eta_{rm} e^{-2\sigma R}}{\pi \phi_s^2 \phi_{rm}^2 R^4}$$

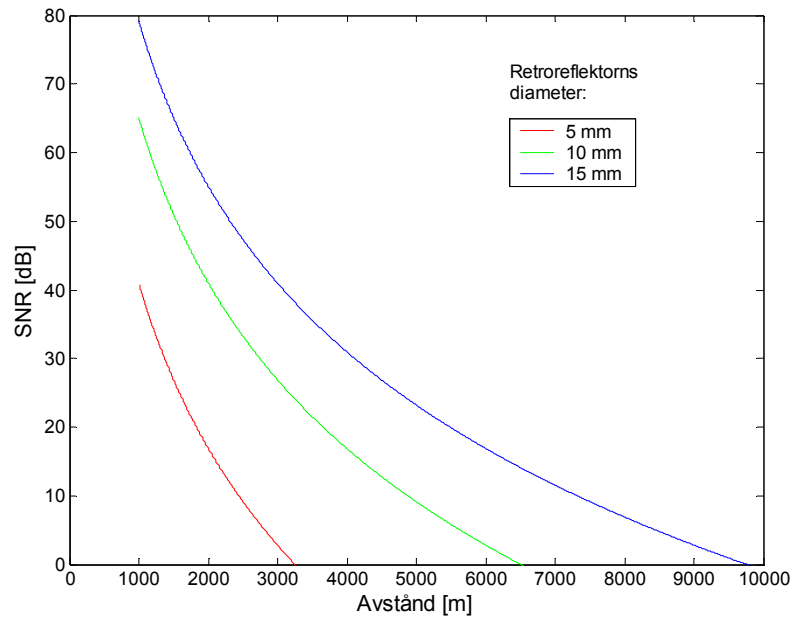
P_m i sambandet är mottagen effekt och P_s utsänd effekt (lasereffekt), medan A_h och A_m är arean hos retroreflektorn respektive mottagarens insamlingsoptik. Förlustfaktorerna η_s , η_m och η_{rm} representerar transmissionsförlusterna i sändaroptik, mottagaroptik respektive retromodulatorns hörnkub och vätskekristallceller. Förlusten i atmosfären representeras av dämpningskoefficienten σ . Φ_s och Φ_{rm} är divergensen ut från sändaroptiken respektive retromodulatorens. R är avståndet mellan laserenheten och retromodulatorens. I sambandet ovan har ingen hänsyn tagits till de turbulensfenomen som påverkar laserstrålen när den propagerar genom atmosfären. Den väderberoende turbulensen kommer att medföra signalvariationer vilket kommer att ha en negativ inverkan på länkens prestanda, speciellt på längre avstånd eller om retromodulatorens är liten. Vidare antar ekvationen en likformig intensitetsfördelning och inte en gaussisk. Signal-till-brus-förhållandet (SNR) förhåller sig till den mottagna effekten (P_m), den brusekvivalenta effektnivån (NEP) och bandbredden (B) enligt följande samband.

$$SNR = \frac{P_m^2}{NEP^2 B}$$

Utifrån sambanden ovan kan räckvidden för ett tänkt retrokommunikationssystem beräknas. Det finns till synes en mängd olika designparametrar att beakta vid uppbyggnaden av ett retrokommunikationssystem. I tabell 1 visas ett exempel på tekniska data, som ligger till grund för räckviddsberäkningarna redovisade i figur 7.

Bandbredd	1 Mbps
Laser	1550 nm
Lasereffekt	100 mW (20 dBm)
Transmission i sändaroptik	0,9
Transmission i mottagaroptik	0,9
Transmission i retromodulator	0,9
Divergens från lasersidan	1 mrad
Divergens från hörnkub	$\lambda/(2\sqrt{A_r})$, A_r retroreflektorns area
Mottagarens area	40 cm ²
Retroreflektorns diameter	0,5 till 1,5 cm
NEP (Noise Equivalent Power)	10 ⁻¹¹ W/√Hz
Detektormaterial	InGaAs
Detektortyp	PIN-typ
Modulering	OOK (On-Off Keying), intensitetsmodulering
Detektion	Direkt detektion
Atmosfärsdämpning	Försummad (mycket god sikt)

Tabell 1. Exempel på tekniska data för ett retrokom-system.



Figur 7. Signal-till-brusförhållande för retromodulator som funktion av avstånd. En större retroreflektor ger en längre räckvidd.

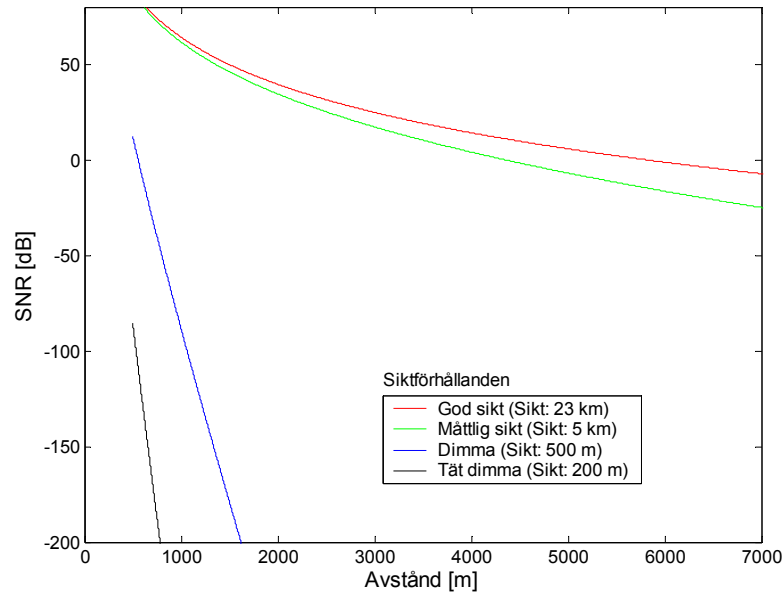
Väderberoende

En retrokommunikationslänk kommer att ha en väderberoende räckvidd/tillgänglighet. Optiska våglängder dämpas i regn, snö och dimma. Dämpningen i atmosfären har ett visst våglängdsberoende, vilket vi inte går in djupare på här. Tabell 2 visar en sammanställning över beräkningar gjorda i simuleringsverktyget Modtran. Beräkningen är genomförd vid våglängden 1550 nm och vid fyra olika väderförhållanden, från god sikt till tät dimma. Värdena gäller för en 100 meters horisontell propagering, 10 meter över marknivå och endast i ena riktningen (i retrokommunikation dubblas avståndet eftersom laserstrålen ska gå fram och tillbaka till retromodulatorens).

Siktförhållande	Sikt	Transmission, 100 m (%)	Dämpning (dB/km)	Dämpningskoeff., σ (m^{-1})
God sikt	23 km	99,6	0,17	$3,8 \cdot 10^{-5}$
Måttlig sikt	5 km	98,2	0,80	$1,8 \cdot 10^{-4}$
Dimma	500 m	41,4	38	$8,8 \cdot 10^{-3}$
Tät dimma	200 m	13,4	87	0,020

Tabell 2. Beräkning av transmission vid olika väderförhållanden för våglängden 1550 nm.

I figur 8 visas hur SNR varierar med avståndet vid olika siktförhållanden. Vid god till måttlig sikt borde räckvidden för en retrolänk vara ett flertal kilometer. För att länken även ska kunna fungera i dimma räcker inte retroreflektorns storlek (här 10 mm diameter) till, om inte en betydligt mer kraftfull laser eller känsligare detektor används.



Figur 8. Signal-till-brusförhållande för retromodulator vid olika siktförhållanden, från god sikt till tät dimma. Diametern på retroreflektorn är satt till 10 mm i denna beräkning. Vid god och måttlig sikt är skillnaden i räckvidd marginell, medan dimma kraftigt reducerar länkens räckvidd.

Kommunikation till retromodulatorenheten

Om dubbelriktad kommunikation önskas kan länken kompletteras med en extra detektor, placerad bredvid retromodulatorenheten. Antingen används en extra laser för kommunikation i riktning mot retromodulatorenheten, eller så används samma laser som den till retrokommunikationen. Den effekt P_m som detekteras av detektorn bredvid retromodulatorenheten förhåller sig till laserns uteffekt P_s enligt följande samband.

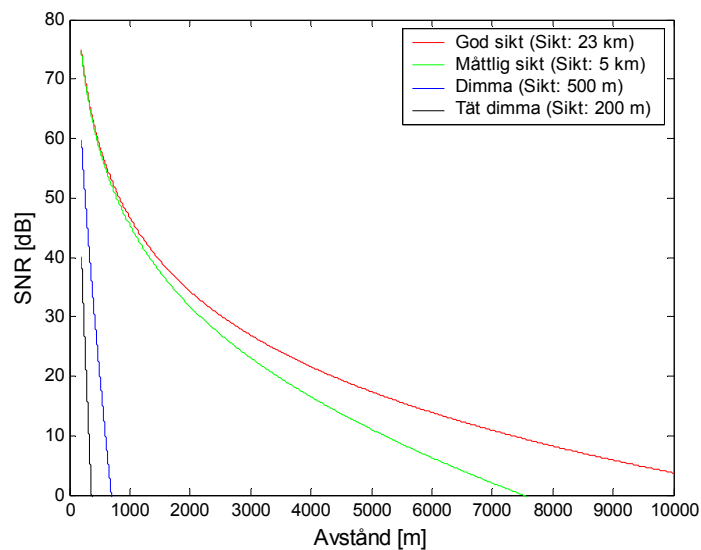
$$P_m = \frac{4P_s A_d \eta_s e^{-\sigma R}}{\pi \Phi_s^2 R^2}$$

A_d är arean hos detektorn, η_s är förlustfaktorn i sändarens optik och Φ_s är divergensen ut från sändaren. Om endast en laser används kan kommunikationen tidsmultiplexas (halv duplex). Räckvidden blir dock densamma oavsett om en eller två lasrar används. Den detektor som placeras vid retromodulatorenheten måste ha ett brett synfält, vilket i praktiken innebär att ingen fokuserande optik kan användas framför detektorn. Framför detektorn måste dock ett lämpligt optiskt filter placeras. Detektionen kommer med all sannolikhet att begränsas av brus från solljus, p.g.a. det stora synfältet. För att detektera så mycket som möjligt och reducera turbulenseffekter skall detektorn vara så stor som möjligt. Bandbredden för detektorer minskar dock ju större detektorarean är, vilket innebär att en avvägning måste göras för optimal bandbredd och detektorkänslighet. En annan – dock mer komplex – lösning kan vara att använda en vidvinkellins framför en pixelerad detektor. Detta skulle kunna öka överföringskapaciteten. De tekniska data som redovisas i tabell 3 står som grund till räckviddsberäkningarna för kommunikationen i riktning *mot* retromodulatorenheten. Resultatet av beräkningarna visas i figur 9.

Bandbredd	1 Mbps
Laser	1550 nm
Lasereffekt	100 mW (20 dBm)
Transmission i sändaroptik	0,9
Divergens från sändare	1 mrad
Mottagarens (detektorns) diameter	5 mm
NEP, detektor	$7 \cdot 10^{-14} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$
Detektormaterial	InGaAs
Detektortyp	PIN-typ
NEP, solinstrålning	$1 \cdot 10^{-11} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$
Bandbredd, filter	50 nm
Synfält, filter	1 sr
Modulering	OOK (On-Off Keying), intensitetsmodulering
Detektion	Direkt detektion
Atmosfärsdämpning	Varierar

Tabell 3. Exempel på tekniska data för kommunikation i riktning mot retromodulatorens.

Räckviddsberäkningarna visar att långa räckvidder kan åstadkommas med ett bra SNR, trots en liten detektorarea, så länge väderförhållandena är goda. Det ska dock noteras att ingen hänsyn är tagen till turbulenseffekter. Turbulenseffekterna kan ha en stor negativ inverkan, eftersom arean hos detektorn är liten [1]. Det är dock inte fullständigt utrett hur mycket turbulensen påverkar länkprestandan. En viss marginal till brusnivån kommer att krävas för att kunna garantera en bestämd BER, och denna kommer att bero på hur lång räckvidd systemet ska ha.



Figur 9. SNR för kommunikation till retromodulatorens, som funktion av avståndet och vid olika väderförhållanden.

MÄTNINGAR MED VÄTSKEKRISTALLMODULATORER

Bakgrund till mätningarna

Sedan tidigare finns modulatorer framtagna på FOI med hjälp ifrån Chalmers tekniska högskola, CTH [2]. Dessa modulatorer är uppbyggda av ferroelektriska vätskekristaller i ett tunt skikt mellan två glasskivor. Modulatorn är transmissiv och kan därför monteras framför en retroreflektor som har egenskapen att skicka tillbaka ljus i samma riktning som det infaller. Vätskekristallcellen har egenskaper som gör det möjligt att med en påförd spänning över den vrida polarisationsriktningen hos inkommande laserstrålning. Vid modulatorn vrids därmed polarisationsriktningen och vid mottagaren används en polarisator som skapar en intensitetsmodulering genom reflexion av ena polarisationsriktningen och transmission av den andra.

Med hjälp från CTH har nya vätskekristallmodulatorer tagits fram under 2004. Inom projektet ”Kommunikationslänk under vattnet” har ett antal grundläggande mätningar genomförts på dessa nytillverkade modulatorer med avsikt att karaktärisera dess optiska och elektriska egenskaper, t.ex. hur prestandan hos vätskekristallen varierar vid olika temperaturer. Mätningarna finns sammanfattade i en FOI-rapport [3], men i denna har de nya modulatorerna inte använts.

Genomförda mätningar inom KOMET-projektet

En mottagare innehållande bl.a. laser och detektor byggdes med målet att kunna kommunicera på längre avstånd och därmed undersöka atmosfärens påverkan för retrokommunikation. Inledningsvis genomfördes dock ett antal mätningar inomhus för att undersöka bl a bandbredd och vinkelkänslighet. Följande mätningar har genomförts:

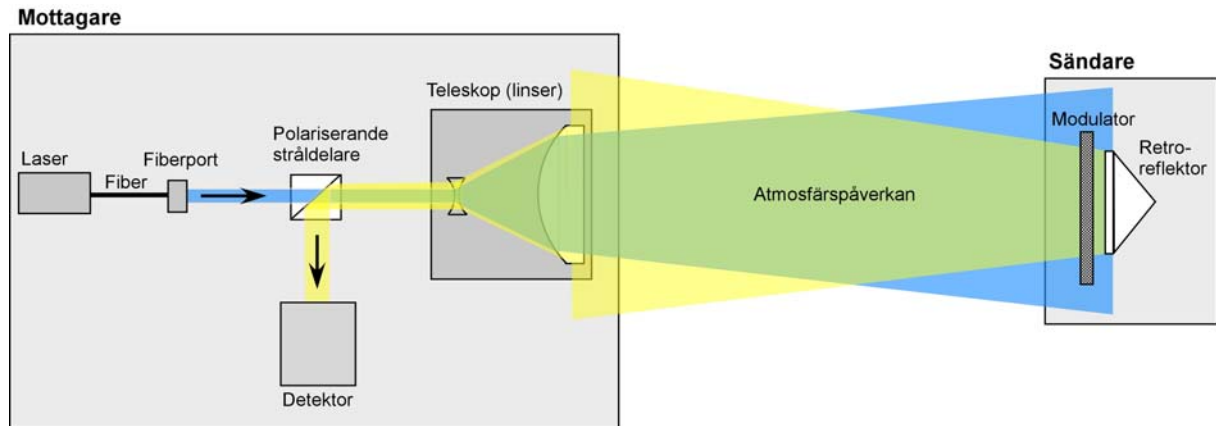
- Bandbreddstester.
- Vinkelkänslighet (med flera modulatorer för ökat synfält).
- Turbulensinverkan på 300 m och 1 km avstånd mellan sändare och mottagare.
- Undertryckning av turbulenseffekter med hjälp av detektion av båda polarisationsriktningarna.

Vätskekristallernas modulationskvalitet

En begränsning som modulatorer innehållande vätskekristaller har är bandbredden. Mätningar genomfördes för att undersöka hur snabba vätskekristallerna är, det vill säga hur snabbt modulationsriktningen kan ändras mellan de två lägena, samt för att se hur stabil moduleringen är. Vi har än så länge inte utrett vilket modulationsform som är bäst lämpad för retrokommunikation med vätskekristaller. Att använda sig av amplitudmodulering, så kallad On-Off Keying, med NRZ-kodning (Non Return-to-Zero) verkar dock vara en lämplig modulationsform och mätningarna har därför genomförts med denna modulation och kodning.

Figur 10 visar den optiska delen av mätupställningen. Strålen från lasern fick passera en polariserande stråldelare och vidare genom ett teleskop bestående av två linser. Testet genomfördes inomhus för att undvika turbulenseffekter. Av praktiska skäl genomfördes mätningen via en spegel för att möjliggöra att sändare och mottagare kunde stå bredvid varandra. Spegeln var utplacerad på 80 meters avstånd för att möjliggöra tillräcklig spridning från retroreflektorn. Modulatorn styrdes vid mättillfället av en PRBS-generator (Pseudo-Random Bit Sequence), som gav en NRZ-L-modulation (Non Return-to-Zero Level). Möjlighet fanns också att skicka en fyrkantformad NRZ-modulation. På tillbakavägen passerar strålen samma teleskop och polarisator som vid sändningen. Modulatorn möjliggör en

polarisationsvridning hos strålen. I det ena läget ska idealt ingen påverkan påföras strålen utan den går tillbaka mot lasern oförändrad. I det andra läget ska polarisationen vridas på sådant sätt att strålen istället reflekteras i stråldelaren och därmed når detektorn. Modulatorerna var monterade i vinkel till varandra för att möjliggöra en större vinkeltäckning. Figur 11 visar hur retromodulatorens såg ut, där de åtta modulatorerna täcker 22,5° vardera.



Figur 10. Sändare och mottagarens uppbyggnad med en detektor.

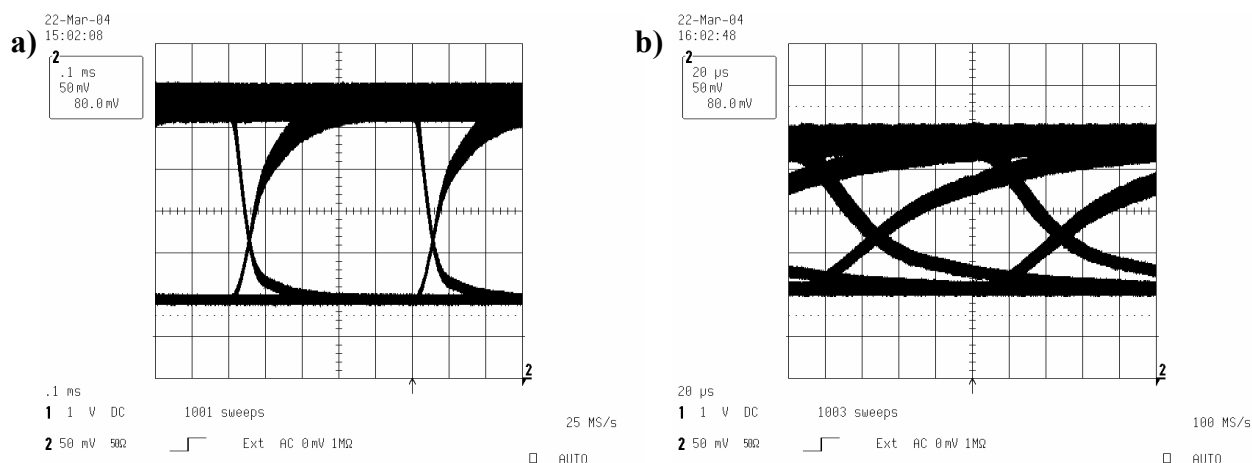
Laser	Ericsson PGT3015 DFB-laser, 1530 nm
Lasereffekt	6 mW
Stråldivergens	0,7 mrad
Modulatorer	8 st vätskekristallceller, Ø = 10 mm
Bandbredd	< 5 kbps
Modulering	OOK, NRZ-L PRBS 2 ¹⁵ -1
Mottagarens apertur	5 cm
Detektor	Thorlabs PDA-400, InGaAs PIN
NEP	3 · 10 ⁻¹² W/√Hz
Detektorns diameter, Ø	1 mm
Avstånd inomhus	160 meter (2 · 80 m)

Tabell 4. Data om mätsystemet.



Figur 11. Retromodulatorer.

Resultatet av mätningarna resovisas här som ögonogram, se figur 12. Ögonogrammen ger en bild över hur bra de aktuella vätskekristallerna modulerar signalen. Faktorer som tidsjitter, effektjitter, stigtid, falltid, modulationsdjup (kontrast mellan '1' och '0') och eventuella överslängar kan utläsas ur diagrammet. Mätningarna visade att överföring var möjlig i ett fåtal kbps, i det system som byggts upp. Här ska dock nämnas att andra frågor än bandbreddsmaximering prioriterats i arbetet. En annan utformning av vätskekristallcellen och en utförlig karaktärisering av de elektriska egenskaperna kan möjliggöra en ökad bandbredd. I ögonogrammet för överföring vid 1 kbps är "ögats" öppning är relativt stort, både med avseende på jitter för tid och för effektnivåerna. Det ideala vore om vätskekristallmodulatorens kunde skapa en total utsläckning av inkommande laser vid logisk '0'. I detta fall var dock så inte fallet, utan effektnivån för '0' motsvaras av ca 2/7 av effektnivån för '1'. Det ska nämnas att dessa ögonogram bara är exempel på hur det kunde se ut. Modulationsdjup och bandbredd kan variera, bland annat för olika drivspänning över cellen och vid olika temperatur i vätskekristallerna. Uppmätta värden är sammanfattade i tabell 5.



Figur 12. Ögonogram vid (a) 1 kbps och (b) 5 kbps.

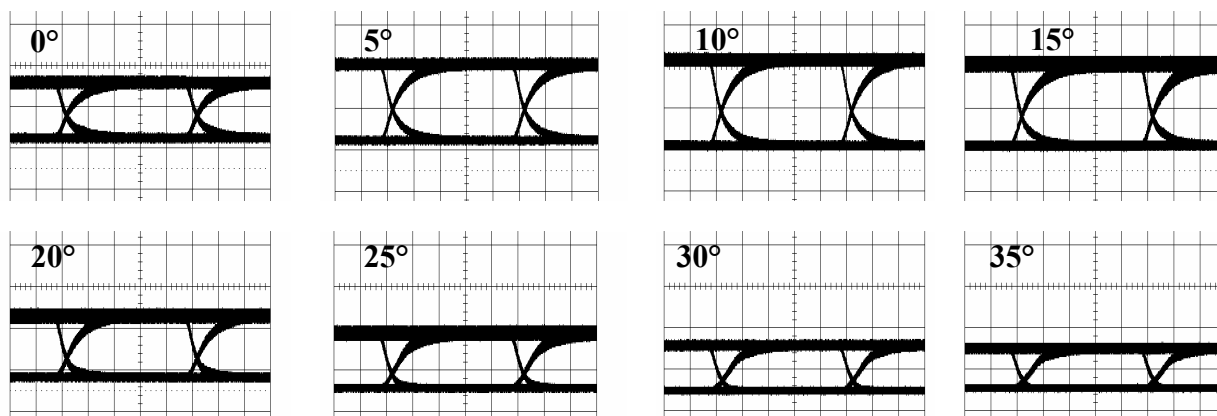
Stigtid	0,2 ms
Falltid	0,1 ms
Tidsjitter	$\pm 2,5 \mu\text{s}$
Effektjitter, '1'	$\sim 10\%$ av maxvärde
Effektjitter, '0'	$\sim 3\%$ av maxvärde
Modulationsdjup	$\sim 70\%$

Tabell 5. Uppmätta värden ur ögonogrammet vid 1 kbps.

Vinkelkänslighet hos retromodulatorn

För att undersöka vilken inverkan retromodulatorns vinkel har samt hur bra de olika retromodulatorerna samverkar genomfördes mätningar där retromodulatorns vinkel till inkommande laser varierades. Retromodulatorerna sitter monterade bredvid varandra för att täcka in ett stort synfält. Varje retromodulator ska täcka en vinkelsektor på $22,5^\circ$ ($360^\circ/16$).

Ett ögonogram sparades ner för varje 5° . I figur 13 visas ögonogram vid varje 5° inom ett intervall på 35° . Ur figuren kan utläsas att amplituden för '1' och '0' varierar med vinkeln. Detta är förväntat med anledning av geometrin hos retroreflektorn. Det finns sektorer inom detta intervall där svar från två modulatorer inkommer samtidigt. Denna övergång från en modulator till en annan fungerar i detta fall bra, vilket kan ses i figuren. I figuren visas dock endast en del av den sektor på 180° som mättes upp. Vid några sektorer fungerade övergångarna mindre bra. Om detta beror på en dålig funktion hos modulatorn eller någon annan faktor är inte utrett.

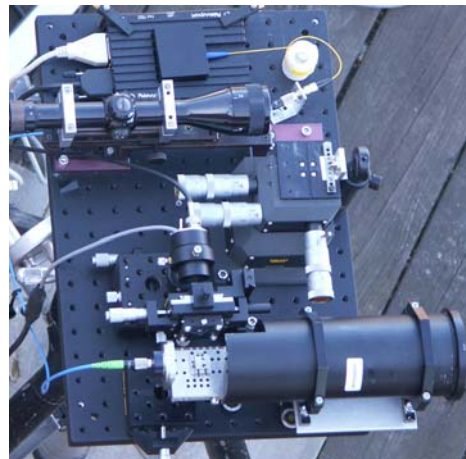


Figur 13. Ögonogram (1 kbps) vid olika vinkel in mot retromodulatorn.

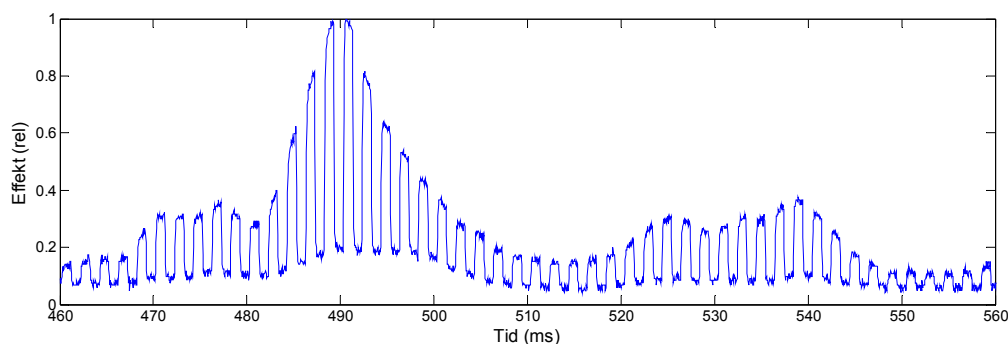
Mätningar av turbulenseffekter hos retrokommunikationssystemet

Mottagare med en detektor - Mätningar på 1 kilometers avstånd

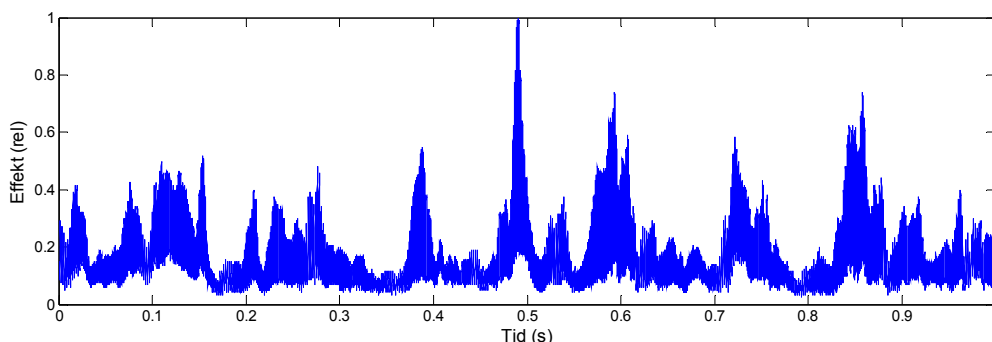
För att undersöka variationer som uppstår p.g.a. turbulens (scintillationer och strålvandring) i atmosfären har mätningar genomförts utomhus. Med komponenter och i utförande som i tidigare tester genomfördes mätningar på avstånd upp till ca 1000 m. På samma sätt som inomhus användes då en spegel, som nu var utplacerad på ca 500 meters avstånd från sändare och mottagare. Figur 14 visar mätuppställning och mottagarenheten. Både retromodulatorerna och mottagaren var placerade utomhus. Laserns divergens var 0,7 mrad och siktförhållandena vara mycket goda. Figur 15 visar hur den detekterade signalen varierade under 100 ms då en fyrkantsignal med frekvensen 1 kHz skickades till modulaton. Signalvariationerna beror på turbulensen i atmosfären. Eftersom modulaton inte helt släcker ut signalen vid '0'-nivån påverkas även den nivån av turbulensen. Detektion av '0' och '1' skulle av den anledningen inte vara möjlig genom att lägga in en tröskelnivå (s.k. direkt detektion). Variationerna orsakade av turbulens är relativt långsamma i förhållande till signalen. Figur 16 visar hur signalen såg ut under en sekund. Medelvärde på '1'-nivån var 9,9 μW och (standardavvikelse 6,1 μW), medan medelvärdet för '0'-nivån var 2,9 μW (standardavvikelse 1,3 μW).



Figur 14. Mätning från FOIs tak mot spegel (sändare och mottagare bredvid varandra). T v mätuppställning med både sändare och mottagare. T h mottagare med bl a laser, optik och detektor.



Figur 15. Detekterad signal under 100 millisekunder.

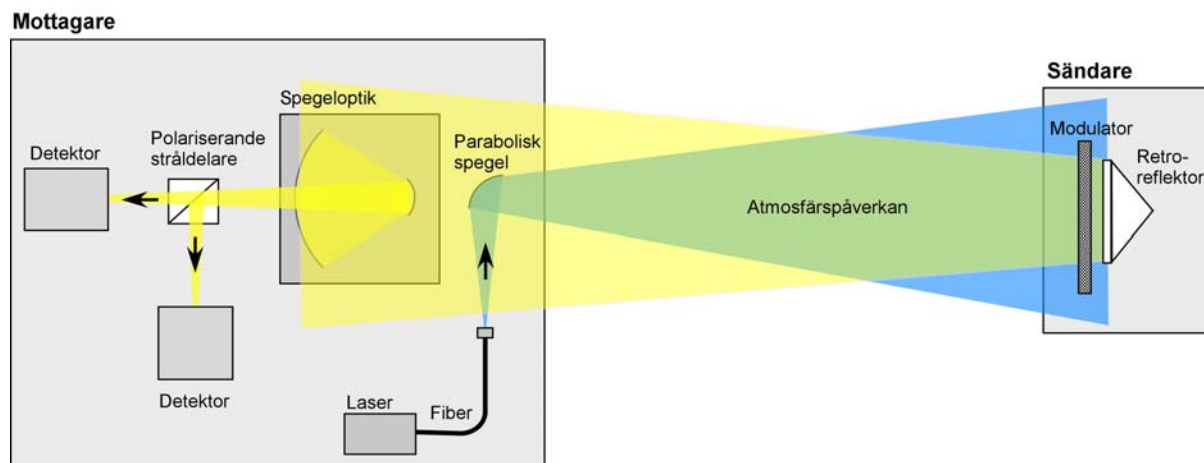


Figur 16. Detekterad signal under 1 sekund.

Efter dessa mätningar byggdes mottagarenheten om för att kunna detektera båda polarisationsriktningarna och därmed möjliggöra undertryckning av turbulenseffekter.

Mottagare med två detektorer – Mätningar på 300 meters avstånd

Mottagarenheten byggdes om för att detektera båda polarisationsriktningarna. Figur 17 och 18 visar hur mätuppställningen såg ut. Lasern separerades från insamlingsoptiken genom att spegla in den i centrum av strålgången med en parabolisk spegel. Spegelns position kunde varieras för att ställa in lämplig divergens. Mottagaroptiken bestod av ett spegelteleskop, som fokuserade ner inkommande strålning på en polarisationsstråldelare. Tätt inpå stråldelaren monterades två detektorer, en för vardera polarisationsriktning. Inga förändringar gjordes i retromodulatore. På liknande sätt som tidigare användes en BER-testare för att generera fyrkants- eller PRBS-modulation med NRZ-kodning.



Figur 17. Sändare och mottagarens uppbyggnad med två detektorer.



Figur 18. Mätupställningen.

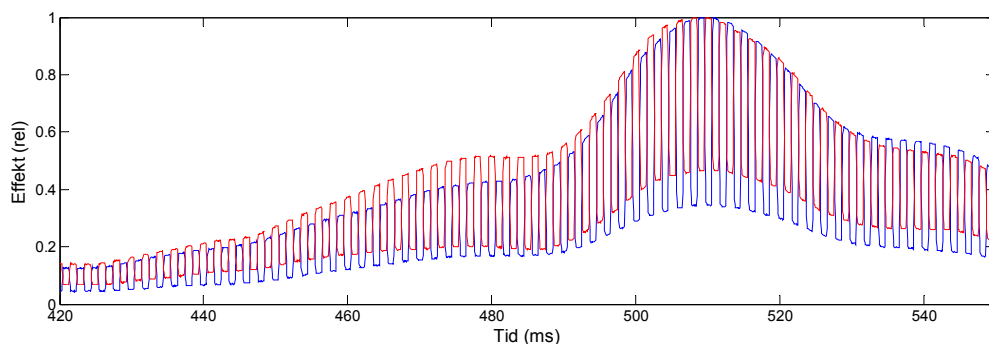
Överföringshastighet	1 kbps
Laser	Ericsson PGT3015 DFB-laser, 1530 nm
Lasereffekt	6 mW
Optik, utgående stråle	Janos Off-Axis Parabolic Metal Mirror, $f = 50,8$ mm
Divergens	1 mrad
Modulatorer	8 st vätskekristallceller, $\varnothing = 10$ mm
Modulering	OOK, NRZ-L PRBS $2^{15}-1$
Mottagaroptik	Tamron, spegeloptik, $f=500$ mm
Mottagarens apertur	8 cm (ytter), 3 cm (inner)
Dämpning i mottagaroptik	6 dB
Mottagarens FOV	4 mrad
Detektor	Hamamatsu G8370-02, InGaAs PIN
Förstärkare	Hamamatsu C4159-03
NEP	$3 \cdot 10^{-12}$ W/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Detektorns diameter, $\varnothing$	2 mm
Avstånd	300 meter (2 x 150 m)

Tabell 6. Data om mätsystemet.

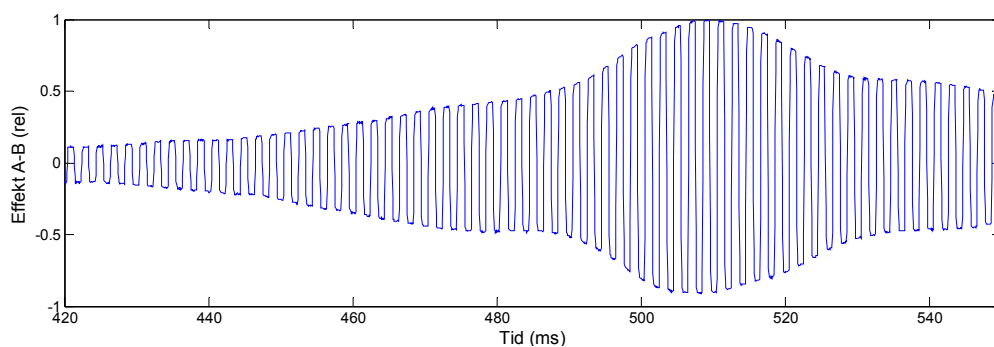
Mätningar genomfördes med sändare och mottagare placerade inomhus och bredvid varandra. En spegel placerades på 150 meters avstånd, också den inomhus. Strålgången var därmed utomhus mellan två delar av FOI-byggnaden. Tester gjordes med att ha fönstren stängda, vilket skulle medföra minskade turbulenseffekter hos strålen och en mer stabil signal. Det var dock inte möjligt i detta fall, eftersom signalen dämpades kraftigt. Orsaken till detta är att fönstren (glas) reflekterar en del av strålningen, och hur mycket som reflekteras är dessutom beroende på polarisationen och fönstrets vinkel i förhållande till strålen.

I figur 19 visas ett exempel på hur det såg ut. Turbulensen får signalen precis som tidigare att variera i amplitud. Effektnivån för de två detektorerna, A och B , är som väntat i motfas; när den ena är låg är den andra hög. Genom att kombinera svaret från A och B kan signalen stabiliseras. Figur 20 visar hur svaret ser om $A-B$ plottas. Genom att normalisera amplituden, det vill säga beräkna $(A-B)/(A+B)$, kan signalen närapå återskapas till den fyrkantsignal som sändes ut. Hur

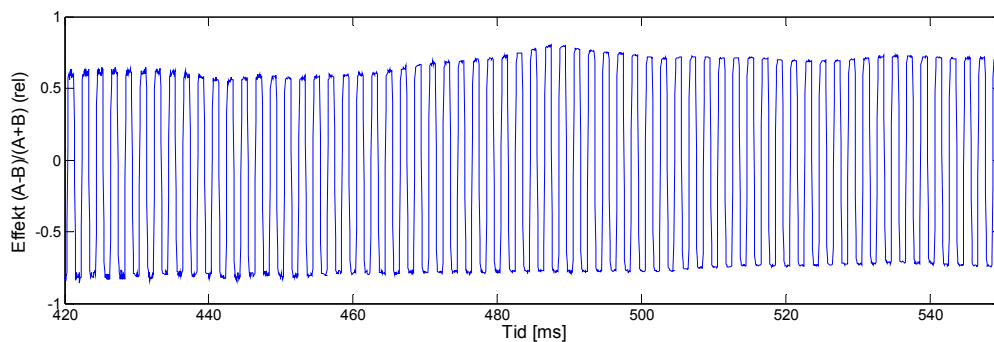
denna signal såg ut kan ses i figur 21. Så länge detektorerna får in en tillräcklig effektnivå kan alltså turbulensvariationerna undertryckas.



Figur 19. Detekterad signal för de två detektorerna A och B, då en fyrkantsignal skickats över avståndet 300 m.

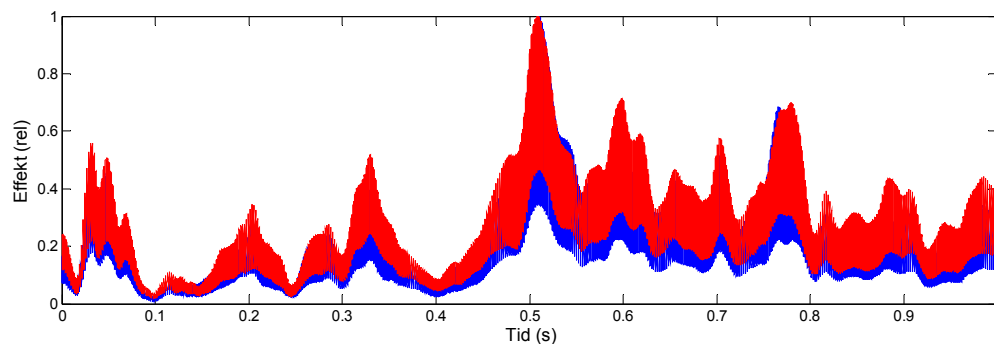


Figur 20. Skillnaden, A-B, beräknad från samma mätning.

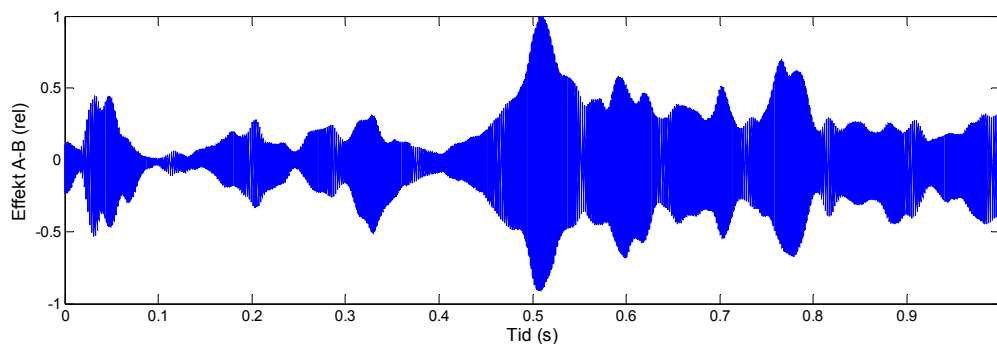


Figur 21. $(A-B)/(A+B)$ beräknad från samma mätning.

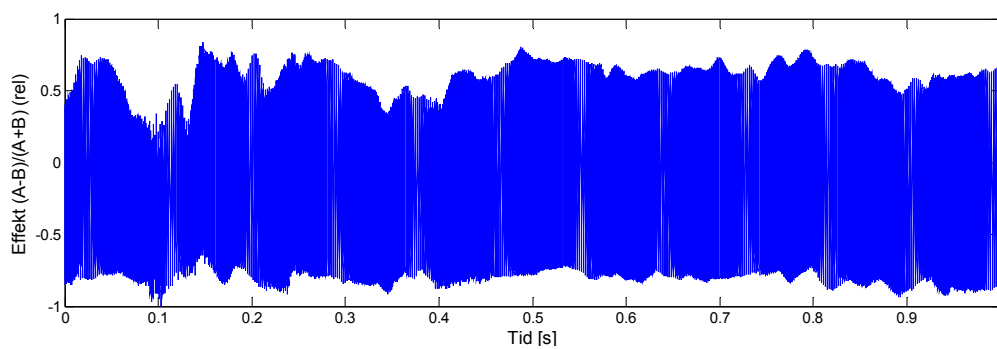
Figur 22, 23 och 24 visar hur det såg ut under en sekund. Även om inte bitmönstret kan urskiljas visas här hur den normaliserade signalen i figur 24 håller sig relativt konstant, trots turbulensen.



Figur 22. Detekterad signal för de två detektorerna A och B, då en fyrkantsignal skickats över avståndet 300 m.



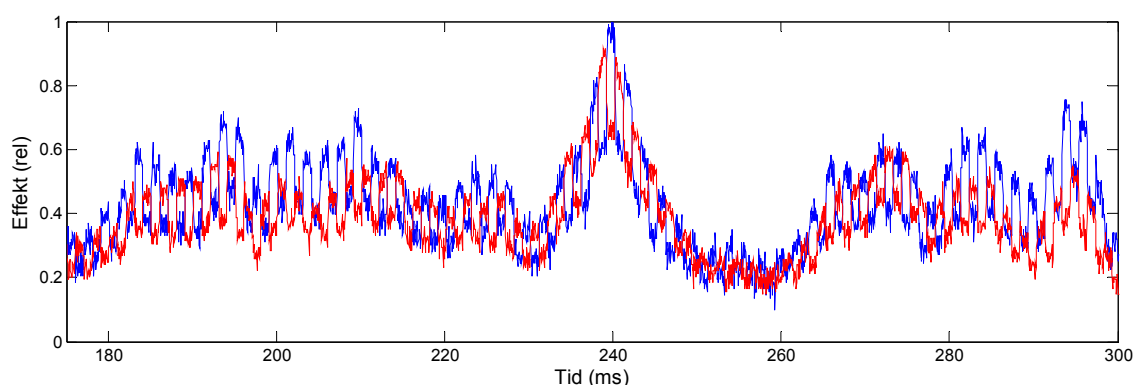
Figur 23. Skillnaden, A-B, beräknad.



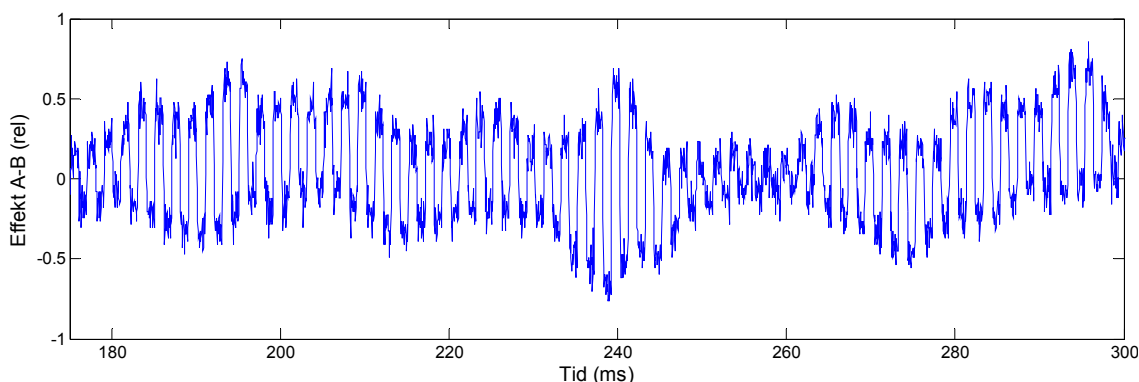
Figur 24. $(A-B)/(A+B)$ beräknad.

Mottagare med två detektorer – Mätningar på 1 kilometers avstånd

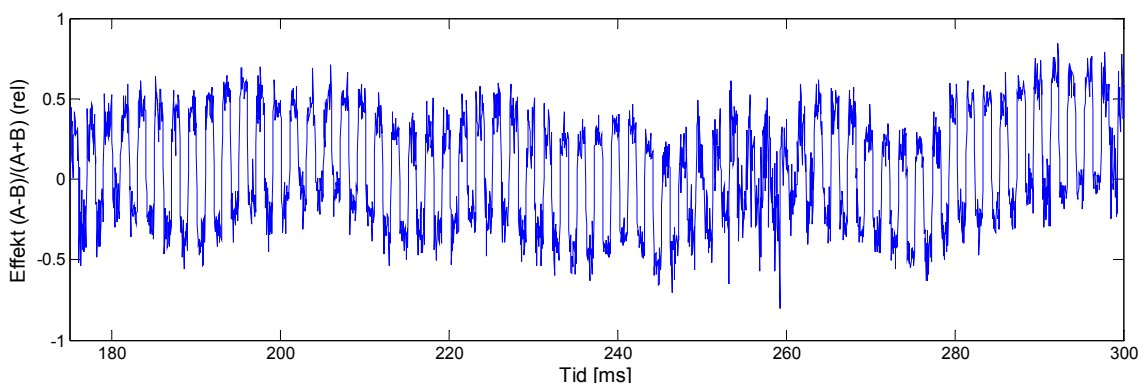
På samma sätt som mätningen på 300 meters avstånd genomfördes en mätning på 1 kilometers avstånd. Inga förändringar gjordes i mätuppställningen med sändare och mottagare. Det enda som skiljer från föregående mätning (förutom avståndet) är att den spegel som användes nu var placerad utomhus. Sändare och mottagare var placerade inomhus och strålen passerade in och ut genom öppna fönster. Vid fönsteröppningen möts kall och varm luft, vilket medför en relativt stor inverkan på mätningen, då både strålvandring och scintillationer ökar. Exempel från resultaten visas i figur 25, 26 och 27, där den mottagna signalens relativa effektnivå är plottad. I figur 25 är DC-nivån något förhöjd; detta för att undvika division med noll i beräkningen för figur 27. Den utsända signalen till modulatorens var precis som tidigare en fyrkantsvåg med frekvensen 1 kHz. SNR var betydligt sämre vid denna mätning, vilket resulterade i att den normaliserade mottagna signalen (figur 27) inte kunde fås lika konstant som vid mätningen på 300 meter. En högre uteffekt hos lasern eller känsligare detektorer hade kunnat ge ett bättre resultat.



Figur 25. Detekterad signal för de två detektorerna A och B, då en fyrkantsignal skickats över avståndet 1 km.

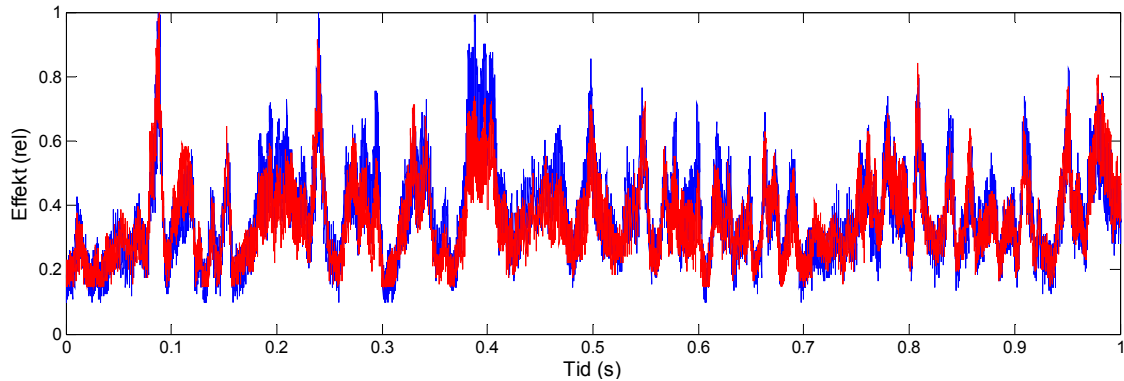


Figur 26. Skillnaden, A-B, beräknad från samma mätning.

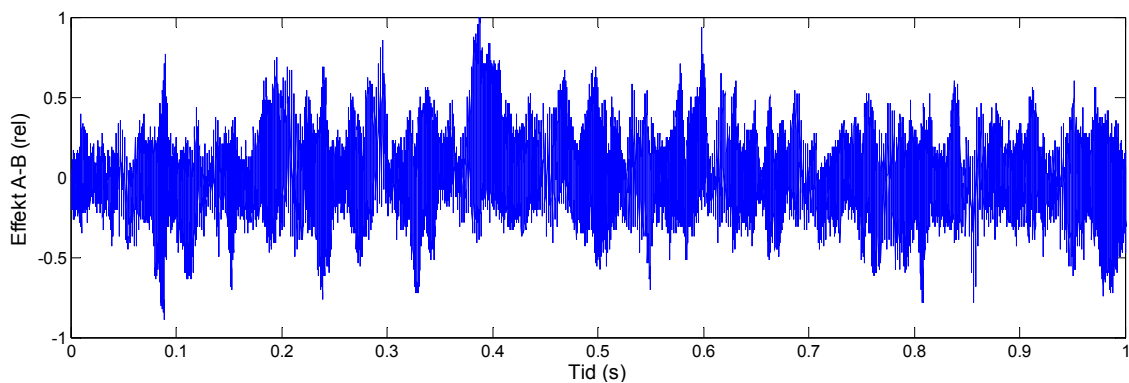


Figur 27. $(A-B)/(A+B)$ beräknad från samma mätning.

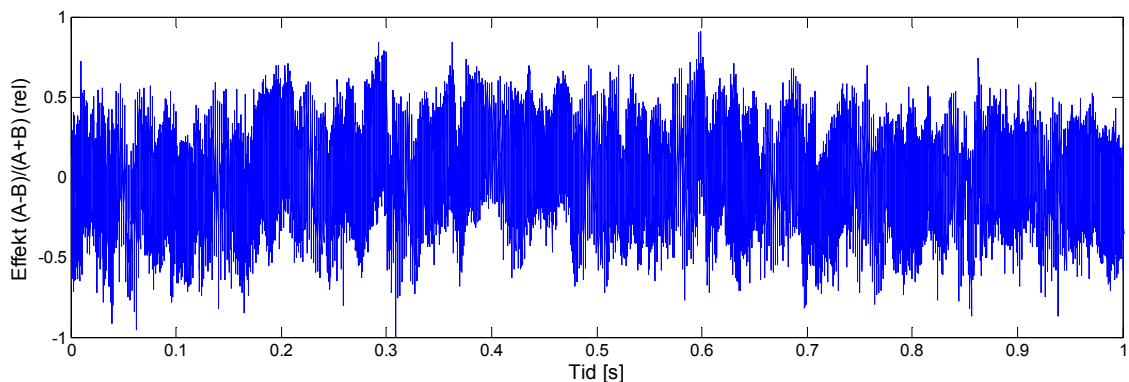
Som tidigare visas här också exempel på en längre tidssekvens. Se figur 28, 29 och 30.



Figur 28. Detekterad signal under en sekund för de två detektorerna A och B, då en fyrkantsignal skickats över avståndet 1 km.



Figur 29. Skillnaden, $A-B$, beräknad.



Figur 30. $(A-B)/(A+B)$ beräknad.

Trots att resultatet på 1 km visar ett dåligt signal-till-brus-förhållande ska inte detta avstånd ses som någon slags maxgräns. Mottagaren kan konstrueras bättre för att möjliggöra en bättre insamling av signalen. Insamlingsoptiken var en kommersiellt tillgänglig kameraoptik, och var därmed inte optimerad för ändamålet. Därtill var dämpningen i insamlingsoptiken hög (ca 6dB) vid den aktuella våglängden. Möjligheten finns också att förstärkaren i mottagaren kan byggas bättre för att minska detektorbruset. Vid försöken användes också en laser med låg uteffekt. Det är möjligt att använda halvledarlasrar med betydligt högre uteffekt, utan att ögonsäkerheten för den skall åsidosätts.

SLUTSATSER AV MÄTNINGARNA

Vi har visat att ett system uppbyggt av vätskekristallmodulatorer kan användas för retrokommunikation i en turbulent atmosfär på avstånd upp till 1 km, trots en låg uteffekt hos lasern. Mätningarna har visat på en modulation med ett litet tids- och effektjitter. Vi har också visat att flera retromodulatorer kan användas och att modulationen från dessa samverkar i sådana fall då inkommande laser träffar mer än en modulator samtidigt. Vätskekristallmodulatorerna har visat sig ha ett bra kontrastförhållande, även om det inte är helt optimalt. Vid försöken där en mottagarenhet byggts upp med två detektorer – en för vardera polarisationsriktning – har vi visat på möjligheten att undertrycka de effektvariationer som kommer av turbulenspåverkan. Mätningar visar att ett högt kontrastförhållande hos modulatorens inte behöver vara nödvändigt för att undkomma turbulenseffekter, om modulationen sker av polarisationen istället för intensiteten. Mätningarna ger en del svar om hur turbulensen påverkar länken och mycket talar för att längre avstånd än 1 km kan uppnås om sändare och mottagare optimeras. Överföringshastigheten, som begränsas av modulatorens typ, har varit ett fåtal kbps. Den teoretiskt maximala överföringshastigheten för vätskekristallceller är ännu inte utredd. Om den som hittills visar sig vara begränsad till kbps-nivå finns möjligheten till andra typer av modulatorer, d.v.s. om behovet finns för Mbps- eller Gbps-överföring.

UTVECKLINGSLÄGET FÖR RETROKOMMUNIKATION

Naval Research Laboratory

Vid Naval Research Laboratory (NRL), USA, har W. S. Rabinovich m.fl. utvecklat modulatorer för retrokommunikation sedan 1998. På senare tid har de visat bl.a. följande:

- För att bl.a. få ett brett synfält tar de fram pixelerade modulatorer som är avsedda att användas i kombination med fokuserande optik istället för hörnkuber. Stigtider på 60 ns och överföring på 36 Mbps har rapporterats. Kontrastförhållanden på 2,6 har visats vid våglängder omkring 1530 nm [4].
- Praktiska försök har genomförts över en sträcka på 2 km i marin miljö (Chesapeake Bay). Vid försöken användes en array med 5 retromodulatorer innehållande hörnkuber. Överföringshastigheten var upp till 5 Mbps och kontrasten omkring 2. 1550 nm-källan (en EDFA, Erbium Doped Fiber Amplifier) hade en uteffekt på hela 1,5 W och divergensen var 1,3 mrad. De har överfört video och ljud, samt gjort mätningar på turbulensinverkan [5] [6].
- En 10 Mbps-länk har demonstrerats över ett avstånd på 1 km. Retromodulatorn bestod av en pixelerad, reflektiv kvantbrunnsmodulator placerad i fokus av "cat's eye"-optik. I labmiljö har också en 70 Mbps kvantbrunnsmodulator visats. Optiken var diffraktionsbegränsad och hade en effektiv apertur på 1,6 cm. Synfältet var ca 20° [7].
- De har också undersökt möjligheten till att använda koherent detektion i retrokommottagaren. På det sättet kan detektorkänsligheten förbättras och därmed kan räckvidden ökas [8].

University of New Mexico

Vid University of New Mexico har T.M. Shay m.fl. arbetat med retrokommunikation under de senaste åren, på uppdrag av bl.a. NASA. De har rapporterat följande:

- Föreslagit retrokommunikation med full-duplex (kommunikation i båda riktningar samtidigt) där endast en laser används. Modulationen i ena riktningen måste då vara "osynlig" för mottagaren för andra riktningen. De har föreslagit fem par av dataformat som kan användas, bl.a. anges polarisationsmodulering (Circular Polarization Keying, CPK) som ett möjligt dataformat. Övriga dataformat de anger är On-Off-keying (OOK), Frequency Shift Keying (FSK), Phase Shift Keying (PSK), Sub-Carrier Frequency Shift Keying (SC-FSK) och Sub-Carrier Phase Shift Keying (SC-PSK). Konceptet har demonstrerats i labmiljö, och där har de visat att konceptet inte har sämre prestanda än system med halv-duplex. Ett system med full-duplex skulle vara mindre komplext och därför att föredra i många fall [9].
- Utvecklat retromodulatorer med möjlighet till överföring i 2,5 Gbps. Kontrastförhållandet anges till hela 20 dB eller mer. Den retromodulator som tagits fram kräver ca 120 mW elektrisk effekt. Systemet är fiberkopplat, vilket möjliggör användning av EDFA och andra fiberkopplade produkter på marknaden. Fiberbaserade enheter med standardiserad nätverksarkitektur kan därmed enkelt användas. Våglängden hos systemet är 1550 nm. Systemet är uppbyggt på ett annorlunda sätt, där den icke-modulerade laserstrålen fokuseras ner på en (Singelmod-) fiber för att förstärkas i en EDFA, moduleras och skickas tillbaka i samma riktning som den kom ifrån. Även vid mottagarsidan fokuseras strålen ner på en (multimod-) fiber för att kopplas till en detektor [10].

FOI

Retrokommunikation har huvudsakligen studerats inom Försvarmaktens fotonikprojekt och inom ett projekt för kommunikation med undervattensfarkoster. Verksamheten har under de senaste åren innefattat bl.a. följande:

- I samarbete med Acreo har kvantbrunnsmodulatorer tagits fram. Dessa modulatorer är av reflektiv typ och avsedda för våglängder omkring 850 nm. Överföring vid 16 Mbps och kontrastförhållanden på ca 10:1 har visats i labmiljö.
- Retrokommunikation tillsammans med icke-mekanisk strålstyrning har demonstrerats i labmiljö. Strålstyrningen har skett med spatiella ljusmodulatorer (SLM) tillverkade av vätskekristaller, vilka utvecklats av CTH. Överföring av bilder har visats under samtidigt strålstyrning med SLM:er [10].
- Inom FM-projektet ”Kommunikationslänk under vattnet” har retrokommunikation studerats för kommunikation till en boj på vattenytan. Försök i verkliga förhållanden har genomförts. En utförlig karaktärisering har genomförts för de vätskekristallmodulatorer som tagits fram i samarbete med CTH [3].

ÖVRIG VERKSAMHET INOM LASERKommunikation

Inom KOMET-projektet har även försök genomförts med att undersöka möjligheterna till optisk kommunikation där fri siktsträcka mellan sändare och mottagare saknas. Försöken syftade till att undersöka möjligheten med att använda en ultraviolett laser. Lasern riktas rakt upp i luften och sprids i atmosfären för att sedan nå en detektor på marken. Resultaten, som visar på en god potential för konceptet, kommer eventuellt att sammanfattas i ett FOI Memo.

LASERKommunikation I KOMET 2005

Under 2005 kommer verksamheten med retrokommunikation att fortsätta. En retrokommunikationslänk ska tas fram, med syfte att demonstrera överföring av bild eller tal i ett scenario passande för stadsmiljö. Vidare ska möjligheterna med olika typer av modulation och kodning studeras, vilket är ett viktigt område med tanke på turbulenseffekter, kontrastförhållanden hos modulatorerna och vätskekristallernas speciella förmåga till polarisationsmodulation.

REFERENSER

- [1] O. Steinvall, "Reduktion av turbulensfärdning hos laserkommunikationslänkar", FOI-R--0200--SE, September 2001.
- [2] J. Öhgren m.fl., "Retrocommunication with ferroelectric liquid crystal modulators - preliminary results", FOI-R--0325--SE, 2001.
- [3] J. Öhgren, C Wahlberg, "Utveckling av nya vätskekristallmodulatorer – Bestämning av optiska och elektriska egenskaper, FOI-R--1486--SE, 2004.
- [3] P. G. Goetz et. al., "High-Speed Large Area Surface-Normal Multiple Quantum Well Modulators", Proc. of SPIE Vol. 5160, 346-354 (2004).
- [4] R. Mahon et. al., "A Free-Space Optical Communication Link at 1550 nm using Multiple Quantum Well Modulating Retro-Reflectors in a Marine Environment", Proc. of SPIE Vol. 5160, 456-465 (2004).
- [5] G. C. Gilbreath, W. S. Rabinowich, "Research in Free Space optical Data Transfer at the U. S. Naval Research Laboratory", Proc. of SPIE Vol. 5160, 225-233 (2004).
- [6] W. S. Rabinowich et. al., "Performance of Cat's Eye Modulating Retro-Reflectors for Free-Space Optical Communication", Proc. of SPIE Vol. 5550, 104-114 (2004).
- [7] P. G. Goetz et. al., "Coherent Modulating Retroreflector System", Proc. of SPIE Vol. 5550, 115-121 (2004).
- [8] T.M. Shay et. al., "The First Experimental Demonstration of Full-Duplex Communication on a Single Laser Beam", Proc. of SPIE Vol. 5160, 265-271 (2004).
- [9] T. M. Shay, R Kumar, "2.5-Gbps Amplified Retro-Modulator for Free-Space Optical Communications", Proc. of SPIE Vol. 5550, 122-129 (2004).
- [10] L. Sjöqvist m.fl., "Retrocommunication – Final report", FOI-R--1220--SE, mars 2004.