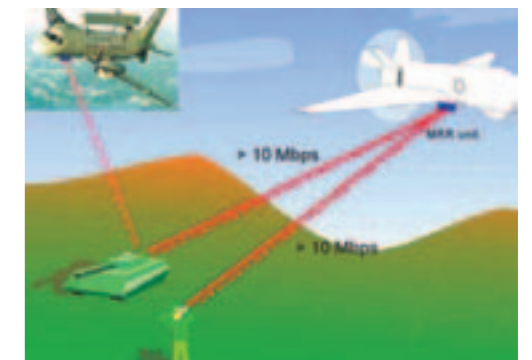
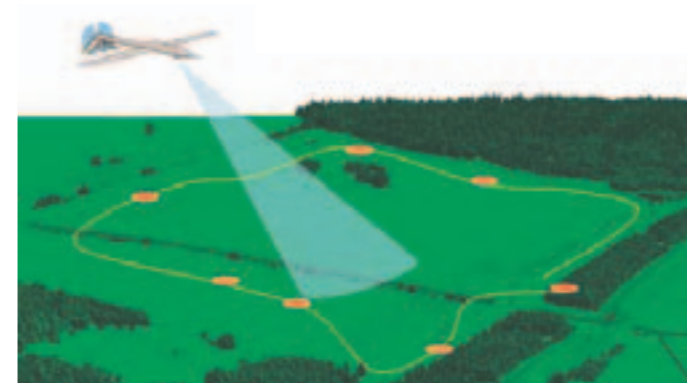
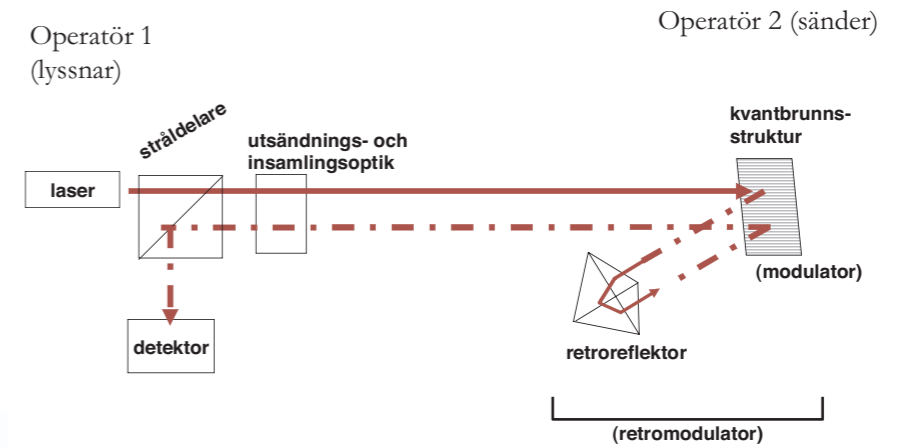


# Kan prestanda för retrokommunikations-system förbättras genom att använda traditionella radiosystemtekniker?

JOUNI RANTAKOKKO



FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1350 anställda varav ungefär 950 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömningen av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.

## Förstudie

Kan prestanda för retrokommunikationssystem  
förbättras genom att använda traditionella  
radiosystemtekniker?

<b>Utgivare</b> FOI - Totalförsvarets forskningsinstitut Ledningssystem Box 1165 581 11 Linköping	<b>Rapportnummer, ISRN</b> FOI-R--1883--SE	<b>Klassificering</b> Teknisk rapport
	<b>Forskningsområde</b> 4. Ledning, informationsteknik och sensorer	
	<b>Månad, år</b> December 2005	<b>Projektnummer</b> E7063, E3076
	<b>Delområde</b> 41 Ledning med samband och telekom och IT-system	
	<b>Delområde 2</b>	
<b>Författare/redaktör</b> Jouni Rantakokko	<b>Projektledare</b> Åsa Waern, Fredrik Kullander	
	<b>Godkänd av</b> Sören Eriksson	
	<b>Uppdragsgivare/kundbeteckning</b> Försvarsmakten	
	<b>Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig</b> Fredrik Kullander	
<b>Rapportens titel</b> Förstudie - Kan prestanda för retrokommunikationssystem förbättras genom att använda traditionella radiosystemtekniker?		
<b>Sammanfattning</b> <p>Framtida retrokommunikationssystem kan medge kommunikation med höga datatakt och goda smygegenskaper för tillämpningar där kraven är hårda på bl.a. billiga, små kommunikationssystem med låg vikt och effektanvändning. Exempel på sådana tillämpningar är kommunikation från taktiska UAV'er, marksensornät och bojkommunikation för ubåtar och UUV'er.</p> <p>I den här rapporten beskrivs hur signalbehandlingsmetoder som använts i radiosystem kan användas för att förbättra prestanda (i form av ökade kapaciteter och räckvidder samt minskade felhalter) även för kommande retrokommunikationssystem. När tekniker som används inom ett område (radiosystem) ska appliceras på ett något annorlunda forskningsområde (retrokommunikation) måste teknikerna anpassas till de förutsättningar och begränsningar som gäller inom det nya området. Därför inleds rapporten med en beskrivning av hur retrokommunikationssystem fungerar. Överföringskanalen är vid alla typer av kommunikation en begränsande faktor, och den optiska överföringskanalen beskrivs därför därefter, bl.a. turbulens, scintillationer och den varierande atmosfärsdämpningen.</p> <p>Den här förstudien visar att felrättande kodning, olika diversitetsmetoder, förbättrade detektionsalgoritmer, flernivåmodulation och adaptiv modulation och kodning är tekniker som kan ge stora vinster även i retrokommunikationssystem.</p>		
<b>Nyckelord</b> Retrokommunikation, kvantbrunnsmodulator, vätskekristallmodulator, felrättande kodning, diversitet, adaptiv modulation, flernivåmodulation		
<b>Övriga bibliografiska uppgifter</b>	<b>Språk</b> Svenska	
<b>ISSN</b> 1650-1942	<b>Antal sidor:</b> 30 s.	
<b>Distribution enligt missiv</b>	<b>Pris:</b> Enligt prislista	

<b>Issuing organization</b> FOI – Swedish Defence Research Agency Command and Control Systems Box 1165 581 11 Linköping	<b>Report number, ISRN</b> FOI-R--1883--SE	<b>Report type</b> Technical report
	<b>Programme Areas</b> 4. C4ISTAR	
	<b>Month year</b> December 2005	<b>Project no.</b> E7063, E3076
	<b>Subcategories</b> 41 C4I	
	<b>Subcategories 2</b>	
<b>Author/s (editor/s)</b> Jouni Rantakokko	<b>Project manager</b> Åsa Waern, Fredrik Kullander	
	<b>Approved by</b> Sören Eriksson	
	<b>Sponsoring agency</b> Swedish Armed Forces	
	<b>Scientifically and technically responsible</b> Fredrik Kullander	
<b>Report title (In translation)</b> Can the performance of retro communication systems be improved by traditional radio system techniques?		
<b>Abstract</b> <p>Future retro communication systems can permit communication with high data rates and good stealth characteristics for applications where the demands are strict on e.g. low cost, small, power-efficient communication units with low weight. Interesting examples of such applications are tactical UAV's, ground sensor networks, and buoy communication from submarines and UUV's.</p> <p>In this report we describe how signal processing methods, that has been used in radio systems, also can be used to improve the performance (in terms of capacity, range and reduced error rates) of future retro communication systems. The report begins with a description of typical retro communication systems and the resulting communication channel (e.g. turbulence, scintillations and the weather-dependent atmospheric attenuation).</p> <p>In this feasibility study we show that error correction coding, multiple-level modulation, improved detection algorithms, diversity techniques, and adaptive modulation and coding are techniques that can yield substantial improvements also for retro communication systems.</p>		
<b>Keywords</b> Retro communication system, multiple quantum well, ferro liquid crystal, retro modulator, diversity, adaptive modulation, FEC, multi-level modulation		
<b>Further bibliographic information</b>	<b>Language</b> Swedish	
<b>ISSN</b> 1650-1942	<b>Pages</b> 30 p.	
	<b>Price acc. to pricelist</b>	

Förstudie

Kan prestanda för retrokommunikationssystem  
förbättras genom att använda traditionella  
radiokommunikationstekniker?

# Innehållsförteckning

<b>1</b>	<b>INTRODUKTION .....</b>	<b>6</b>
1.1	Syfte med rapporten.....	7
<b>2</b>	<b>BESKRIVNING AV ETT RETROKOMMUNIKATIONSSYSTEM.....</b>	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>KANALENS EGENSKAPER.....</b>	<b>12</b>
<b>4</b>	<b>TEKNIKER SOM KAN GE EN FÖRBÄTTRAD PRESTANDA I RETROKOMMUNIKATIONSSYSTEM .....</b>	<b>14</b>
<b>4.1</b>	<b>Diversitetsmetoder .....</b>	<b>14</b>
4.1.1	Rumsdiversitet, lobformning och MIMO.....	14
4.1.2	Polarisationsdiversitet.....	16
4.1.3	Tidsdiversitet.....	16
4.1.4	Frekvensdiversitet .....	17
4.1.5	Diskussion om diversitetsmetoder.....	17
<b>4.2</b>	<b>Alternativa modulationsmetoder och flernivåmodulation.....</b>	<b>17</b>
4.2.1	Olika modulationsmetoder .....	17
4.2.2	Optimal detektion.....	19
4.2.3	Pilotsymbol-assisterad modulation .....	19
4.2.4	Flernivåmodulation.....	19
4.2.5	Parallella modulationstyper.....	20
<b>4.4</b>	<b>Felrättande kodning i kombination med interleaving.....</b>	<b>21</b>
<b>4.5</b>	<b>Adaptivitet .....</b>	<b>21</b>
4.5.1	Diskussion om adaptiva tekniker.....	24
<b>5</b>	<b>SAMMANFATTANDE DISKUSSION.....</b>	<b>25</b>
<b>6</b>	<b>REKOMMENDATION.....</b>	<b>28</b>
	<b>REFERENSER .....</b>	<b>29</b>

# 1 Introduktion

Fri optisk kommunikation kan ge hög kapacitet för många militära kommunikations-tillämpningar, t.ex. som komplement till radiolänkar i telesystemet, ersättning för fiber på korta avstånd vilket ger en snabbare nätetablering, etc. Fri optisk kommunikation kan i vissa tillämpningar ha stora fördelar gentemot radiosystem vid punkt-till-punkt kommunikation med fri sikt mellan sändaren och mottagaren<sup>1</sup>. Idag finns kommersiellt tillgängliga högkapacitetslänkar som fungerar väl för stationära system. Vid hög mobilitet måste även riktningen till mottagaren bestämmas och lasern behöver riktas in mot, och därefter även följa mottagaren.

Några av de viktigaste egenskaperna hos fri optisk kommunikation är

- + Hög kapacitet.
- + Smygegenskaper och svårt att störa.
- Väderberoende prestanda.
- Komplicerad inriktning av lasern och målföljning behövs om någon av noderna är mobil, men för de flesta tillämpningar kan det fortfarande genomföras.
- Endast punkt-punkt kommunikation (s.k. unicast-trafik) kan normalt understödjas<sup>2</sup>.

Retrokommunikation är en teknik som kan användas i de flesta tillämpningar där fri optisk kommunikation används, men fördelarna med att använda retrokommunikation uppnås först då kraven är hårda på låg vikt, låg effektförbrukning och/eller liten yta, i en av kommunikationsnoderna [2-3], [7], [9-12]. Vid användning av retrokommunikation kan en inriktnings- och följningsmekanism och en laserenhet, bytas ut mot en liten, lätt (10-100 gram) och strömsnål (ofta < 100 mW) retromodulatorenhet. Priset är dock en försämrad kapacitet och räckvidd i jämförelse med traditionell fri optisk kommunikation. I övrigt så har ett retrokommunikationssystem i stort samma fördelar som vid fri optisk kommunikation, dvs det är relativt säkert, det är svårt att upptäcka och mycket svårt att avlyssna (bl.a. eftersom den reflekterade strålen från den s.k.

---

<sup>1</sup> Det finns förslag där fri optisk kommunikation används för att sända till flera samtidiga mottagare, t.ex. genom att detektera en laserstråle som reflekteras (diffust) i en vägg eller vid kommunikation med ultraviolett-ljus där atmosfären reflekterar tillbaka UV-ljuset, se t.ex. [8].

<sup>2</sup> Många av de mest efterfrågade tjänsterna som ett kommunikationssystem ska leverera är av typen multicast (t.ex. gruppsamtal) eller broadcast (en sänder till alla andra), och det försvåras av att ha den här typen av direktiva länkar. Genom att ha en hög kapacitet på varje länk och möjligheten att snabbt ändra laserstrålens riktning kan det ändå vara möjligt att i framtiden stötta även den typen av tjänster, som är vanliga t.ex. för ett mekaniserat förband. I ett retrokommunikationssystem kan flera enheter inhämta samma information samtidigt från retromodulatorenheten som kan vara placerad på en UAV.

retromodulatorens normalt är ännu smalare än laserstrålen vid fri optisk kommunikation).

## 1.1 Syfte med rapporten

I det här dokumentet diskuteras olika tekniker som kan användas för att förbättra prestanda för ett retrokommunikationssystem. Syftet med den här förstudien är att utreda om signalbehandlingstekniker som används för att förbättra prestanda i radiosystem kan implementeras, eventuellt efter vissa modifikationer, och även ge avsevärda förbättringar i retrokommunikationssystem. Flera lovande tekniker kommer att identifieras, förslag kommer att ges på hur de kan implementeras och förväntad prestanda kommer även att uppskattas.

En viktig faktor som begränsar prestanda för ett retrokommunikationssystem är den överföringskanal som laserstrålen färdas igenom [14]. Atmosfärsdämpningen kan variera kraftigt för ett laserkommunikationssystem beroende på väderleken, och vid svåra förhållanden som kraftig dimma eller kraftigt regn är det i praktiken nästan omöjligt att överföra information annat än för korta avstånd. Turbulens i atmosfären orsakar fluktuationer i både intensitet och fas i detektor, dvs signalen utsätts för fädning, vilket ökar felsannolikheten vid överföringen av data. De tekniker som beskrivs här syftar till att förbättra retrokommunikationssystemets överföringskapacitet och minska bitfelssannolikheten, under gynnsamma kanalförhållanden och även då atmosfärsdämpningen och turbulensen är kraftig.

Hårdvaran, i huvudsak retromodulatorens, begränsar modulationshastigheten i ett retrokommunikationssystem och därmed även hur mycket information som kan överföras [7], [10], [19]. Turbulensens negativa effekter kan i framtiden troligen förbättras genom införandet av adaptiv optik [6], vilket är ett intressant forskningsområde. Troligen löser dock inte adaptiv optik helt problemet med turbulens för långa länkar och ytterligare kompletterande tekniker, t.ex. diversitet och felrättande kodning, är intressanta att undersöka. En stor utmaning som återstår att lösa på ett tillfredställande sätt gäller hur lasern ska hitta, låsa mot och sedan följa en retromodulator som är placerad på plattformar med hög mobilitet. Forskning pågår inom området på t.ex. DARPA (Defence Advanced Research Project Agency). Lasersändaren och de optiska filtren i mottagaren kan även de förbättras.

Sammanfattningsvis kan prestanda för ett retrokommunikationssystem förbättras på bl.a. följande sätt:

- ✓ Implementera signalbehandlingstekniker som används i radiosystem, t.ex. felrättande kodning, diversitet, flernivåmodulation, och adaptivitet. Målet är både att förbättra kapaciteten under goda förhållanden och att minimera turbulensens och den varierande atmosfärsdämpningens negativa effekter.
- ✓ Snabbare retromodulatorer (med bibehållen modulationshastighet).
- ✓ Adaptiv optik för att motverka turbulens.



- ✓ Förbättrad målföljning av retromodulatorenheten vid höga mobiliteter, t.ex. genom användning av s.k. ”tip-tilt” speglar som snabbt kan göra mindre korrigeringar av laserns strålrättning.
- ✓ Förbättrade lasrar med högre uteffekt och minskad divergens.
- ✓ Effektivare optiska filter som reducerar det optiska bakgrundsbruset.

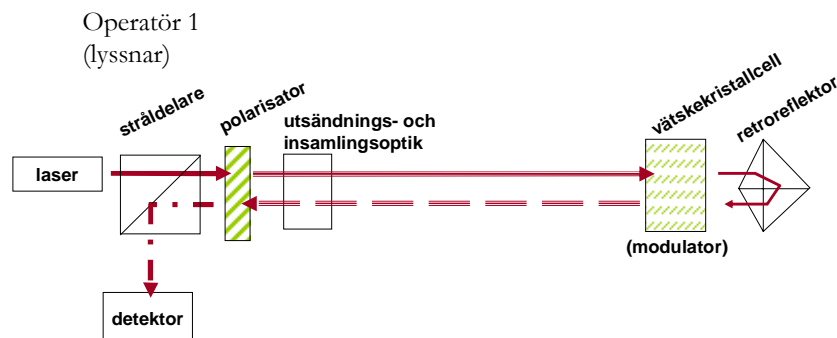
I det här dokumentet fokuserar vi på hur olika radiosignalbehandlingstekniker kan användas för att förbättra prestanda, medan olika hårdvaruförbättringar inte diskuteras närmare. Våglängdsmultiplexering undersöks inte heller.

## 2 Beskrivning av ett retrokommunikationssystem

Ett retrokommunikationssystem består typiskt av en kombinerad sändare och mottagare (en s.k. sändtagare) placerade i samma enhet, samt en retromodulator, se t.ex. [7] och [10]. Sändtagaren består normalt av en laser, en fotodetektor, optik och en modul som utför följning och låsning. Sändarenheten måste först rikta in sig mot, och därefter även följa, retromodulatorenheten och rikta laserstrålen mot den. Retromodulatorenheten består av en retroreflektor, t.ex. en hörnkubslösning som reflekterar tillbaka laserstrålen i den riktning den kom ifrån, samt en modulator som lägger på informationen genom att förändra laserstrålens egenskaper t.ex. dess polarisation, intensitet, våglängd eller fas. Vid retromodulatorenheten kan även en konventionell fotodetektor implementeras så att dubbelriktad kommunikation möjliggörs [9]. Detta kan utföras genom att informationen i upplänken infogas t.ex. genom att förändra laserstrålens fas eller polarisation, medan informationen i nedlänken moduleras på laserstrålen genom att ändra dess intensitet.

Retromodulatorenheten kan antingen vara transmissiv, där t.ex. en vätskekristallcell förändrar laserstrålens polarisation då strålen passerar igenom cellen, se figur 1 och 2, eller reflektiv, där en multipel kvantbrunnsmodulator med förändringsbar reflektionsfaktor kan användas för att ändra strålens intensitet efter reflektionen, se figur 3. Retromodulatorenheten kan även konstrueras med en rörlig spegel som antingen reflekterar signalen tillbaka i riktning mot sändaren eller i en annan riktning.

Olika typer av retromodulatorer medger olika modulationshastigheter (ibland även kallad dess bandbredd), t.ex. har praktiska försök gjorts med ferroelektriska vätskekristallmodulatorer (*Ferro-electric Liquid Crystal - FLC*) där modulationshastigheter på närmare hundra kHz har uppnåtts [19] medan kvantbrunnsbaserade (*Multiple Quantum Well - MQW*) modulatorer har visats klara modulationshastigheter på tiotals MHz [10]. Modulationshastigheten för en MQW-modulator beror till stor del av dess storlek och med små modulatorer ( $\sim 1 \text{ mm}^2$ ) har modulationshastigheter över 1 GHz demonstrerats av Acreo [20]. Allmänt gäller att elektrooptiska modulatorer (t.ex. FLC och MQW) idag är snabbare än mikromekaniska modulatorer (där signalen kan moduleras t.ex. med mekaniskt rörliga speglar).



Figur 1: Principen för ett retrokommunikationssystem bestående av en transmissiv vätskekristallbaserad retromodulator [7].

Retromodulatorns storlek påverkar kraftigt den signalenergi som reflekteras tillbaka och för retrokommunikationssystem som ska operera över längre avstånd behövs därmed relativt stora modulatorer. För de storlekar på modulatorerna som troligen kommer användas vid många taktiska tillämpningar bör hastigheter på tiotals MHz kunna uppnås.

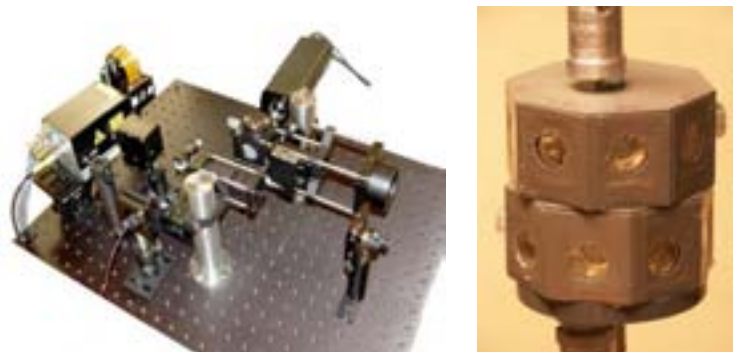
För ett diffraktionsbegränsat system påverkas den optiska signalenergin som retroreflekteras tillbaka till detektorn från retromodulatorens,  $P_{\text{mottagen}}$  enligt följande ekvation (turbulensens effekter är dock inte med här),

$$P_{\text{mottagen}} = \frac{P_{\text{laser}} \cdot D_{\text{retroreflektor}}^4 \cdot D_{\text{mottagare}}^2}{\theta_{\text{divergens}}^2 \cdot R^4 \cdot \lambda^2}, \quad (1)$$

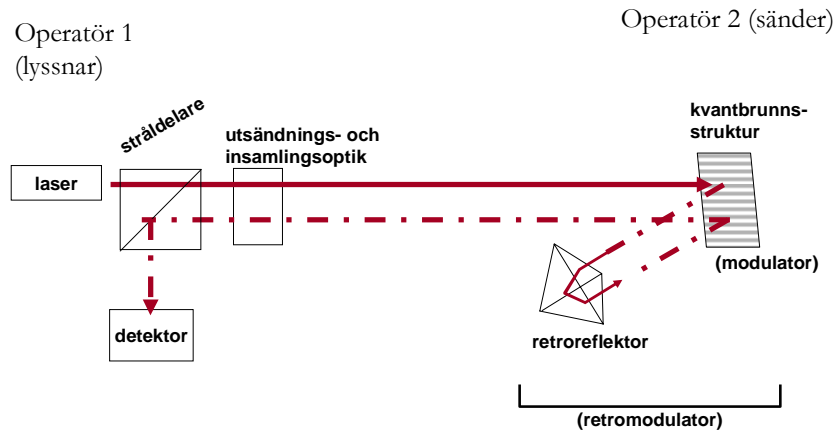
där  $P_{\text{laser}}$  är laserns uteffekt,  $D_{\text{retroreflektor}}$  är diametern för retromodulatorens,  $D_{\text{mottagare}}$  är diametern för mottagarens optik (teleskop),  $\theta_{\text{divergens}}$  anger hur mycket laserstrålen divergerar,  $R$  är avståndet mellan sändtagaren och retromodulatorens, och  $\lambda$  är laserns våglängd. Divergensen vid strålens gång tillbaka från retromodulatorens till sändtagaren är liten och försummas i denna ekvation. Noterbart är att den mottagna signalenergin avtar kraftigt både då avståndet ökar och om diametern för retroreflektorn minskas.

En av många avvägningar som behöver göras vid designen av ett retrokommunikationssystem är mellan önskat kommunikationsavstånd och överföringskapacitet. Ett fördubblat avstånd kan t.ex. uppnås genom att ungefär fördubbla retromodulatorns diameter, enligt ekvation (1), men då reduceras samtidigt den maximala modulationshastigheten.

Nya tekniker undersöks som kan komma att drastiskt förbättra kapaciteten i retrokommunikationssystem. Ett exempel är retromodulatorer som baseras på fokalplansteknik (sfäriska linser), istället för hörnkubsreflektorer, vilket medger att mindre modulatorer kan användas. Då kan det bli möjligt att uppnå modulationshastigheter över en GHz. Idag är dock infallsvinkelintervallet där inkommande signaler kan tas emot och moduleras (*field-of-view*, *FOV*) begränsad för dessa system vilket försvårar användningen av den här typen av retromodulator i mobila noder. Det är fortfarande relativt komplext att konstruera fokalplansretromodulatorer med ett stort FOV.



**Figur 2:** Sändarenhet och detektor (vänster) och bild av array av vätskekristallmodulatorer som ger 360-graders täckning (höger) [7].



**Figur 3: Principen för ett retrokommunikationssystem bestående av en reflektiv kvantbrunnstruktur-baserad retromodulator [7].**

### 3 Kanalens egenskaper

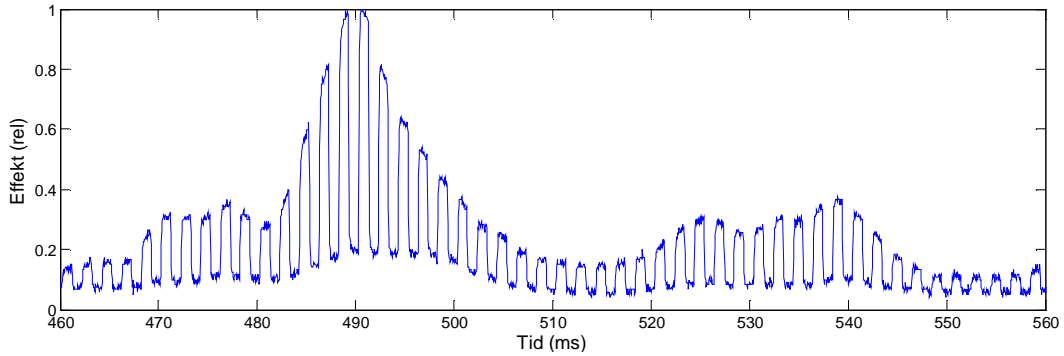
Den varierande atmosfärsdämpningen, som kraftigt påverkas av väderförhållandena, kan beroende på tillämpning utgöra ett stort problem vid retrokommunikation. Den innebär att systemets räckvidd och kapacitet varierar kraftigt, se tabell 1 [7]. Vid riktigt dåliga väderförhållanden blir i praktiken räckvidden för retrokommunikationssystem mycket kort. För retrokommunikationssystem som ska operera på längre avstånd innebär detta att systemet ibland inte kommer att fungera. Dessa dåliga väderförhållanden infaller dock relativt sällan, och tidstillgängligheten för de experimentella retrokommunikationssystem som redovisats har normalt reducerats med i storleksordningen någon eller några promille. För system som är tänkta att användas på långa avstånd (flera kilometer) kan dock tillgängligheten påverkas kraftigt av den varierande atmosfärsdämpningen.

**Tabell 1: Atmosfärsdämpningens variation som en funktion av rådande väderförhållanden [7].**

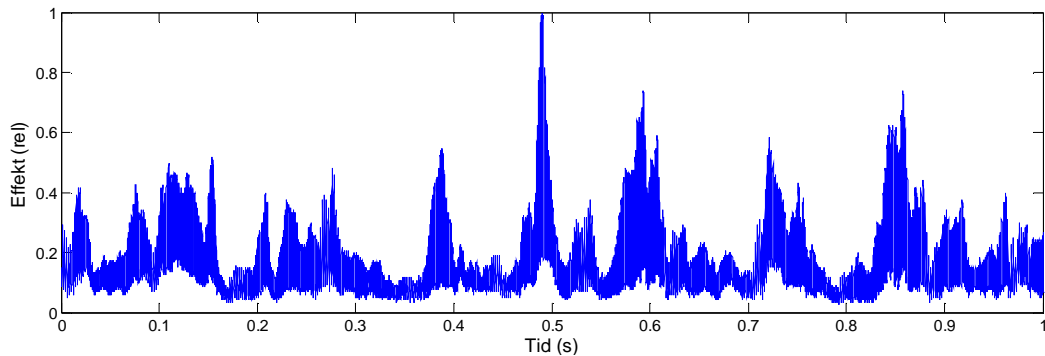
Siktförhållande	Sikt	Transmission, 100 m (%)	Dämpning (dB/km)	Dämpningskoeff., $\sigma$ ( $\text{m}^{-1}$ )
God sikt	23 km	99,6	0,17	$3,8 \cdot 10^{-5}$
Måttlig sikt	5 km	98,2	0,80	$1,8 \cdot 10^{-4}$
Dimma	500 m	41,4	38	$8,8 \cdot 10^{-3}$
Tät dimma	200 m	13,4	87	0,020

Anta att vi har ett retrokommunikationssystem som opererar på ett avstånd av 2 km. Över den sträckan kan den väderberoende atmosfärsdämpningen variera med över 150 dB. Det innebär att den mottagna signalstyrkan i ytterlighetsfallen kan variera (relativt långsamt) med över 300 dB och så stora förluster av signalstyrka är svåra att hantera. I praktiken kommer atmosfärsdämpningen att innebära att det taktiska uppträdandet behöver anpassas i de fall väderförhållandena är riktigt dåliga. Backupssystem i form av radio kan i vissa tillämpningar vara nödvändiga.

Turbulens i atmosfären orsakas av att atmosfärens temperatur och tryck varierar, vilket resulterar i ett variabelt brytningsindex där laserstrålen passerar. Turbulens i atmosfären orsakar variationer i mottagen signalstyrka, s.k. fädning, pga strålvandring och scintillationer. Turbulensen orsakar även en breddning av strålen vilket minskar signalenergin i detektorn. Turbulensen är kraftigast där strömmar av kall och varm luft möts, t.ex. nära marken, fönster och väggar, och turbulens kan därmed utgöra ett problem speciellt vid användning i urbana miljöer. Vid korta kommunikationsavstånd (upp till kanske några hundra meter) är turbulensens inverkan ofta liten eller försumbar, men turbulensens inverkan på systemets prestanda ökar med avståndet. Vid vissa tillämpningar, t.ex. strid i urban miljö, kan även bränder uppstå som kan orsaka kraftig turbulens, samtidigt som brandröken i värsta fall även kan orsaka en kraftigt ökad dämpning. Turbulensens negativa effekter kan minskas genom ett antal olika metoder, bl.a. diversitet, adaptiv modulation och/eller felrättande kodning, vilket kommer att diskuteras närmare i nästa kapitel.



**Figur 4: Exempel på hur den mottagna signalstyrkan i detektorn kan variera över tiden.**



**Figur 5: Exempel på hur den mottagna signalstyrkan i detektorn kan variera under en sekund.**

Exempel på hur den mottagna signalstyrkan kan variera över tiden för ett experimentellt retrokommunikationssystem, som redovisats i [7], visas i figur 4 och 5.

Intersymbolinterferens kan i framtiden uppstå i retrokommunikationssystem eftersom målet är att väsentligt öka modulationshastigheterna för retromodulatorerna. Intersymbolinterferens uppstår om kanalens tidsspridning (dvs tiden mellan det att direktkomponenten och den sista fördröjda strålen når mottagaren) inte längre är mindre än symboltiden. I dagens system är dock intersymbolinterferensen inte ett problem.

## 4 Tekniker som kan ge en förbättrad prestanda i retrokommunikationssystem

I det här kapitlet beskrivs ett antal tekniker som förväntas kunna leda till högre kapacitet och en minskad bitfelssannolikhet i framtida retrokommunikationssystem.

### 4.1 Diversitetsmetoder

Inom radiokommunikationsområdet har ett flertal olika diversitetsmetoder effektivt använts för att motverka fädning, bl.a. rumsdiversitet, polarisationsdiversitet, tidsdiversitet och frekvensdiversitet [4].

#### 4.1.1 Rumsdiversitet, lobformning och MIMO

Vid rumsdiversitet används flera detektorer som är placerade på fysiskt olika positioner. Om avståndet är tillräckligt stort mellan detektorerna kommer den mottagna signalen i de olika detektorerna att fäda olika, och ju fler detektorer som används desto mindre är sannolikheten för att signalenergin i alla detektorerna är låg vid en viss tidpunkt (dvs alla har ett fädningsminima samtidigt). Genom att välja den detektor som för stunden har starkast signal (valdiversitet) kan därmed signalstyrkan i mottagaren förbättras i svårt fädande miljöer.

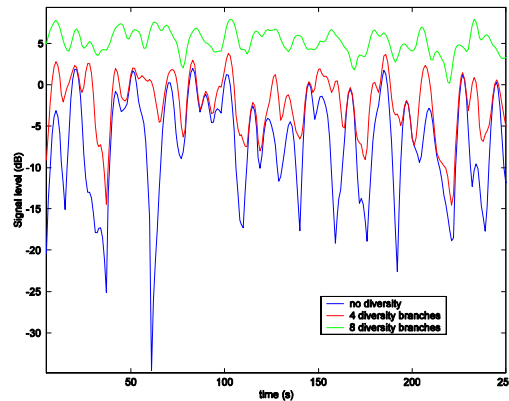
En ännu effektivare diversitetskombinering, s.k. maximalviktskombinering (MRC), är att vikta signalerna från de olika detektorerna med deras SNR och sedan addera dessa, se figur 6. Vid MRC måste dock de momentana kanalerna estimeras för de olika detektorerna. Likaviktskombinering (EGC) kan även utföras, den är något enklare än MRC men den ger en något sämre prestanda.

Optimalt ska detektorerna placeras så långt ifrån varandra så att de mottagna signalnivåerna fädar olika, men i praktiken kan detta inte alltid uppnås och en viss korrelation mellan hur signalerna fädar i de olika detektorerna kan uppstå, vilket leder till en försämrad diversitetsvinst [14-17]. Beroende på vilken information mottagaren antas ha om fädningen (momentan kunskap om fädningen eller endast kunskap om fädningens statistiska egenskaper) erhålls olika optimala detektionsmetoder<sup>3</sup> med skilda prestanda.

En fördel med rumsdiversitet är att prestanda för systemet förbättras utan att kapacitet offras, vilket sker vid t.ex. tidsdiversitet, och rumsdiversitetssystem kan kombineras med andra förbättrande tekniker, t.ex. felrättande kodning.

---

<sup>3</sup> Notera att vi med *detektor* i detta dokument normalt avser fotodetektorn, medan vi med *detektion* menar ”regeln för hur mottagaren utifrån mottagen signal (efter fotodetektorn) avgör om en etta respektive en nolla sändes”.



**Figur 6: Rumsdiversitet med 4 och 8 diversitetsgrenar (med MRC). Diversitetsgrenarna antas vara oberoende och kanalen Rayleigh-färdande.**

Genom att använda flera retromodulatorer placerade bredvid varandra, där alla reflekterar tillbaka den lasersignal som de tar emot i riktning mot lasersändaren, kan ett lobformningsliknande system implementeras. Om två retromodulatorer med tillhörande hörnkuber är placerade så nära varandra att de upplever samma överföringskanal och de moduleras med samma symboler, så kan enligt ekvation (1) den mottagna signalenergin i mottagaren möjligen ökas med en faktor fyra. Motsvarande vinst kan uppnås genom att fördubbla retromodulatorns area men det kan leda till en reducerad modulationshastighet. Att använda multipla retromodulatorer (som är placerade så nära att de känner samma kanal) kan alltså ses som ett sätt att öka retromodulatorns area utan en reducerad modulationshastighet. Nackdelen är en ökad hårdvarukomplexitet, bl.a. i form av drivelektronik och multipla hörnkuber. I mottagaren kan flera detektorer (med separata objektiv) användas men det är oklart om det ger några vinster i jämförelse med att använda en större detektor.

I ett retrokommunikationssystem som ska operera på långa avstånd, där turbulensen kan förväntas vara kraftig, kan troligen diversitetsmetoder förbättra systemets prestanda kraftigt. Om flera retromodulatorer används som är separerade i rummet så kan den signal som når dem vara olika pga av turbulensinducerad färdning, och då kan diversitetsvinster uppnås i detektorn genom att använda kombinerad rums-tidskodning (t.ex. Space-Time-Block-Coding - STBC [5]). STBC är en relativt enkel teknik som medger att sändningsdiversitetsdiversitetsvinster kan uppnås utan att sändaren behöver känna till kanalen. Däremot så måste kanalen (t.ex. SNR) estimeras i mottagaren.

Vissa vinster med rumsdiversitet kan eventuellt även uppnås genom att istället använda flera detektorer i mottagaren (endast en retromodulator behövs då). Notera dock att strålen tillbaka från retromodulatorenheten sprids betydligt mindre än laserstrålen som sänds i riktning mot retromodulatorn. Därför är strålen betydligt mer samlad i sändtagaren, vilket minskar möjligheterna att uppnå diversitetsvinster i sändtagarenheten.

MIMO-tekniker (som har multipla antennelement på både sändaren och mottagaren) är ett hett forskningsområde inom radioområdet. Anledningen är att de kan ge väldigt höga kapacitets- och robusthetsvinster i miljöer med kraftig flervägsutbredning, i första hand för urbana miljöer [5]. Genom att använda multipla retromodulatorer och



multipla detektorer erhålls ett MIMO-system. För att uppnå stora kapacitetsvinster bör kanalerna från de olika modulatorerna till detektorerna vara olika (teoretiskt kan då genom spatiell multiplexering, vilket har visats för radiosystem, en kapacitetsvinst uppnås som är linjär mot antalet sändande modulatorer, förutsatt att antalet detektorer i mottagaren är minst lika många). Den typen av kanaler lär dock inte uppstå i typiska retrokommunikationstillämpningar.

Diversitetsgraden i ett MIMO-system som använder sig av kombinerad sändnings- och mottagningsdiversitet blir multiplikativ, dvs genom att använda fyra retromodulatorer och två detektorer kan samma diversitetsvinst uppnås som om åtta retromodulatorer och en detektor används. Detta förutsätter att separationerna är sådana att fädningen är okorrelerad i de olika detektorerna. Frågan är dock om den reflekterade signalen tillbaka från retromodulatorens sprids tillräckligt mycket för att medge rumsdiversitet i sändtagarenheten.

Den kunskap vi har om kanalen idag indikerar att den mest intressanta av dessa tekniker troligen är sändningsdiversitet (mha STBC) där multipla retromodulatorer används. Eventuellt är strålen så samlad (pga hörnkubens egenskaper och kanalens reciprocitet) i sändtagaren (detektorn) att mottagningsdiversitet inte kommer att ge mer än marginella vinster. Ytterligare kanalundersökningar behöver dock genomföras för att verifiera dessa antaganden. Det som i slutändan förväntas avgöra vilken prestandavinst som kan uppnås genom användningen av rumsdiversitet är kanalen (och därmed även scenariot) och vilken extra komplexitet som kan accepteras i form av utökad hårdvara (t.ex. multipla retromodulatorer).

#### *4.1.2 Polarisationsdiversitet*

I stället för att använda två detektorer som är placerade på olika positioner är det, åtminstone i teorin, möjligt att använda detektorer som känner av signalenergin för olika polarisationer. I radiosystem som opererar i urban miljö har det visat sig att signalens olika polarisationsriktningar ofta påverkas annorlunda, pga multipla reflektioner, och signalen kan därför fäda väldigt annorlunda i olika polarisationer. I optiska direktlänkar påverkas dock de båda riktningarna i hög utsträckning lika av turbulenseffekter.

För vätskekristallmodulatorer som använder sig av polarisationsmodulation har system demonstrerats där båda polarisationerna har detekterats och den med högst värde väljs, istället för att känna av signalenergin i en polarisationsriktning och därefter jämföra den mot en fast förutbestämd tröskelnivå. Med två detektorer erhöles en förbättrad robusthet mot fädning [7].

#### *4.1.3 Tidsdiversitet*

Tidsdiversitet kan enkelt uppnås genom att sända samma informationsbit två gånger vid olika tidpunkter. Tanken är då att signalen ska fäda olika för de två bitarna. Felrättande kodning, där redundanta bitar sänds ut som används i mottagaren för att både detektera antalet felaktiga bitar och även till att rätta en del av felen, kan ses som en sorts tidsdiversitet. Valet av felrättande kod och även interleaverns längd (en interleaver tar ett visst antal bitar och ändrar sedan om ordningen bland dessa)

designas ofta utifrån kunskap om fädningens statistik, t.ex. typiska längder på fädningdipparna.

#### 4.1.4 Frekvensdiversitet

Frekvensdiversitet kan användas om kanalen ser olika ut för olika frekvenser (våglängder för lasersändaren). Vid frekvensdiversitet kan t.ex. samma bit sändas på två olika våglängder och om de mottagna signalerna fädras olika kan en diversitetsvinst uppnås. Hur lik kanalens påverkan är för närliggande våglängder påverkar givetvis hur stor separationen i våglängder bör vara för att uppnå den här sortens diversitetsvinst. En annan viktig fråga är hur mycket extra hårdvara som behövs för att kunna uppnå våglängdsdiversitetsvinster i typiska retrokommunikationskanaler (dvs behövs flera lasersändare, detektorer, filter etc)?

#### 4.1.5 Diskussion om diversitetsmetoder

Diversitetsmetoder kan ge stora vinster vid kraftig fädning, som t.ex. kan orsakas av turbulens. Av de beskrivna diversitetsmetoderna bedöms rumsdiversitet (sändningsdiversitet i retromodulatorenheten) och felrättande kodning i kombination med interleaving vara de mest intressanta att undersöka i retrokommunikationssystem. Lämpliga detektoravstånd som ger tillräckligt okorrelerad fädning (för rumsdiversitet) och vad som är typiska koherenslängder (vid tidsdiversitet) för kanalen behöver dock undersökas närmare innan diversitetssystemen designas och även för att tillförlitligt kunna analysera deras prestanda.

## 4.2 Alternativa modulationsmetoder och flernivåmodulation

Valet av modulationstyp påverkar både överföringskapaciteten, felsannolikheten och robustheten mot kanaleffekter. Anledningen är att kanalen påverkar olika egenskaper hos laserstrålen olika mycket. Turbulens kan exempelvis orsaka stora fluktuationer av laserstrålens amplitud, medan dess polarisation inte påverkas i samma utsträckning. I retrokommunikationssystem begränsas, eller avgörs helt, valet av modulationsmetod av retromodulatorns konstruktion. En vätskekristallcell kan förändra polarisationen hos laserstrålen vilket gör att polarisationsmodulation används, medan en retromodulator baserad på kvantbrunnsstruktur medger att laserstrålens intensitet kan förändras. Notera att om polarisationsmodulation används så kan skillnaden i sändarens och mottagarens polarisationsriktning även behöva estimeras vid mobila tillämpningar, vilket kan genomföras bl.a. genom att regelbundet sända tränings signaler med känd polarisation. Idag används ofta linjärpolariserade lasersändare i experimentsystem men det är möjligt att istället använda lasrar som sänder ut cirkulärpolariserad laserstrålning.

### 4.2.1 Olika modulationsmetoder

Exempel på modulationsmetoder som tidigare använts inom fri optisk kommunikation och/eller retrokommunikationssystem:

- Intensitet (*motsvaras av Pulse Amplitude Modulation - PAM - i radiosystem*)

- Polarisation
- Fas (*Phase Shift Keying - PSK*)
- Kombinerad fas- och intensitetsmodulation (*Quadrature Amplitude Modulation - QAM*)
- Frekvens/våglängd (*Frequency Shift Keying - FSK*)
- Pulspositionsmodulation (*PPM/DPPM*)

Intensitetsmodulation och binär "on-off keying" (där en "etta" moduleras genom att en stor del av signalenergin reflekteras tillbaka mot detektorn och en "nolla" moduleras genom att det mesta av signalenergin istället absorberas i retromodulatorens), är dock den vanligast använda modulationsmetoden i retrokommunikationssystem.

Valet av modulationsmetod förväntas påverka prestanda även för retrokommunikationssystemet. I kraftigt fädande kanaler kan robusta modulationsmetoder såsom binär FSK eller differentiell binär PSK ge en lägre bitfelshalt [4] i konventionella radiosystem. Vid signalfädning kan amplituden på den mottagna signalen variera kraftigt vilket kan göra det svårt att diskriminera mellan multipla intensitetsnivåer i den mottagna signalen. Men retromodulatorens begränsar, som tidigare beskrivits, vilka modulationsmetoder som i praktiken går att använda. Intensitetsmodulation i kombination med kvantbrunnsmodulatorer medger höga modulationshastigheter och är därför det intressantaste alternativet idag, trots känsligheten mot intensitetsfädningen. Andra tekniker för att hantera fädningen kan därmed behövas.

Uppskattningar av prestanda som är möjligt att uppnå idag och i framtiden med olika modulatorer anges i Tabell 2.

**Tabell 2: Olika typer av retromodulatorer och lämpliga modulationsmetoder.**

<b>TYP AV RETROMODULATOR</b>	<b>MODULATIONS-METOD</b>	<b>MODULATIONS-HASTIGHETER (MÖJLIGT IDAG)</b>	<b>KOMMENTAR</b>
Vätskekristallcell (FLC)	Polarisation	~ 100 kHz	~ 1 MHz möjligen övre gräns?
Kvantbrunnsstruktur (MQW)	Intensitet	~ 20 MHz	Betydligt högre hastigheter möjliga (~ GHz) med fokalplansteknik
Mekaniskt rörlig spegel	Intensitet	~ 10 kHz	Högre hastigheter möjliga med mindre speglar
Spegel / FLC	Fas	Ej implementerad	Ej implementerad

### 4.2.2 Optimal detektion

Optimal detektion<sup>4</sup> vid binär ”on-off keying” och direktdetektion presenteras i [14]. Om mottagaren kan antas ha kunskap om fädningens marginaldistribution men varken vet hur kraftigt fädningen är korrelerad i tiden (den s.k. temporala fädningskorrelationen, som anger hur snabbt eller långsamt signalstyrkan varierar pga fädningen) eller den momentana fädningen, är symbol-för-symbol maximum-likelihood (ML) detektorn optimal [14]. Symbol-för-symbol baserad ML-detektion kan implementeras genom enkel tröskling, där tröskelvärde beror bl.a. av fädningens egenskaper och brusnivån [14]. Enbart genom att beräkna tröskelvärde på ett förbättrat sätt kan alltså prestanda för systemet förbättras till viss del.

Om mottagaren däremot känner till den temporala fädningskorrelationen kan istället maximum-likelihood sequence detection (MLSD) ge ett bättre resultat. MLSD detektionen har en hög beräkningskomplexitet men i [16] föreslås två approximativa detektionsmetoder med betydligt lägre komplexitet.

### 4.2.3 Pilotsymbol-assisterad modulation

Pilotsymbol-assisterad modulation (PSAM) används i en del radiosystem för att minska effekterna av fädning i situationer då momentan kanalinformation inte är tillgänglig i mottagaren. I [17] beskrivs hur pilotsymbol-assisterad modulation kan genomföras i intensitetsmodulerade retrokommunikationssystem som använder ”on-off keying” och direktdetektion. Där sänds kända pilotsymboler med regelbundna intervall och de används för att i mottagaren estimeras fädningens korrelation i tiden. Genom PSAM kan en optimal maximum-likelihood (ML) detektor tas fram som är mer robust i kanaler där fädningen är korrelerad i tiden. En mindre komplex detektionsregel föreslås också i [17] som beräknar en variabel tröskelnivå utifrån de mottagna pilotsymbolerna. PSAM kan alltså ge en robust detektor, med lägre bitfelssannolikhet, i situationer då mottagaren har information om hur fädningen är korrelerad i tiden (mellan pilotsymbolerna), men då den momentana kanalinformationen inte är tillgänglig. Om kanalen förändras betydligt mellan två på varandra följande pilotsymboler försämras prestanda vid PSAM. Om kanalerna är helt kända i mottagaren (dvs momentan kanalinformation är tillgänglig, t.ex. genom kanalestimering) är däremot symbol-för-symbol ML detektorn optimal [17]. Då kan även adaptiv modulation och kodning genomföras effektivt.

### 4.2.4 Flernivåmodulation

Genom att använda flera s.k. modulationsnivåer kan mängden information som kan sändas ökas utan att retromodulatorens behov av snabbare (modulationshastigheten kallas ibland för retromodulatorns bandbredd). Anta att vi använder en retromodulator som kan förändra sin modulerande egenskap (t.ex. att polarisationen eller reflektionskoefficient förändras) en miljon gånger per sekund (1 MHz). Då kan laserstrålen moduleras med en miljon symboler per sekund. För ett

---

<sup>4</sup> I radiosammanhang används ofta benämningen detektor (istället för detektion) för den del av radion där beslutet tas om vilken symbol som sändes ut. I den här rapporten menar vi dock med detektor istället fotodetektorn, vilket är vanligt i optisk kommunikationslitteratur.

system, utan felrättande kodning, som använder sig av binär signalering blir datatakten då 1Mbit/s. Ett klassiskt sätt att öka kapaciteten i radiosystem är att använda flernivåmodulation så att varje utsänd symbol istället innehåller fler informationsbitar [4]. Genom att använda fyra modulationsnivåer istället för två som vid binär "on-off keying" (jämför t.ex. BPSK mot QPSK) fördubblas kapaciteten över länken. Nackdelen med flernivåmodulation är att felsannolikheten kan öka eftersom detektorns beslutsintervall minskar. Om felsannolikheten vid införandet av flernivåmodulation blir för hög kan den reduceras genom att applicera en kraftigare felrättande kod för den extrakapacitet som erhålls genom att övergå till fler modulationsnivåer [5]. I situationer med ett högt SNR är normalt den resulterande felhalten fortfarande acceptabelt låg och flernivåmodulation är därför intressant.

Vid "on-off keying" och intensitetsmodulation används två nivåer, och mottagaren detekterar en "nolla" om den mottagna signalenergin är under en tröskelnivå och den detekterar en "etta" om signalenergin överstiger tröskelvärdet. Vid intensitetsmodulation genomförs detta i retromodulatorens genom att olika spänningar läggs på retromodulatorens som gör att antingen mycket eller väldigt lite av laserstrålen reflekteras tillbaka i riktning mot mottagaren. Det som begränsar den möjliga datatakten är hur snabbt reflektansen i retromodulatorens hinner förändras då spänningen ändras. Om det istället är möjligt att använda fler intensitetsnivåer, dvs att reflektansen kan förändras i flera steg genom att olika spänningsnivåer läggs på utan att reflektansförändringen sker långsammare, kan informationsdatatakten ökas.

I en vätskekristallbaserad retromodulator kan det vara svårare att införa flernivåmodulation. De hittills undersökta vätskekristallcellerna arbetar kring två stabila polarisationslägen. Det finns dock andra typer av vätskekristallmodulatorer som kan ge fler än två stabila polarisationslägen men de har idag en lägre modulationshastighet.

Signalfädning som orsakas av turbulens i atmosfären kan vara ett än större problem om fler modulationsnivåer ska användas vid intensitetsmodulation. Turbulens kan orsaka snabba variationer i den mottagna signalenergin och om multipla modulationsnivåer ska användas behöver mottagaren kontinuerligt estimeras den mottagna medeleffekten för att sedan kunna adaptera detektortrösklarna så att rätt bitbeslut tas. Adaptiva detektortrösklar kan även implementeras genom att med jämna mellanrum, tillräckligt ofta för att kunna följa kanalens förändringar, sända tränings signaler med kända symboler (intensitetsnivåer).

#### *4.2.5 Parallella modulationstyper*

Ett ytterligare sätt att öka kapaciteten kan vara att införa flera olika modulationer och t.ex. lägga information både i signalens polarisation och också i dess totala intensitet. Det kan i teorin genomföras genom att kombinera en vätskekristallmodulator med en kvantbrunnsmodulator. Då kan parallella meddelanden sändas med de olika modulationsmetoderna. Den extra kapacitet som idag kan uppnås genom att även använda polarisationsmodulation utöver intensitetsmodulation är dock liten och motiverar troligen inte den ökade komplexiteten i retromodulatorens.

Våglängdsmultiplexering, där olika meddelanden sänds på olika våglängder, har dock potentialen att kraftigt öka kapaciteten, till priset av en ökad hårdvarukomplexitet.

#### 4.4 Felrättande kodning i kombination med interleaving

Felrättande kodning är ett sätt att förbättra bitfelshalten i mottagaren genom att lägga till redundanta bitar. De redundanta bitarna används sedan till att säkrare avgöra vilka databitar som sändes [4]. Kodning, tillsammans med interleaving, är ett effektivt sätt att minska fädningens negativa effekter. Fädningens statistik är en viktig faktor som avgör hur lång interleaver som ska användas. Genom att använda mjuk information, i de fall den finns tillgänglig, kan prestanda förbättras ytterligare. Mjuk information innebär t.ex. att varje detekterad bit även har ett tillhörande sannolikhetsmått som anger hur tillförlitligt beslutet var.

Det finns oerhört många olika typer av koder. Valet av kod och dess kodtakt (kodtakten anger hur stor andel redundanta bitar som sänds och med en kodtakt på t.ex. 0.7 är 70 % av bitarna som sänds extra bitar) avgörs av kanalens utseende, bla om felet uppstår i skurar, hur långa dessa är, osv. Blockkoder ger i många fall tillräcklig felrättningsförmåga och de är intressanta då de har en relativt låg komplexitet. Under svåra förhållanden eller på långa avstånd där signal-till-brusförhållandet (SNR) är lågt kan sannolikt s.k. turbokoder ge en förbättrad prestanda, till priset av en ökad beräkningskomplexitet i avkodaren.

I [1] undersöktes prestanda för en annan typ av felrättande koder, nämligen s.k. "low-density parity-check (LDPC)" koder, i ett intensitetsmodulerat system med binär "on-off keying". Kodningsvinsten för LDPC-koden var, beroende på hur kraftig turbulensen var, mellan 5 och 15 dB jämfört med Reed-Solomon faltningkoder som hade motsvarande kodtakt och längd. Prestandagränser ges i [13] för olika typer av felrättande koder i intensitetsmodulerade direktdetektionssystem, under antagandet av svag turbulens. Approximativa övre gränser för bitfelshalten vid användning av faltningkoder, blockkoder och turbokoder tas fram, och lämpliga interleaverlängder undersöks också.

#### 4.5 Adaptivitet

Genom att anpassa modulationen och kodningen till de rådande kanalförhållandena kan systemets kapacitet och robusthet förbättras väsentligt. Adaptiv modulation och kodning är en teknik som används i de flesta moderna radiosystemen [5]. Hur stora förbättringar som kan uppnås vid länkadaptivitet avgörs av

- hur kanalen varierar,
- hur väl kanalen kan estimeras,
- hur stor flexibilitet finns i adaptationen av t.ex. modulationsnivå och kodtakt.

Idag används normalt en fix datatakt i de experimentella retrokommunikations-systemen. Den högsta datatakten begränsas normalt av retromodulatorens, men lägre datatakt kan givetvis användas. Kanalens SNR kan variera snabbt pga fädning som

orsakas av turbulens, samtidigt som en långsammare variation kan orsakas av förändringar i atmosfärsdämpningen (som bl.a. är väderberoende) eller avståndsförändringar som orsakas av förflyttningar.

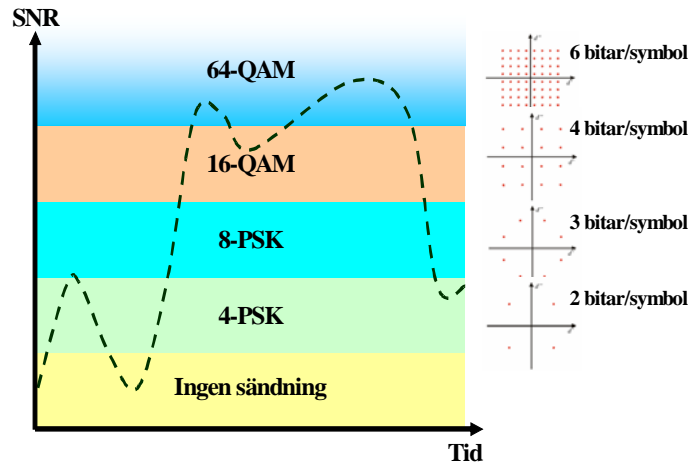
Kanalens SNR kan estimeras i retromodulatorenheten genom att ha en separat detektor som känner av laserns intensitet och därefter kan även SNR i sändtagarens detektor relativt enkelt beräknas. Om SNR för den mottagna signalen i detektorn kan estimeras med tillräcklig noggrannhet kan modulationstakten anpassas till SNR, t.ex. genom att låta bli att sända då kanalen är riktigt dålig eller genom att sända långsammare (vilket ökar nyttsignalens energi i mottagaren och därmed även SNR). Alternativt så kan kodtyp och kodtakt adapteras så att en kraftigare kod används då kanalen är dålig och en svagare kod då kanalen är bra. Oftast tillåts systemet adaptera mellan ett begränsat antal fördefinierade modulations- och kodningsmoder, vilket förenklar adaptationen [15]. Olika adaptationskriterier estimeras kontinuerligt, t.ex. SNR och olika fädningsparametrar, och prestanda för de olika moderna har då undersökts i förväg och den mod som ger högst kapacitet samtidigt som felsannolikheten ligger på en acceptabel nivå används sedan.

För att åstadkomma en lyckad länkadaptation behöver följande delar utföras kontinuerligt i retrokommunikationslänken:

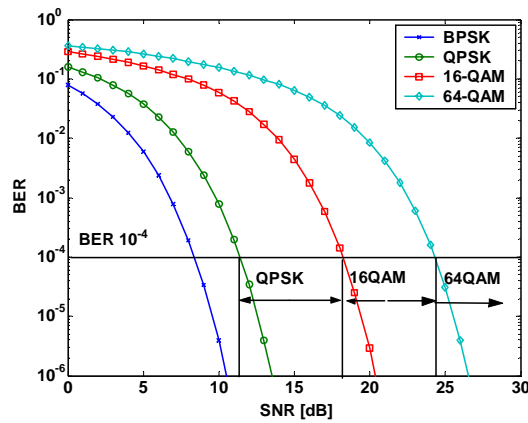
- I retromodulatorens behöver kanalförhållandena, t.ex. SNR, estimeras.
- Modulation och felrättande kod väljs så att en hög kapacitet erhålls samtidigt som kvaliteten på meddelandet är tillräcklig (dvs bitfelshalten är tillräckligt låg).
- Mottagaren behöver slutligen få information om vilken datatakt, modulationsnivå, kodtyp och kodtakt som sändaren (retromodulatorens) kommer att använda. Om endast ett fåtal specificerade modulations- och kodningsmoder är tillåtna räcker det givetvis att sända information om vilken mod som används. Data kan sändas i paket och då kan informationen ligga i pakethuvudet, eller så sänds med jämna intervall information om vilken datatakt och kod som används under det kommande intervallet.
- Kontinuerlig utvärdering av hur väl adaptationen fungerar, och speciellt kontrollera att bitfelshalten befinner sig på en acceptabel nivå. Det är inte säkert att alla typer av kanaler ger samma bitfelshalt för ett specifikt SNR (eftersom t.ex. fädningsstatistiken påverkar detta) och en extra SNR-marginal behövs därför, och storleken på marginalen kan justeras vid utvärderingen.

Principen för ett enkelt adaptivt modulationssystem som kan användas i radiosystem visas i figur 7. I olika SNR-regioner ger olika modulationer högst kapacitet (antal bitar per symbol) samtidigt som ett givet krav på maximal bitfelshalt inte överskrids [15], vilket illustreras i figur 8.

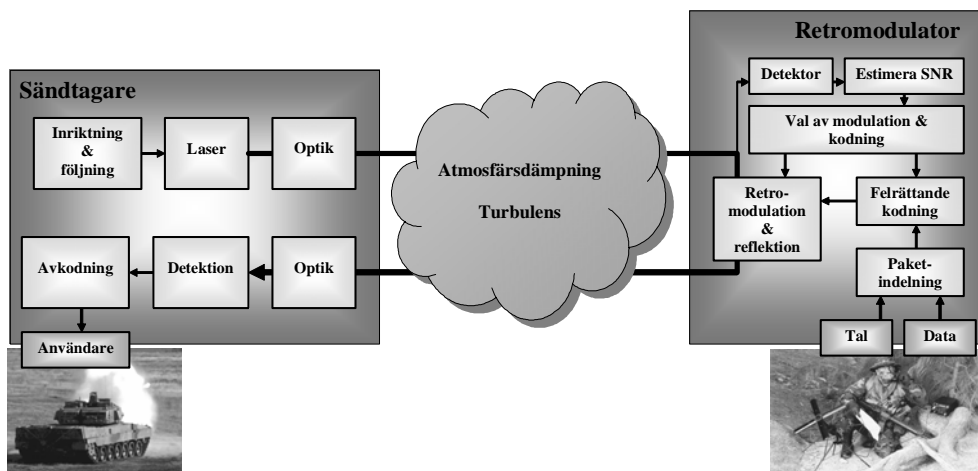
I ett retrokommunikationssystem bör det vara möjligt att implementera ett liknande system. Först behöver då bitfelshalten för olika modulations- och kodningsmoder beräknas som en funktion av SNR. Tjänsten ger därefter vilket krav på maximal bitfelshalt som behöver uppfyllas, t.ex. så bör den vara lägre än  $10^{-3}$  vid talöverföring medan den vid överföring av krypterat data eventuellt måste vara lägre än ca  $10^{-6}$ .



Figur 7: Principen för en enkel metod som kan användas till att utföra adaptiv modulation i ett radiosystem [15]. De olika modulationsmetoderna används i olika SNR-regioner. I förväg beräknas SNR-trösklar över vilka bitfelshalten för de olika modulationerna är lägre än det specificerade värdet.



Figur 8: Exempel på hur SNR-trösklarna kan beräknas ut vid adaptiv modulation i radiosystem. Först beräknas bitfelshalten ut för de olika modulationsformerna, här antas en AWGN-kanal (dvs vitt Gaussiskt brus). Därefter sätts kravet på bitfelshalt som måste uppfyllas och SNR-trösklarna kan därmed bestämmas.



Figur 9: Schematisk bild av ett möjligt adaptivt retrokommunikationssystem. I retromodulatorens SNR estimeras och modulationen och kodningen väljs utifrån detta.



#### 4.5.1 Diskussion om adaptiva tekniker

Adaptiv modulation och kodning kan ge stora vinster, speciellt om SNR varierar inom ett relativt begränsat område. Vid ett högt SNR är idealet att ett stort antal bitar ska kunna sändas i varje symbol genom flernivåmodulation. Då kan riktigt höga kapaciteter uppnås, på kortare avstånd under goda kanalförhållanden. Antalet bitar som maximalt kan sändas i varje symbol begränsas sannolikt av retromodulatorns egenskaper. Var begränsningen ligger för dessa är ännu inte känt utan behöver undersökas närmare. Turbulensen är även en begränsande faktor vid längre avstånd.

Vid sämre väderförhållanden blir istället atmosfärsdämpningen sannolikt begränsande för systemet. Vid stark atmosfärsdämpning kan istället en kraftig kod appliceras, med t.ex. 99% redundanta bitar, vilket tillsammans med binär modulation ger en betydligt lägre bitfelshalt men med en kraftigt reducerad kapacitet. Kapacitet byts då mot räckvidd för systemet. Däremot så kan ett sådant adaptivt system inte förväntas bibehålla kommunikationen över långa avstånd om atmosfärsdämpningen varierar med hundratals dB. Ett retrokommunikationssystem som är tänkt att användas i taktiska tillämpningar kommer med största sannolikhet att utsättas för en kanal där signalstyrkan varierar inom ett stort dynamiskt område.

Vid varje förändring av modulation och kodning behöver (i de flesta fall) mottagaren informeras om detta, och det innebär att adaptationen inte bör genomföras alltför ofta. Om kanalen uppvisar stora variationer över den tid det tar att sända några hundra symboler används troligen ett system med ett fåtal modulations- och kodningsmoder. Det ger en något försämrad kapacitet men ett robustare system eftersom färre adaptationer görs. Om kanalen pga turbulens varierar snabbare än så bör istället den felrättande kodningen användas för att hantera dessa snabba variationer. Adaptionen anpassas då istället till att följa den långsammare förändringen som orsakas av den varierande atmosfärsdämpningen.

De mätningar som hittills genomförts indikerar att kanalvariationerna ligger i storleksordningen kHz, men de är i huvudsak baserade på stationära mätningar. Fädningsfrekvensen, dvs antalet fädningsdippar per sekund, bör öka i mobila tillämpningar. Med kvantbrunnsmodulatorens kan idag modulationshastigheter på tiotals MHz uppnås vilket innebär att åtminstone hundratals symboler kan skickas mellan de olika fädningsdipparna. Fädningsfrekvensen behöver undersökas närmare för typiska taktiska tillämpningar.

En avvägning mellan modulationsmetod och kodning behöver dessutom göras i systemet. I en färdande kanal kan symboltakten minskas i syfte att åstadkomma ett förbättrat SNR i detektor. Anta att vi fördubblar symboltiden, vilket antingen kan utföras genom att minska modulationshastigheten eller genom att sända samma symbol två gånger direkt efter varandra. Om kanalen färdar oberoende för varje symbol är sannolikheten stor att någon av symbolerna har ett högt SNR, och vi kan uppnå relativt stora vinster i SNR. Ett mer realistiskt antagande är dock att fädningsdipparna är flera symboler långa och då kommer SNR att förbättras något men ingen diversitetsvinst uppnås. Om symboltiden däremot bibehålls och en felrättande kod med kodtakten  $\frac{1}{2}$  (tillsammans med en interleaver) istället appliceras kan en lägre felsannolikhet uppnås med en motsvarande informationsdatatak.

## 5 Sammanfattande diskussion

Flera olika metoder har presenterats som har potentialen att förbättra kapaciteten och minska felsannolikheten i framtida retrokommunikationssystem, och de sammanfattas i tabell 3.

Med kvantbrunnsmodulatorer kan i många tillämpningar modulationshastigheter på över 10 MHz uppnås, vilket med enkel binär ”on-off keying” ger en datatakt över 10 Mbps. Genom att övergå till flernivåmodulation kan en stor ökning av kapaciteten erhållas, men felsannolikheten ökar ju fler modulationsnivåer som används.

Felrättande kodning i kombination med interleaving ger en minskad felsannolikhet, vilket kan vara viktigt vid kraftig turbulens och på långa avstånd. Felrättande kodning innebär dock att redundanta bitar sänds vilket leder till att färre informationsbitar kan sändas i system där endast en modulationsnivå används.

Adaptiv modulation och kodning är en teknik som kan implementeras i ett retrokommunikationssystem, eftersom retromodulatorens kontinuerligt kan estimeras kanalförhållandena genom att känna av intensiteten hos laserstrålen. Det innebär att modulationsnivån och kodtaket väljs så att högsta möjliga kapacitet erhålls samtidigt som felsannolikheten understiger ett angivet riktvärde. Adaptivitet förväntas ge en förbättrad kapacitet och robusthet vid turbulens och även en ökad räckvidd och tillgänglighet vid kraftiga förändringar av atmosfärsdämpningen.

Den prestandavinst som kan uppnås genom att applicera de föreslagna teknikerna avgörs till stor del av hur kanalen påverkar signalen. Den kunskap som finns idag om hur en retrokommunikationslänk påverkas av kanalen är inte tillräcklig för att möjliggöra tillförlitliga värderingar av teknikerna. Kanalmätningar har genomförts på flera håll i världen, bl.a. på FOI med stationära sändare och mottagare, och de har visat på olika effekter som en laserstråle påverkas av, t.ex. den starkt väderberoende atmosfärsdämpningen samt den turbulensinducerade fädningen. Däremot saknas fortfarande kunskap om hur kanalen varierar i typiska mobila tillämpningar. Exempel på frågor som behöver besvaras för att möjliggöra förbättrade värderingar av olika teknikernas användbarhet ges i tabell 4. Den taktiska tillämpningen påverkar starkt hur kanalen ser ut, den påverkar bl.a. avståndet som systemet ska operera på (större avstånd ger svårare turbulens), mobiliteten hos sändare och mottagare (påverkar fädningens egenskaper), miljön (marknära kommunikation i urban miljö ökar turbulensen jämfört med t.ex. kommunikation mellan stridsfordon och UAV), osv.

Ett retrokommunikationssystemets prestanda kan givetvis även förbättras genom att förbättra hårdvarudelarna i systemet. Pågående forskning och utveckling som sker runt om i världen förväntas ge kvantbrunnsbaserade retromodulatorer med högre modulationshastigheter (vilket medger en ökad kapacitet) och förbättrade kontrastvärden (vilket minskar felsannolikheten). Hur snabba dessa kan göras är idagslaget oklart.

**Tabell 3: Beskrivning av effekterna för olika tekniker som kan öka kapaciteten och reducera bitfelshalten för retrokommunikationssystem.**

<b>TEKNIK</b>	<b>EFFEKT: KAPACITET</b>	<b>EFFEKT: FEL-SANNOLIKHET</b>	<b>KOMMENTARER</b>
<b>Modulationsmetod (amplitud, fas, frekvens, polarisation)</b>	Ingen, kapaciteten avgörs av retromodulatorns hastighet (symboltiden)	Bitfelshalten för modulationsmetoderna beror på hur kanalen varierar	Valet av modulationsmetod begränsas av vilken typ av retromodulator som används
<b>Flernivåmodulation (sänd fler bitar per symbol)</b>	Potential till stor förbättring	Bitfelssannolikheten ökar något pga mindre beslutsintervall	Kan ej implementeras för alla typer av modulation och retromodulator
<b>Felrättande kodning och interleaving</b>	Minskar beroende på kodtakt	Väsentligt reducerad bitfelshalt	Typ av kod, kodtakt och interleaverlängd designas utifrån kanalens egenskaper
<b>Rumsdiversitet</b>	Ingen direkt, ökad kapacitet kan fås i kombination med adaptivitet	Kan ge betydande vinster vid kraftig fädning	Troligen störst vinst vid sändningsdiversitet, vilket kräver fler retromodulatorer
<b>Adaptiv modulation och kodning</b>	Potential till väsentlig förbättring	Minskar	Anpassar modulation och kodning till rådande kanalförhållanden, tillförlitlig kanalestimering krävs
<b>Optimal detektion</b>	Oförändrad	Minskar något	Anpassa detektionströsklarna till tillgänglig kunskap, ökad beräkningskomplexitet

Fokalplanstekniken kan förhoppningsvis medge att mindre retromodulatorer kan användas, även i taktiska tillämpningar, vilket i sådana fall kan leda till att kapaciteten kan ökas med i storleksordningen 10-100 gånger.

Förbättrade lasrar med högre uteffekter och smalare stråldivergenser kan ge vissa förbättringar.

Avancerade laserinriktningssystem kommer förhoppningsvis relativt snart att medge att laserkommunikation kan genomföras effektivt även mot plattformar med hög mobilitet. Icke-mekanisk strålstyrningen är ett forskningsområde som på längre sikt förväntas ge mindre och smidigare sändarsystem och en snabbare, flexiblare och effektivare inriktning av laserstrålen mot mobila plattformar.

Våglängdsmultiplexing används vid fiberkommunikation och kan möjligen även implementeras i retrokommunikationssystem. Systemen kräver dock mer hårdvara och blir mer komplexa.

**Tabell 4: Kunskap saknas delvis om kanalens påverkan på retrokommunikationslänken i typiska taktiska tillämpningar.**

<b>FÖRESLAGEN TEKNIK</b>	<b>KANALKUNSKAP SOM DELVIS SAKNAS FÖR TYPISKA TAKTISKA TILLÄMPNINGAR</b>
<b>Modulationsmetod (amplitud, fas, frekvens, polarisation)</b>	Hur påverkar kanalen (t.ex. fädningen) den mottagna signalens amplitud, fas, frekvens och polarisation?
<b>Flernivåmodulation (sänd fler bitar/symbol)</b>	Hur stora skillnader i SNR kan förväntas? Vilket är det högsta SNR som kan förväntas?
<b>Felrättande kodning och interleaving</b>	Hur långa är fädningsdipparna? Hur mycket reduceras SNR i en fädningsdipp? Hur ofta förekommer fädningsdippar?
<b>Rumsdiversitet</b>	Hur stora avstånd behövs för att den mottagna signalen från två spatiellt åtskilda retromodulatorer ska ha en låg korrelation? Är spridningen i mottagaren (från retromodulatorn) tillräcklig för att möjliggöra diversitetsvinster i mottagaren? Hur långa är fädningsdipparna och hur mycket reduceras SNR i dessa?
<b>Adaptiv modulation och kodning</b>	Hur snabbt varierar kanalen, både pga fädning och den väderberoende atmosfärsdämpningen? Hur stora skillnader i SNR kan förväntas under en kortare tidsperiod, typ på sekundnivå?

## 6 Rekommendation

En förbättrad kanalkunskap medger noggrannare analyser (teoretiska och genom simuleringar) av hur de olika teknikerna kan påverka systemets prestanda. Förbättrade kanalmodeller, gärna med spatiella (rumsliga) egenskaper för analyser av rumsdiversitetssystem, är därmed av stort intresse.

Felrättande kodning och interleaving förväntas kunna minska bitfelssannolikheten (och därmed även räckvidden), och det kan implementeras utan att hårdvaran behöver modifieras. Därför är felrättande kodning den teknik som först bör implementeras och undersökas i de experimentsystem som finns på FOI.

Flernivåmodulation kan ge stora kapacitetsvinster vid höga SNR, men begränsningar i retromodulatorerna kan medföra att det är något komplicerat att införa flernivåmodulation. Experiment bör genomföras för att undersöka om kvantbrunnsmodulaton, genom att olika spänningar läggs på, kan ändra sin reflektivitet stegvis. Nyckeln är om stabila reflektivitetsnivåer kan uppnås, dvs om en viss spänning läggs på ska alltid samma reflektivitet erhållas.

Adaptiv modulation och kodning ger ett flexibelt system som ger hög kapacitet under goda förhållanden och som sedan kan anpassa kapaciteten och felrättningsförmågan då kanalförhållandena ändras. Det bör vara möjligt att estimeras SNR i retromodulaton genom att använda en extra detektor, och då har systemet färsk kanalinformation vilket vid adaptivitet är mycket fördelaktigt. Kapacitetsvinsterna med adaptiv modulation är något osäkra eftersom det förutsätter användandet av flernivåmodulation. Kodtakten för den felrättande koden, och därmed även kapaciteten, kan dock enkelt anpassas efter rådande kanalförhållanden. För att möjliggöra adaptivitet behöver olika modulations- och kodkombinationer undersökas närmare, dvs hur bitfelshalten varierar med SNR över typiska kanaler.

Rumsdiversitet kan troligen i vissa fall ge stora vinster i färdande kanaler, men det kräver större modifikationer av hårdvaran än de andra föreslagna teknikerna.

Sammanfattningsvis rekommenderas därför att följande punkter genomförs

- Genomför kanalmätningar för militärt intressanta (mobila) typtillämpningar.
- Implementera felrättande koder och undersök deras prestanda.
- Undersök genom experiment om flernivåmodulation är möjlig, i första hand för kvantbrunnsmodulaton.
- Implementera adaptiv modulation och kodning och undersök vilken prestanda som uppnås.

## Referenser

- [1] J.A. Anguita, I.B. Djordjevic, M.A. Neifeld, och B.V. Vasic, "Shannon capacities and error-correction codes for optical atmospheric turbulent channels", *The Journal of Optical Networking*, Vol. 4, Nr. 9, sid. 586-601, Maj 2005.
- [2] N.G. Creamer, *et al*, "Interspacecraft optical communication and navigation using modulating retroreflectors", *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 27, Nr. 1, sid. 100-106, Januari-Februari 2004.
- [3] V.S. Hsu, J.M. Kahn och K.S.J. Pister, *Wireless communications for smart dust*, Electronics Research Laboratory Technical Memorandum Number M98/2, UC Berkeley, February 1998.
- [4] J.G. Proakis och M. Salehi, *Communication Systems Engineering*, Prentice Hall Inc., NJ, USA, 1994.
- [5] J. Rantakokko, S. Linder, K. Wiklundh, K. Fors, L. Pääjärvi och H. Tullberg, *Adaptiva tekniker för taktiska kommunikationssystem*, Teknisk rapport, FOI-R--1340--SE, September 2004.
- [6] M. Razavi och J.H. Shapiro, "Wireless optical communications via diversity reception and optical preamplification", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 4, Nr. 3, Maj 2005.
- [7] P. Sakari, M. Pettersson och J. Öhgren, *Retrokommunikation i stadsmiljö*, Teknisk rapport, FOI-R--1466--SE, December 2004.
- [8] P. Sakari och M. Pettersson, *Optical communication in urban areas, focus on non line-of-sight optical communication*, Teknisk rapport, FOI-R--0944--SE, September 2003.
- [9] T.M. Shay *et al*, "The first experimental demonstration of full-duplex communications on a single laser beam", *Proceedings of SPIE*, Vol. 5160, sid. 265-271, Augusti 2003.
- [10] L. Sjöqvist, E. Hällstig, J. Öhgren och L. Allard, *Retrocommunication - final report*, Användarrapport, FOI-R--1220--SE, Mars 2004.
- [11] L. Sjöqvist, F. Kullander, M. Lindgren och O. Steinvall, *Optisk kommunikation i undervattenstillämpningar*, Användarrapport, FOI-R--0111--SE, Mars 2001.
- [12] Å. Waern, P. Johansson och M. Pettersson, *Kommunikation vid urban krigföring - radio och laser*, Metodrapport, FOI-R--1279--SE, Juni 2004.

- [13] X. Zhu och J.M. Kahn, "Performance bounds for coded free-space optical communications through atmospheric turbulence channels", *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 51, Nr. 8, sid. 1233-1239, Augusti 2003.
- [14] X. Zhu och J.M. Kahn, "Free-space optical communications through atmospheric turbulence channels", *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 50, Nr. 8, sid. 1293-1300, Augusti 2002.
- [15] X. Zhu och J.M. Kahn, "Maximum-likelihood spatial-diversity reception on correlated turbulent free-space optical channels", *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2000)*, San Francisco, USA, November 2000.
- [16] X. Zhu och J.M. Kahn, "Markov chain model in maximum-likelihood sequence detection for free-space optical communication through atmospheric turbulence channels", *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 51, Nr. 3, sid. 509-516, Mars 2003.
- [17] X. Zhu och J.M. Kahn, "Pilot-symbol assisted modulation for correlated turbulent free-space optical channels", *Proceedings of SPIE International Symposium on Optical Science and Technology*, San Diego, USA, Juli-Augusti 2001.
- [18] X. Zhu och J.M. Kahn, "Mitigation of turbulence-induced scintillation noise in free-space optical links using temporal-domain detection techniques", *IEEE Photonics Letters*, Vol. 15, Nr. 4, sid. 623-625, April 2003.
- [19] J. Öhgren och C. Vahlberg, *Utveckling av nya vätskekristallmodulatorer - bestämning av optiska och elektriska egenskaper*, Teknisk rapport, FOI-R--1486--SE, December 2004.
- [20] [http://www.acreo.se/templates/Page\\_2216.aspx](http://www.acreo.se/templates/Page_2216.aspx)