

Fiberlaserteknik för undervattenssensorer

Fredrik Kullander



Fiberlaserteknik för undervattenssensorer

Fredrik Kullander

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Systemteknik 172 90 Stockholm	Rapportnummer, ISRN FOI-R--0726--SE	Klassificering Underlagsrapport
	Forskningsområde 4. Spaning och ledning	
	Månad, år November 2002	Projektnummer E6053
	Verksamhetsgren 5. Uppdragsfinansierad verksamhet	
	Delområde 43 Undervattenssensorer	
Författare/redaktör Fredrik Kullander	Projektledare Jörgen Pihl	
	Godkänd av Monica Dahlén	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning Försvarsmakten	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig Fredrik Kullander	
Rapportens titel Fiberlaserteknik för undervattenssensorer		
Sammanfattning Under året 2002 har fiberlasersensorer för hydroakustiska tillämpningar studerats. En seriell array med fyra fiberlasrar har testats avseende optiska prestanda. Ett utläsnings- och demoduleringssystem för fyra kanaler baserat på våglängdsdelningsmultiplexering och heterodyndemodulering konstruerades och utprovades, bland annat FM demodulatorer med integrerade fotomottagare. Akustiska gränssnitt för att förstärka ljudtryckets inverkan på fiberlasern har utvecklats. För att erhålla en förstärkningsfaktor utöver vad som typiskt är möjligt genom att mantla fibern med homogena plastmaterial studerades mekaniska gränssnitt. Det var möjligt att erhålla en tillräckligt hög förstärkning, uppåt 50 dB, för att nå akustisk detekterbarhet ned till havsbrusnivån SS0 ("Sea State Zero"). Lasrarnas frekvensbrus, som ytterst sätter gränsen för egenbruset, uppmättes i ett frekvensband från 20 Hz till 20 kHz. Frekvensbruset för fiberlasarna i den seriella arrayen var jämförbart med uppmätt brus från enskilda element med en nivå nära 10 Hz/√Hz vid 1 kHz. Överhörningen mellan fiberlaserkanalerna var låg med en uppmätt nivå nedåt -60 dB. Signalerna från fiberlaserarrayen hamnade ibland i ett ostabilt tillstånd av självsvängning med förstärkt intensitetsbrus kring frekvensen för lasrarnas relaxationsoscillationer. Detta kunde motverkas genom att stämma av pumplaserens drivström eller dess temperatur.		
Nyckelord hydrofon, fiberlaser, fiberoptisk sensor, fiberoptik, sensorteknik, hydroakustik, släpsonar		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor 27	
Distribution enligt missiv	Pris: enligt prislista	

Issuing organization FOI - Swedish Defence Research Agency Systems Technology SE-172 90 Stockholm Sweden	Report number, ISRN FOI-R--0726--SE	Report type Base Data Report
	Research area code 4. C4ISR	
	Month year November2002	Project number E6053
	Customers code 5. Commissioned Research	
	Sub area code 43 Underwater Sensors	
Author/s (editor/s) Fredrik Kullander	Project manager Jörgen Pihl	
	Approved by Monica Dahlén	
	Sponsoring agency Swedish Armed Forces	
	Scientifically and technically responsible Fredrik Kullander	
Report title (in translation) Fiber Laser Technology for Underwater Sensors		
Abstract Fiberlasersensors for hydroacoustic applications were studied during 2002. The optical performance of a serial array with four distributed feedback DFB fiberlasers along a single fiber was tested. An interrogation/demodulation system for four channels based on wavelength division multiplexing and heterodyne demodulation was constructed and evaluated. FM demodulators with integrated photodetectors were constructed. Acoustic interfaces to enhance the sensitivity of the fiberlasers were developed. In order to extend the acoustic amplification beyond what can be reached with homogeneous coatings, typically of plastic materials, mechanical interfaces were studied. It was found that mechanical constructions of limited size might provide sufficient gain (50 dB) to allow detection down to the sea state zero hydroacoustic level. The frequency noise of the fiberlasers, ultimately limiting the resolution of the sensors, was measured within a frequency band from 20 Hz to 20 kHz. The frequency noise in the serial array was found to be comparable to that of single fiber laser elements with a level approaching 10 Hz/$\sqrt{\text{Hz}}$ at 1 kHz. The crosstalk between the fiberlasers was found to be low with a measured level of about -60 dB. Occasionally, the fiberlaser array could turn into an unstable state with amplified intensity noise centered in frequency around the relaxation oscillation resonance of the lasers. This state could be counteracted by tuning the pump laser drive current or its temperature.		
Keywords hydrophone, fiber laser, fiber optic sensor, fiber optics, sensor technology, hydroacoustics, towed array sonar		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 27	
	Price acc. to pricelist	

Innehåll

Inledning	5
Inriktning av verksamhet	5
Systemutformning	5
Årets verksamhet	10
Teknikutveckling	10
Mätningar	15
Sammanvägt resultat	24
Slutsatser	25
Samarbetsplaner	25
Framtidsutsikter	26
Nästa år	26
I ett längre perspektiv	26
Tackord	26
Referenser	27

Inledning

Inriktning av verksamhet

Under året fokuserades fiberoptikverksamheten inom projektet Spaningssystem mot marina mål på fiberlasersensorer.

Vi har tidigare studerat fiberoptiska hydrofoner baserade på interferometrisk teknik och i princip utrett de tekniska problem som finns [1]. Med interferometrisk teknik är det gängse sättet att bygga hydrofoner att linda fiber kring en elastisk cylinder så att ljudet alstrar mekaniska töjningar i fibern. Cylinderdiametern begränsas av hur mycket fibern tål att böjas. Med specialfiber som tål mindre krökningsradie än vanlig fiber kan man nå nedåt 1 cm diameter. Hydrofonerna kräver även en del optiska komponenter, i regel bara enkla optiska kopplare, vilket gör slutlösningen mer komplex än om en array kan formas seriellt längs en enda fiber. Den här tekniken är väl beprövad i forsknings och utvecklingslaboratorier och har exploaterats vid såväl NRL i USA som vid QinetiQ i England. I nuläget är tekniken att betrakta som en industriell angelägenhet även om vi i Sverige troligen inte kommer att bygga sådana system.

Det finns dock fortfarande en del specialvarianter av interferometriska sensorer som skulle vara intressanta att studera vidare. Eftersom givarna i princip medger vilken geometrisk utformning som helst (bortsett från en mycket liten diameter) finns det möjlighet att hitta nya tillämpningar där sensorn kan göra en del av signalbehandlingsarbetet och därmed reducera behovet av datakraft för en given applikation. Hydrofonerna kan exempelvis göras konforma med skrov för att spatialfiltrera det akustiska närfältet, de kan göras mycket långa för att övervaka mycket stora områden. I princip är det möjligt att kaskadkoppla flera element efter varandra och analysera den sammansatta signalen. Samma princip kan naturligtvis användas för att skärpa sensorns strålningslob om så är önskvärt genom att öka den effektiva aperturen. Med detta vill vi säga att det finns vissa delar i den interferometrisk tekniken som är av intresse att arbeta vidare med. Men, mot bakgrund av bland annat de resurser som i nuläget står till förfogande har vi valt att fokusera på en sak.

Fiberlasersensorer till skillnad från fiberoptiska interferometriska sensorer [2-4] medger konstruktion av mycket kompakta givare där ett gränssnitt som gör fiberlasersensorn känslig för den storhet som skall mätas, monteras kring den optiska fibern. Fibern är mycket tunn, en kvarts millimeter, men ger inte av sig själv nödvändig känslighet exempelvis för hydroakustisk spaning. Sensorn i sitt slutliga utförande behöver inte mäta mer än ett par millimeter i diameter och ha en längd på ett par centimeter, beroende på vilka krav som ställs på givaren. En sensorarray kan anta formen av en tunn och

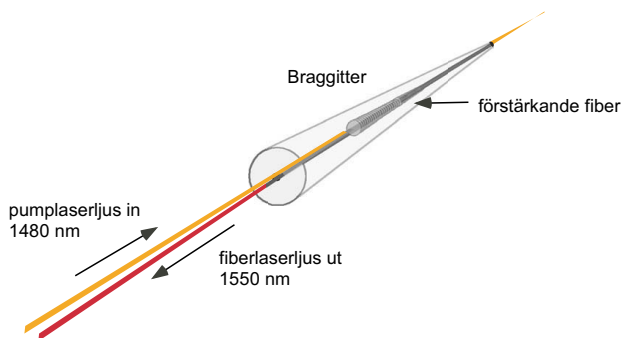
böjlig kabel som är enkel att hantera och på samma gång robust. Tekniken är däremot inte lika väl beprövad som interferometriska sensorer och det finns ett antal potentiella problem att reda ut. Studierna vi genomför ligger mycket väl i tiden och såväl NRL som QinetiQ har nyligen startat forskningsprogram med samma syfte; Att få fiberlaserhydrofonsystem i vatten!

Årets mål var

- Inköp av 4-kanals fiberlaserarray med kring-utrustning
- Inledande studie av brus och överhörning i array-konfiguration
- Anordna fiberlaserarray med all nödvändig hårdvara för akustiska mätningar
- Genomföra experimentella prov på optisk bänk för att
 - klargöra vilka problem som uppstår då fiberlasrar kaskadkopplas
 - mäta kanalöverhörning och bruskaraktäristik i 4-kanals fiberlaserarrayen
- Utveckla hydroakustisk interface för fiberlasersensorer
- Kapsla in två fiberlasrar med akustiska gränssnitt utvecklade förra året
 - Polymermantel innehållande mikrosfärer
 - Mekanisk anordning
- Mäta akustiskt i Linköping med fiberlaserhydrofonerna
- Mäta akustiskt i Ursviks tanklaboratorium med fiberlaserhydrofoner, frekvenskaraktärisera
- Tillverka nya givare baserat på mätresultat och beräkningsresultat, mäta i Ursviks tanklaboratorium
- Modellera olika sensorkonfigurationer, ta fram formalism för givarnas känslighetskaraktäristik
- Rapportera årets verksamhet.

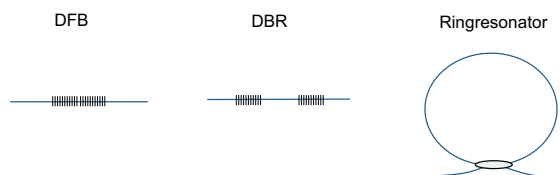
Systemutformning

De fiberlasrar som har visat sig ha störst potential för den här typen av tillämpning är så kallade DFB ("Distributed FeedBack") fiberlasrar, se figur 1. De består av en Erbiumdopad fiber i vilken ett så kallat Bragg-gitter inskrivits (i en fotorefraktiv process). Bragg-gittret är i princip en periodisk brytningsindexundulering längs med fibern där undulationsperioden avgör vilken våglängd som kommer att speglas i gittret. För att ljus skall alstras måste erbiumjonerna exciteras vilket sker med utnyttjande av en pumplaser. Då pumpljuset, i det här fallet med en våglängd på 1480 nm, passerar den erbiumdopade fibern absorberas en viss del av ljuset som då exciterar erbiumjonerna.



Figur 1. Principen för en DFB fiberlaser.

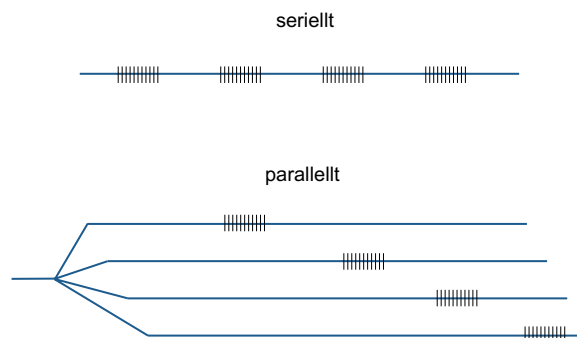
Lasringsprocessen börjar automatiskt genom emission av ljus kring 1550 nm i en specifik övergång. För att lasring i dess riktiga bemärkelse skall uppstå krävs att ljuset kan oscillera och underhållas genom stimulerad emission. Ljuset speglas fram och tillbaka i Bragg-gittret. Men för att detta skall vara möjligt krävs att gittret innefattar en liten diskontinuitet nära dess centrum, ett fasskift på $\pi/2$. I stället för att gittret kan betecknas som en enkel Bragg-reflektor kan den då ses som två näraliggande Bragg-reflektorer. Därmed finns en kavitet och lasringsprocessen blir möjlig. Fiberlasrar kan också utformas på andra sätt, exempelvis som DBR (Distributed Bragg Resonator) strukturer med två helt separerade gitter eller som ringresonatorer där två grenar i en fiberoptisk kopplare kopplas samman så att en loop sluts, se figur 2. Den senare kan vi direkt utesluta för de tillämpningar vi tänker oss här genom att den kräver en loop vilket genast för oss tillbaka till liknande fysiska begränsningar som för interferometrar. DBR lasrar strålar som regel inte i en enkel longitudinell mod. Visserligen är det möjligt att åstadkomma detta men ett kvarstående problem är att få en DBR laser att lysa i ett polarisationstillstånd. Detta är väsentligt i sensortillämpningen eftersom man annars inte kan undvika tvetydiga signaler.



Figur 2. Principiell utformning av olika fiberlasrar; DFB, DBR, ringresonator.

Valet faller därmed på DFB fiberlasern och särskilt de som lasrar i ett polarisationstillstånd. Lasrarna har typiskt en längd på 5 cm och kan ge uteffekter på uppåt 1 mW beroende på pumplaserseffekten. Lasring i ett polarisationstillstånd erhålls genom modifikation av Bragg-gittret så att det är mer effektivt i en orientering. Den mest utmärkande egenskapen för DFB fiberlasrarna är deras smala linjebredder, nedåt 1 kHz motsvarande ett oscillator Q-värde på 10^{12} vilket är mycket högt. Det är denna exakthet i laservåglängd som gör det möjligt att mäta de extremt små variationer som uppstår till följd av akustiska signaler. Den främsta leverantören i världen av den här typen av lasrar är det danska företaget Koheras A/S. De har fått stor uppmärksamhet för sina lasrar på internationella konferenser och deras produkter används i andra länders studier av fiberlasersensorer.

Det finns några olika alternativ till hur fiberlasersensorer kan konfigureras och avläsas rent optiskt. Vi har i vårt arbete utgått ifrån att flera fiberlasrar skall kaskadkopplas längs en och samma fiber. Detta för att fysiskt åstadkomma en linjearray. Nackdelen med kaskadkopplade fiberlasrar kan vara att de stör varandra eftersom ljuset måste passera igenom alla framförvarande fiberlaserelement. Dessutom kan pumpljuset koppla lasrarna i framåtriktning. I princip är det dock tänkbart att ordna fiberlasrarna i en parallell konfiguration där en fiber förgrenas i en kopplare som ansluter en fiber till varje separat fiberlaserelement, se figur 3.



Figur 3. Seriell och parallell koppling av fiberlasrar.

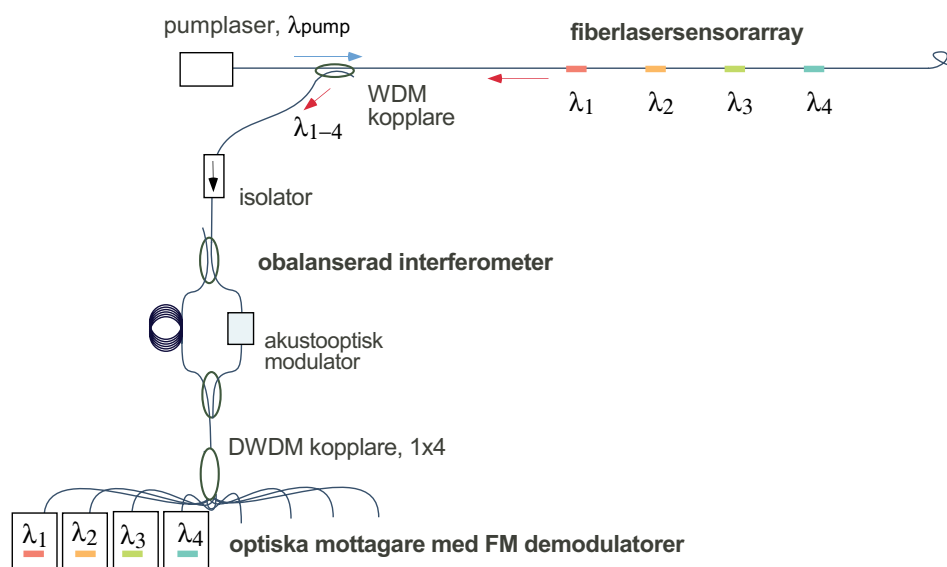
Fiberlasrarna kan i en sådan konfiguration betraktas som opåverkade av varandra. Det blir då flera fibrer som skall härbärgas i någon form av kabelbuss vilket möjligen kan leda till vissa praktiska problem. Emellertid är det inte självklart en dålig lösning ens för en kabel som kan betraktas som tunn. Det finns t ex standardkablar

att köpa med 8 mm:s diameter som rymmer inte mindre än 72 fibrer. Att ha bara en signalfiber är dock en bättre utgångspunkt om avsikten är att i slutänden göra en tunn, lätthanterlig och smidig kabel. Dessutom kan den optiska pumpeffekten nyttjas mycket effektivare [2]. Eftersom fiberlasrarna endast absorberar en bråkdel av pumpljuset, ca 2 %, räcker pumpeffekten för att försörja många kaskadkopplade lasrar. Däremot kommer en avsevärt högre pumplaserseffekt att krävas i en parallell konfiguration eftersom effekten fördelas ned.

Vi har valt att studera en seriell konfiguration och därmed inhandlat en fiber försedd med fyra kaskadkopplade lasrar. Fiberlasrarna lyser i fyra olika våglängder som anpassats till den internationella standarden för DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) kommunikationsnätverk, ITU ("International Telecommunication Union"). Genom denna anpassning kan standardkomponenter användas för att demultiplexera sensorkanalerna. Uttryckt i frekvens är avståndet mellan kanalerna 200 GHz (ca 1.6 nm) vilket motsvarar varannan ITU kanal som ligger separerade med 100 GHz. Vi har för våra prover införskaffat en DWDM kopplare för

8 kanaler med 200 GHz mellanrum. Våglängderna vi kan använda framgår av tabell 2 senare i dokumentet.

Den optiska konfiguration vi valt framgår av figur 4. För att demodulera signalerna som frekvensmoduleras på den optiska bärvågen måste en interferometer användas för att nå tillräckligt hög upplösning. Genom att använda olika våglängdskillnader i interferometern kan olika mycket förstärkning fås av den frekvens till fasomvandling som uppstår. Våglängdskillnaden kan därför anpassas så att fiberlaserbruset matchas mot systembrusnivån i övrigt så att maximal dynamik erhålles. Det finns flera olika sätt att demodulera interferometersignalen [1] som är fullt möjliga i det här fallet. Heterodyndemodulering som vi valt har fördelen av att den kan appliceras med flera simultana våglängder i interferometern. Aktiv återkoppling t ex kan bara låsa på en signal i taget och skulle därmed kräva en interferometer för varje givare. Eftersom interferometern kräver en del optiska komponenter och måste isoleras väl från omgivningen är det en stor fördel att bara behöva en för samtliga fiberlasrar. Därför krävs en passiv demoduleringsmetod. Passiv homodyn demodulering med



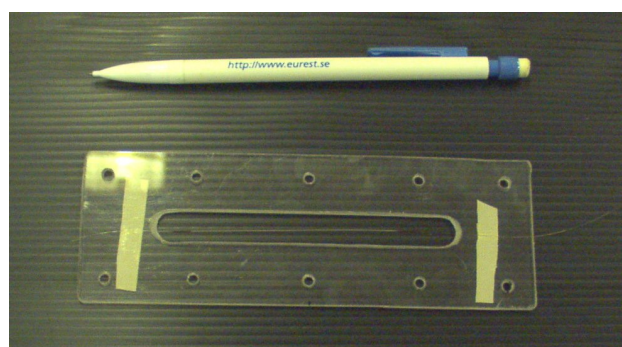
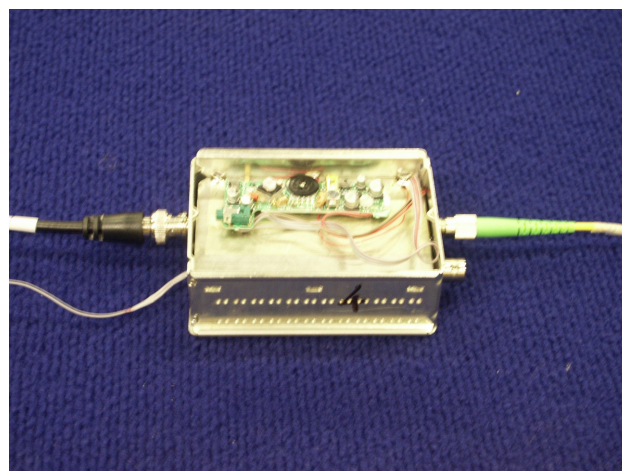
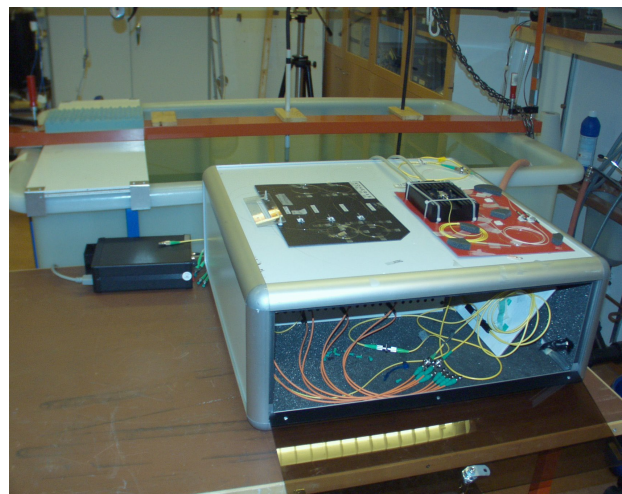
Figur 4. Optisk konfiguration. En pumplaser lyser ut mot fiberlaserarrayen via en så kallad WDM kopplare. Fiberlasrarna lyser då i olika våglängder med strålningen i huvudsak riktad bakåt. Ljusvåglängden moduleras då optiska våglängdsförändringar (töjningar eller brytningsindexändringar) uppstår i laserkaviteten. Den optiska våglängden kan bland annat moduleras av tryckvariationer. Ljuset från samtliga fiberlasrar länkas i WDM kopplaren ned till en obalanserad interferometer som i dess ena gren försetts med en akustooptisk modulator. En optisk isolator hindrar bakåreflexer från att nå fiberlasrarna som är känsliga för återkoppling av det egna utsända ljuset. Den akustooptiska modulaton förskjuter ljusets frekvens, i vårt fall med 100 MHz. Interferometern ger då en utsignal, i respektive våglängdsband som består av en fasmodulerad 100 MHz bärvåg. Fasmoduleringen är proportionell mot respektive fiberlasers optiska våglängds/frekvensvariationer. En så kallad DWDM kopplare används för att separera de optiska kanalerna. FM demodulatorerna ger ut signaler som är proportionella mot laserkavitetenas töjningars derivata. Enkel filtrering kan användas för att linjärisera signaler som är proportionella mot töjningar vilket kommer att gälla för hydroakustiska signaler.

3x3 kopplare, en teknik som vi studerat flitigt tidigare [5] är en tänkbar metod men den har nackdelen av att kräva tre utgångar vilket i det här fallet skulle kräva tre DWDM kopplare i stället för en i fallet med heterodyndemodulering. I heterodyndemoduleringen används en akustooptisk modulator för att frekvensskifta ljuset som går i den interferometergrenen. På interferometers utgång uppstår då en sinusformad bärvåg, motsvarande de akustooptiska frekvensskiftet, som är fasmodulerad av interferometersignalen. Hur konstigt det än låter så hamnar den initialt frekvensmodulerade signalen i slutänden som en fasmodulering med den skillnaden att frekvensmoduleringen sker kring den optiska bärvågen (100 THz) och fasmoduleringen kring RF bärvågen (100 MHz).

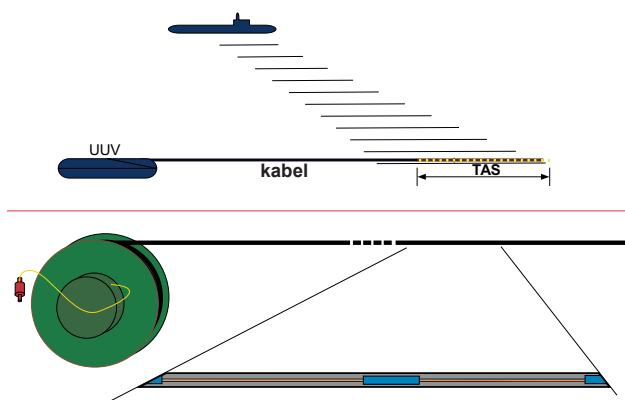
I figur 5 visas den aktuella mätuppställningen. För mätningarna användes datorljudhuvor för att ljudisolera såväl laserarrayen som interferometern. Vid bruskaraktäriseringarna låg fiberlaserarrayen fortfarande väl ordnad i den monteringen som den levererades i. Fiberlasrarna levereras med en så kallad recoating (återbelagt hölje) av akrylat som enda skydd. Fiberlasern monterad i ramen är den sista i serien lasrar efter att den monterats bort från leveransmonteringen. Överhörningsmätningarna genomfördes med den sista lasern hängande utanför medan de andra tre lasrarna fanns kvar i ljudhuvan.

Den fasmodulerade signalen måste slutligen detekteras och demoduleras. För fasdemodulering är naturligtvis ett flertal olika metoder användbara. Av flera skäl har vi valt att använda kommersiellt tillgängliga FM mottagare, faktiskt små "freestyle" FM radio apparater. De visar sig ha utmärkta prestanda för det här ändamålet, är billiga och små. Ett helt digitalt fasdemodulerings-schema kan eventuellt vara ett bra alternativ. Eftersom signalen ligger kodad som en fasmodulering krävs en efterföljande integrering av FM signalen för att erhålla slutsignalen. Ett potentiellt problem med att använda FM-demodulering för fasmodulerade signaler är att signalförstärkningen ökar med frekvensen. Dynamiken för låga frekvenser blir därför lägre än om en fasdemodulator används. Men eftersom det förväntade brusgolvet i den hydroakustiska miljön har $1/f$ karaktär så kan det vara bra att ha det förhållandet. En högre relativ känslighet kan då åstadkommas för de högre frekvenserna.

En del av de tillämpningsorienterade problemen som finns har vi varit inne på i en tidigare rapport [2]. Då liksom nu tänker vi oss fiberlaserarrayen monterad i en UUV (Unmanned Underwater Vehicle) och använd som en släpsonar, se figur 6.



Figur 5. Mätuppställning i laboratorium, FM demodulator med integrerad optisk mottagare, fiberlaserarray, en av fiberlasrarna (FLS#4) monterad i ram.



Figur 6. Fiberlasersensorbaserad släpsonar till UUV.

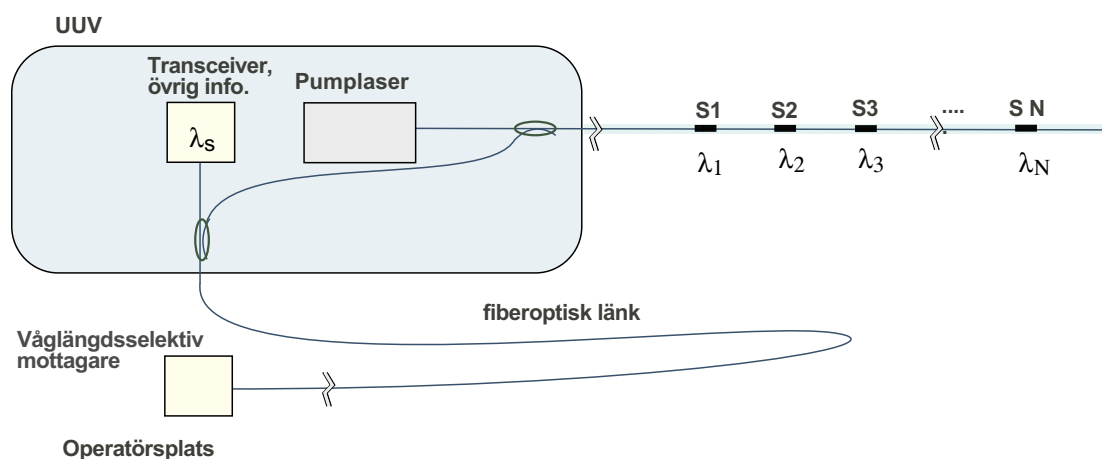
Troligen behöver den kunna hasplas in och ut i farkosten. Det krävs då ett litet hasplingssystem. Om sensorpartiet måste rullas upp behöver hela det partiet vara så smidigt och böjligt att det blir möjligt på ett begränsat utrymme. Detta kommer givetvis att ställa vissa krav på hur sensorerna utformas. Släpsonaren kommer att utsättas för ett varierande statiskt tryck och kanske även temperaturförändringar. Mest krävande för själva sensorn blir troligen den turbulenta vaken, eller den draglast som kan uppstå längs med sensorkabeln. Således måste släpsonaren designas med hänsyn till denna inverkan. Vi har hittills sett detta som ett problem som löses i ett senare skede i samband med att operativ demonstrator tas fram och det gör vi fortfarande. Det är dock väsentligt att ta dessa frågeställningar i beaktande på ett tidigt stadium med tanke på fiberlasersensorernas höga känslighet för yttre störningar.

Vad gäller den optiska konfigurationen har vi redan varit inne på att en seriell lösning med sensorer kaskadkopplade längs en fiber är mest attraktiv. Beroende på hur många sensorelement som skall användas kan en bättre lösning dock bli att gruppera fiberlaserelementen

i subgrupper, exempelvis med 8-16 kaskadkopplade element. Detta kan även visa sig vara nödvändigt av optiska skäl eftersom vi ännu inte är säkra på hur många lasrar som kan kaskadkopplas. En fördel är också att eventuella fel längs med den optiska fibern inte nödvändigtvis slår ut hela sensorn utan bara påverkar varje enskild subgrupp. Eventuellt underhåll blir också enklare. Det blir i princip möjligt att bygga upp släpsonaren i moduler. En väsentlig nackdel är att det antingen kommer att krävas separata optiska mottagarenheter inklusive interferometrar eller så måste en kraftigare pumplaser användas samtidigt som den återreflekterade optiska effekten minskar genom att ett förgreningsnät används. Vilken lösning som i slutänden blir bäst återstår att se. Till stor del kommer det att bero på hur många element som arrayen skall inrymma.

Det kommer att bli möjligt att sätta en optisk kontakt mellan sensorarrayen och fiberkabeln som ansluter till arrayen vilket väsentligt kommer att underlätta hantering och underhåll.

Utsignalerna från arrayen efter konvertering till den elektriska domänen och demodulering enligt ovan är i praktiken färdiga för digitalisering och behandling. Som vi tidigare nämnt krävs viss efterfiltrering av signalerna för att kompensera för FM demodulering. Om plattformen har möjlighet att kommunicera optiskt med omvärlden, t ex via en fiberoptisk länk till ubåt är en intressant lösning att flytta all signalbehandling från UUV:n eller motsvarande, se figur 7. Eftersom signalerna från fiberlaserelementen ligger som frekvensmoduleringar är de mycket okänsliga för störningar längs med en längre transmissionssträcka. Det är således möjligt att direkt länka vidare signalerna från sensorarrayen till en mottagarenhet som befinner sig på en annan plats. Vinsten är givetvis att utrustning på UUV:n eller motsvarande för sensorer minskar avsevärt.



Figur 7. Direktlänkning till moderfarkost.

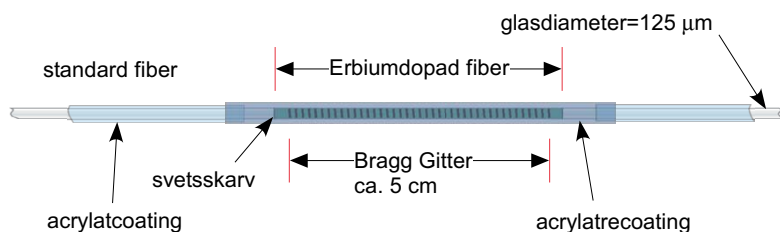
Årets verksamhet

Som en direkt följd av förra årets resultat i projektet OPUS (Optiska undervattenssensorer) har årets verksamhet inriktats mot akustiska gränssnitt och kaskadkopplade fiberlasersensorer. Vad gäller akustiska gränssnitt har vi uteslutande arbetat med den teknik som under fjolåret betecknades med "specialgränssnitt". Tekniken var i det här sammanhanget att betrakta som ny och det fanns därför skäl att tro att den var patenterbar. Därför har det tidigare inte redovisats hur man kan åstadkomma en mekanisk töjningsförstärkning på uppåt 50 dB. Grundtanken skall vi ge här men dock ej gå in på detaljlösningar. Vad avser själva den optiska lösningen gjorde vi under året för första gången mätningar på en seriellt kopplad array, dock fortfarande försök på optisk bänk. Vi har skäl att tro att den här lösningen medför vissa problem. Företaget som säljer fiberlasrar har sålt seriellt multiplexerade lasrar som standard tidigare men har nu valt att arbeta med parallellkopplade lasrar. När lasrarna ligger i serie längs en fiber kan de störa varandra varmed en typ av självsvängning kan uppstå. Exakt hur denna störning uppstår och vad som ger upphov till den är en sak vi velat förstå. Vidare har en viktig målsättning varit att mäta upp brus och överhörning.

Teknikutveckling

Fiberlasrar

Fiberlasrarna som vi nu arbetar med kommer från företaget Koheras i Danmark och är så kallade DFB fiberlasrar. De lasrar i ett polarisationstillstånd och ger i huvudsak ifrån sig ljus i en riktning, i vårt fall i bakåtriktningen. Under fjolåret gjordes lasrarna med en speciell 80 μm erbiumdopad fiber. Lasrarnas längd är ca 5 cm och de svetsas in mellan två standard singelmodfibrer med 125 μm diameter.



Figur 8. Principiell utformning av fiberlasrar från Koheras.

Företaget har nu tagit fram en ny erbiumdopad fiber med 125 μm diameter vilket är fördelaktigt eftersom de nästan alltid skall anslutas till standardfibrer. Särskilt för oss där vi avser montera in fiberlasrarna i en mekanisk anordning är det en mycket stor fördel eftersom en svetsning av fibrer med olika dimensioner är väsentligt sprödare än en svetsning mellan lika stora fibrer. I huvudsak är det de mekaniska egenskaperna som för närvarande bekymrar oss. Rent optiskt har fiberlasrarna redan visat sig uppfylla det man kan önska sig för sensortillämpningen. Koheras arbetar givetvis med att försöka vässa såväl uteffekt som linjebredd. Vad gäller uteffekten räcker den redan mer än väl om inte långa arrayer skall byggas, dvs. flera mil långa system. Om linjebredden minskas får det till följd att fiberlasersensorns detektionströskel blir lägre vilket självklart är eftersträvärt. Men eftersom de redan är så stabila kan det vara så att det blir svårt att hantera en lägre detektionströskel rent sensortekniskt eftersom lasern blir känslig för "allting". Det blir svårt att bygga bort störningar.

Ett nästa utvecklingssteg vad avser fiberlasersensorarrayer kan vara att kaskadkoppla lasrar längs med en obruten erbiumdopad fiber. Emedan fibern i dagsläget inte används mer än till själva laserkaviteten pga. kostnadsskäl och kanske vissa optiska problem finns det skäl att tro att det så småningom borde vara en tekniskt mer attraktiv lösning då seriella laserarrayer skall produceras i större omfattning. I dagsläget är troligen inte omfattningen av företagets försäljning av multikanalslaserkällor så stor att den medgivit dessa utvecklingssteg. Särskilt inte vad avser seriella fiberlaserenheter vilket de inte längre säljer som standard.

Akustiskt gränssnitt

Patenterbarhet

Som nämndes inledningsvis har vi haft och har fortfarande tankar på att skydda vissa av de idéer som vi arbetar med då det gäller en mekanisk anordning för att förstärka inverkan av ett akustiskt fält på den optiska fibern. Grundtanken som inte kan anses ny skall vi här diskutera, däremot inte detaljlösningar vars beskrivning får anstå ytterligare ett tag.

Principer

Mer eller mindre homogena ingjutningar är bra därför att de är enkla och robusta. För att förbättra ingjutningsmaterialets

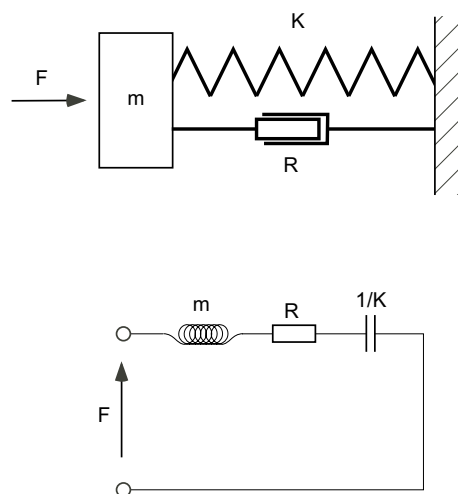
förmåga att förstärka ljudtrycksinverkan har man arbetat med inblandning av små luftmikrosfärer [6]. Materialparametrarna för den mixade produkten modifieras då så att den elastiska parametern Poissons tal minskar. Om man närmare analyserar hur detta påverkar det töjnings och spänningsfältet längs med fiberlasern så finner man att det kommer att undertrycka den töjning som under inverkan av ett ökande tryck försöker förlänga fibern. Man åstadkommer då en ökning av fiberkompressionen i stället. Tänker man igenom detta så inses att det ultimata är att frikoppla mantelytan helt från tryckpåverkan. Tryckkrafterna skall således endast verka mot fibern via dess ändtor. Om man bara betraktar ett längddefinierat segment av en oändligt lång fiber så finns ju inte några ändtor och det är inte självklart att ett ökande tryck kan verka genom att trycka ihop fibern. Det här är en fråga om randvillkor och det är i själva verket relativt svårt att visa exakt hur fibern kommer att påverkas. Vi behöver emellertid inte gå in i detalj på hur det fungerar i det fallet eftersom den lösning vi eftersträvar går ut på att fästa fast ändtor som har större tvärsnittsarea än fibern på fiberlasersegmentet.

För att få trycket att generera en kraft längs med fiber anbringas ändbitar kring fiberlasern som kan förmedla tryckkrafterna på änden till fibern. Ett utväxlingsförhållande för tryckkänsligheten ges av kvoten mellan ändbitens och fiberns tvärsnittsarea sett längs med fibern, A_b/A_f , och eftersom fiberdiametern är relativt liten, cirka 0.1 mm fås med tämligen små ändbitar ett stort utväxlingsförhållande (1 mm:s diameter ger ett utväxlingsförhållande på 100 vilket motsvarar 40 dB:s akustisk förstärkning förutsatt att fiberns egenkänslighet dominerar av de töjningar som uppstår till följd av de effektiva krafter som verkar mot ändytorna, vilket är en bit från sanningen. Då man mäter fiberns egna tryckkänslighet får man ett lägre värde, $3 \cdot 10^{-12} \text{ 1/Pa}$ än det som kan beräknas för en mekanisk anordning där ändytorna är lika med fiberns tvärsnittsarea och där fibersegmentet ses som en elastisk stång som motverkar töjningar. Töjningen som borde uppstå i fibern är lika med inversen av Youngs modul för glasmaterialet, $1/Y = 1.4 \cdot 10^{-11} \text{ 1/Pa}$. När man mäter fiberns nominella ljudtryckskänslighet måste man dock ta i beaktande att trycket verkar runt hela fibern, där man alltså har att ta hänsyn till de krafter som motverkar de krafter som kommer via ändytorna.

Då vi talar om ovannämnda utväxlingsförhållande menar vi förstärkningen i förhållande till $1.4 \cdot 10^{-11} \text{ 1/Pa}$. Vi finner att en ändbit med en diameter på 4 mm teoretiskt kan ge ett utväxlingsförhållande på 1600 vilket alltså motsvarar en förstärkning på mer än 60 dB. För att nå SS0 brusgränsen med fiberlaserhydrofoner har vi tidigare aviserat [2] att det krävs en förstärkning på 50

dB. Således tycks det målet ligga inom räckhåll med den här typen av konstruktion.

Ett problem som förutsetts är hur sensorns dynamiska egenskaper påverkas. För att få en uppfattning om detta har vi ställt upp en enkel mekanisk krets som motsvarar enkla varianter av den givare vi tänker oss. Eftersom vi kommer att ha symmetri kring svängarens mittpunkt, dvs. en fiber med två ändbitar på varje sida, kan vi ställa upp ett schema för halva givaren under förutsättning att de båda ändarna utsätts för exakt samma tryck.



Figur 9. Mekanisk seriekrets och dess impedansanalogi.

De formler vi kan ställa upp utifrån figur 9 är den för kraftbalans och den för systemets mekaniska impedans. De krafter som verkar på systemet kan skrivas som :

$$F = pS - Z_{rad}u \quad (1)$$

samt den motverkande kraften

$$F = Z_{mek}u \quad (2)$$

Här anger p trycket i det omgivande mediet (vattnet eller eventuellt i ett gummimaterial), S anger tvärsnittsarean på ändbiten, Z_{rad} är strålningsimpedansen, Z_{mek} den mekaniska impedansen för kretsen och u anger hastigheten för ytan S 's rörelse i dess normalriktning. Vi vill ta fram ett uttryck för töjningen i fibern som funktion av trycket och behöver därför ha ett samband mellan hastigheten och töjningen. För en harmonisk rörelse ges direkt sambandet $u = i\omega x$ mellan hastigheten och läget. För töjningen finner vi sambandet $x = \epsilon l / 2$ där l anger längden fiber mellan de två ändbitarna. Kombination av (1) och (2) ger nu

$$\frac{u}{p} = \frac{S}{Z_{rad} + Z_{mek}} \quad (3)$$

följt av

$$\frac{\varepsilon}{p} = i \frac{\omega S}{2(Z_{rad} + Z_{mek})} \quad (4)$$

Observera att vi fortfarande har ett komplext uttryck. Töjningen, som vi angivit den är alltså att betrakta som en komplex storhet. Känsligheten uttryckt i enheten $1/Pa$ är absolutbeloppet av (4). För att räkna ut känslighet krävs uttryck för impedanserna. Den mekaniska impedansen kan nedtecknas i direkt analogi med elektriska kretsscheman och vi erhåller

$$Z_{mek} = i\omega m + R + \frac{K}{i\omega} \quad (5)$$

där m anger ändbitens massa, R är den viskösa dämpningskoefficienten och K är fjäderkonstanten. Strålningssimpedansen är lite svårare att beräkna och här har vi tagit hjälp av litteraturen [7] som anger den approximativa strålningssimpedansen för en liten kolv i baffel, $kr < 0.5$ där $k = \omega/c$ och r är kolvens (ändbitens) radie, som

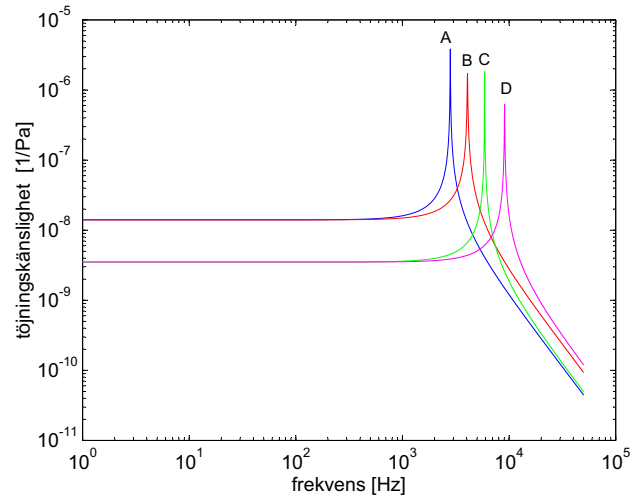
$$Z_{rad} = \left[\frac{(kr)^2}{2} + i \frac{8kr}{3\pi} \right] \rho c S \quad (6)$$

Uttrycket avser mekanisk (ej akustisk) strålningssimpedans. Med utnyttjande av (5) och (6) i (4) kan vi nu beräkna en teoretisk känslighetskaraktäristik som ger en viss fingervisning om hur givarna kommer att bete sig. Vi har gjort beräkningarna för lite olika parameteruppsättningar och visar resultaten i figur 10. Den viskösa dämpningen har vi här satt till 0. I praktiken kommer vi säkert att ha dämpning i systemet som i så fall får till följd att resonansstoppen smetas ut. Den breddning som nu finns beror av strålningssimpedansen.

Vi kan se att det inte kommer att vara helt enkelt att få en hög bandbredd. Högre känslighet i mätbandet (under resonansfrekvensen) medför minskad bandbredd. Det verkar dock som att det är möjligt att komma upp till ett antal kHz med vidmakthållande av en hög förstärkning.

Förutom ovanstående mekaniska konstruktion för att förstärka känsligheten kommer vi även att prova den materialblandning innefattande luftmikrosfärer som utprovades i fjol [4]. Detta var en sak vi trodde vi redan skulle ha gjort men efter vissa problem under årets inledning valde vi att vänta även med detta tills vi köpt flera lasrar. Ett skäl till att vi inte gjorde det på en gång var att Koheras lät meddela att de hade nya lasrar

med större ytterdiameter på gång vilket är en fördel vad avser mekanisk hållfasthet. Vad gäller ingjutning behöver fiberlaserns primärskydd avlägsnas för att materialblandningen skall få direktkontakt med glaset. Vi avser att göra en ingjutning under slutet av innevarande år.



Figur 10. Töjningskänsligheten som funktion av frekvens för några olika parameteruppsättningar; A) $r=2$ mm, $m=0.1$ g B) $r=2$ mm, $m=0.03$ g C) $r=1$ mm, $m=0.02$ g D) $r=1$ mm, $m=0.01$ g.

Inledande prov

Under början av året försökte vi applicera den typ av akustiska gränssnitt vi arbetat med under fjolåret på de fiberlasrar vi hade då. Egentligen hade vi bara en fiberlaser som lämpade sig för tester. När vi skulle montera ett akustiskt interface uppstod brott på fiberlasern. Den fiberlaser som vi arbetade med var återbeklädd "recoatad" med ett polyimidskikt som var något tjockare än den nominella akrylatcoatingen, vilket medförde vissa problem vid monteringen. Som vi uppfattade det utsatte vi inte fiberlasern för nämnvärd belastning då brotten uppstod. Vi noterade att recoatingen på fiberlasern var dålig då vi inspekterade den under mikroskop. Det var en del sprickor i den. Det i sig kan ha lett till spänningar i glasmaterialiet. Eftersom lasrarna då också var gjorda med 80 μ m fiber svetsad mot 125 μ m fiber var de möjligen mer känsliga än fiberlasrar gjorda med 125 μ m fiber. Den senare varianten är de vi har nu och även kommer att använda fortsättningsvis. En viktig aspekt vad gäller fibrernas mekaniska hållfasthet är också att de skyddas från vatten. Vattnet eller rättare sagt joner i vattnet kan ge upphov till korrosion på glasytan [8]. Mikrosprickor kan bildas vilket gör fibern extra känslig för böjningar. Det är troligen viktigt att se till att fiberlasern exponeras

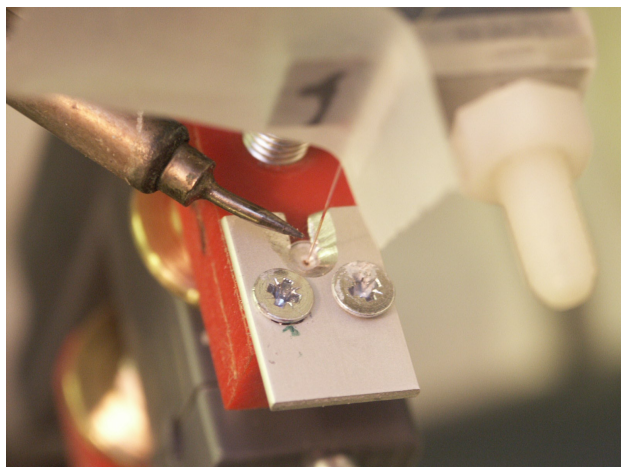
för den omgivande luften så kort tid som möjligt då en sensor skall tillverkas. Därför har vi velat samverka med Koheras och kanske montera delar av sensorn då fiber-lasrarna tillverkas. Det här är en osäkerhet. Det kostar dock för mycket att med empirisk metod ta reda på det. Varje laser kostar cirka 3500 US\$. Även om de framöver bör kunna bli billigare är det i dagsläget inte möjligt att testa allt för många olika varianter.

Nya konstruktioner

Delvis på grundval av de erfarenheter vi fick vid våra inledande prov beslutade vi att ändra metod för att montera ändbitarna mot fibern.

Under fjolåret framkom det att en mycket tillfredsställande metod för att få fast ändbitarna var att klämma på dem med ett klämverktyg. Eftersom fibrerna har ett hölje av akrylatplast fann vi detta vara en bra metod. Akrylatskiktet fungerar som ett mellanlägg som förhindrar att den metalliska ändbiten klämmer direkt mot glaset och spräcker det. Metoden fungerade egentligen felfritt och det var möjligt, så vitt vi kunde bedöma från de mätningar som gjordes att få en god mekanisk koppling mellan ändbiten och glasfibern. Dessutom var en fördel att vi slapp avlägsna akrylathöljet för att limma fast ändbitarna.

Av försiktighetsskäl har vi nu valt att limma fast ändbitarna istället och vi behöver därför avlägsna akrylathöljet. De fiberlasrar som vi nu kommer att få levererade kommer att vara återbelagda med ett akrylathölje. Den avlägsnas med svavelsyra och vi har monterat upp en uppställning där vi kan göra flera arbetsmoment under kontrollerade former. Först skall akrylathöljet avlägsnas över en så kort sträcka som möjligt därefter skall ändbitarna limmas fast mot fibern och slutligen skall givaren i sin helhet monteras ihop. I figur 11 ser vi givaren under



Figur 11. Montering av ändbitar.

montage infäst i en monteringsjigg. Av själva givaren syns endast det hål i vilket fibern skall limmas. Som vi tidigare skrivit går vi nu inte in på mer detaljer om hur givaren ser ut i sitt slututförande. Den mekaniska kopplingen mellan ändbitarna och fibern är dock en av de kritiska delarna i givaren.

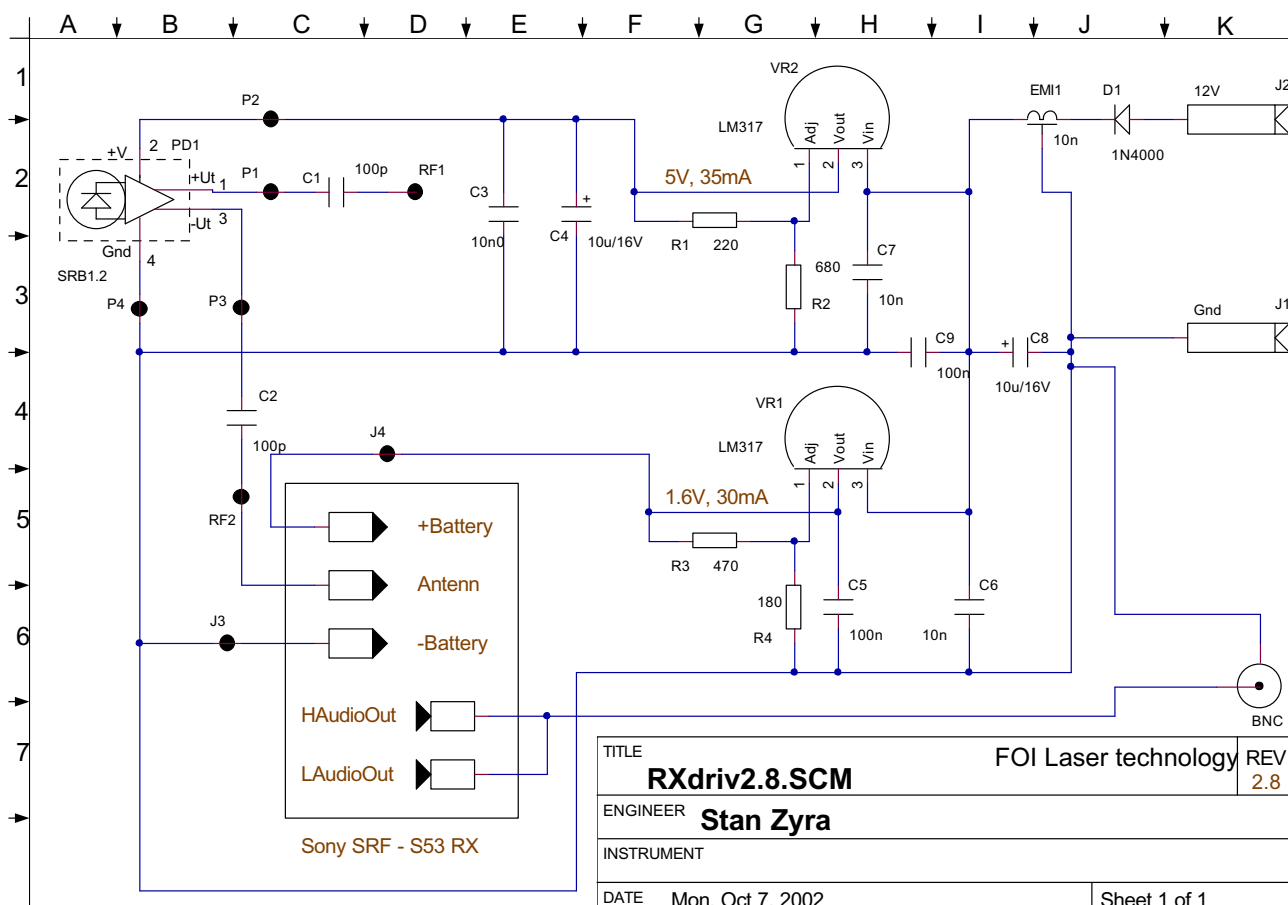
Mottagare med integrerad FM demodulator

För detektion av den optiska signalen användes en fotomottagare av typ PerkinElmer SRB1.2 med integrerad transimpedansförstärkare för att erhålla rimlig nivå på utsignalen. Omvandlingsförstärkningen (optisk effekt till utspänning) var 3.8 kiloVolt/Watt. Vi gjorde tidigt försök med att koppla utsignalen från en fotodiod utan mellanliggande förstärkning direkt till radiomottagarens antenningång som ju är avpassad för svaga signaler. Det visade sig dock svårt att få tillräcklig signalstyrka. Ett problem var att eliminera den radiosignal som via luften fortplantade sig direkt från den akustooptiska modulators drivaggregat till radiomottagaren. Radiomottagaren kopplades in direkt efter fotomottagaren enligt kretsschemat i figur 12.

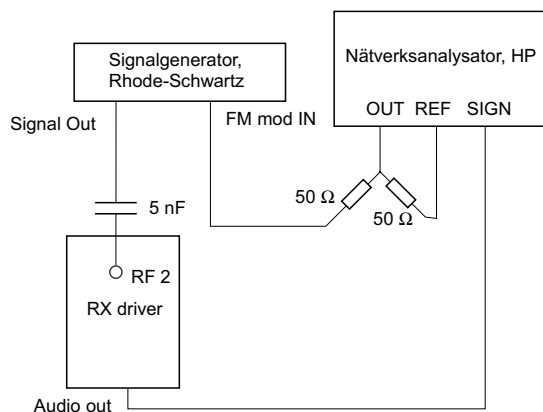
Hela mottagardelen placerades i en avskärmd låda, se figur 5. Radion var en SONY typ SRF-S53/RX som i normalt bruk används som liten bärbar FM-radio. Radion modifierades något. Höljet togs bort och antenningången ersattes med en krets som separerade radioenhetens utgång från dess ingång. Ingången på radion kopplades till fotomottagarens utgång och utgången från radion kopplades till BNC hane på utsidan av mottagarlådan.

FM demodulator, karaktäristika

En av de fyra FM demodulatorerna frekvenskaraktäriserades. Frekvensgången uppmättes med utnyttjande av en nätverks/spektrumanalysator typ HP 4195A samt en frekvensmodulerbar signalgenerator typ Rohde-Schwartz, SMG 801.0001.52. Ett blockschema för mätupställningen visas i figur 13.

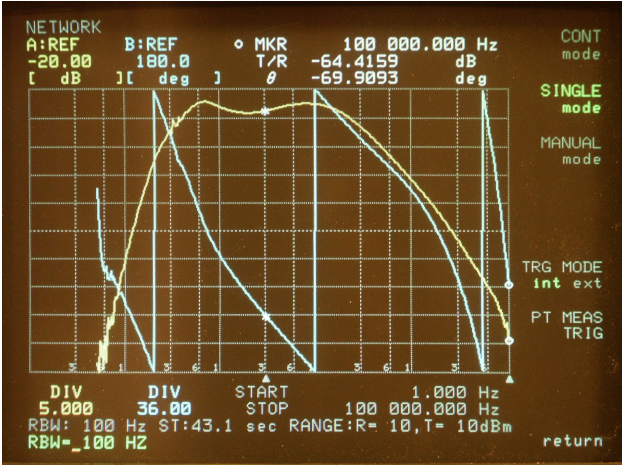


Figur 12. Kretsschema för FM demodulator med integrerad fotomottagare

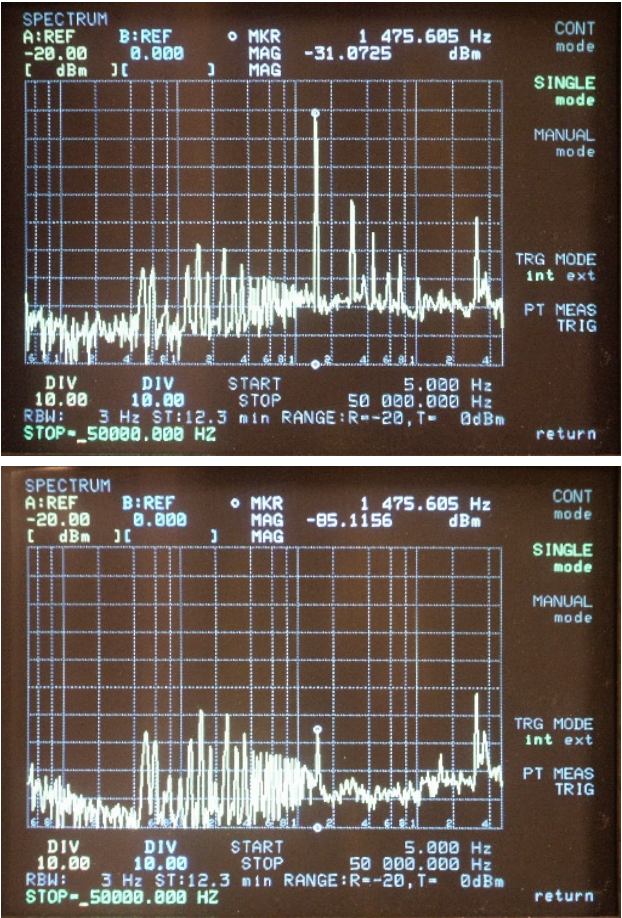


Figur 13. Blockschemat över mätupställning vid mätning av frekvensgång för FM demodulator.

Nätverksanalysatorns utgång kopplades via en 50 Ohms förgrening till signalgenerators FM modulationsingång. Den andra delen kopplades tillbaka till analysatorns referensingång (R). Uteffekten från analysatorn ställdes på 0 dBm. Signalgenerators ställdes in så att den genererade en RF signal med bärvågsfrekvensen 100 MHz och med en RF effektnivå på -40dBm. Denna effektnivå var klart över den för vilken optimal radio-mottagning erhöles. Utsignalen från generatoren kopplades till FM radion. Från FM-radion, dvs. ut från den anslutning dit normalt hörlurarna kopplas, drogs en signalkabel tillbaka till analysatorns transmissionsingång (SIGN). Den gula kurvan i figur 14 visar nätets relativa dämpning (SIGN/REF) som funktion av frekvens. Antaget att nätets övriga komponenter (generatoren +kablar) ej är frekvensberoende erhåller vi en bild av FM radions frekvensgång. FM radions volym var i det här försöket ställd på max, megabass option ställd i läge ON. I figur 15 visas spektrum för utsignalen då radioingången matas med en ton på 1474 Hz och med en deviations amplitud (AF) på först 100 kHz och sen 100Hz.



Figur 14. FM mottagarens uppmätta överföringskaraktäristik (gul vågform). Upplösningsbandbredd (RBW) från 5-30 Hz; RBW=3, från 30-300 Hz, RBW=30, från 300-100 kHz, RBW=100. Blå vågform anger fasgång.



Figur 15. Spektrum för utsignalen då radioingången matas med en ton på 1474 Hz och med en deviations amplitud (AF) på först 100 kHz och sen 100Hz.

Mätningar

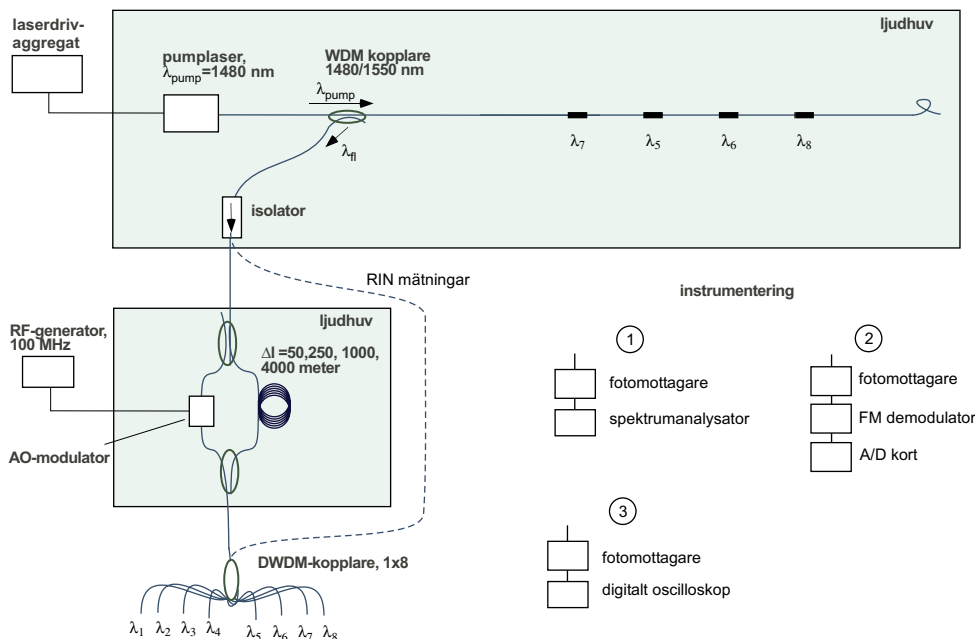
Bruskaraktärisering av fyrkanalsarray

Det var tämligen enkelt att koppla in fiberlaserarrayen och börja mäta efter leverans. Förutom arrayen hade vi alla komponenter och det som behövde göras var att svetsa på den mot WDM kopplaren.

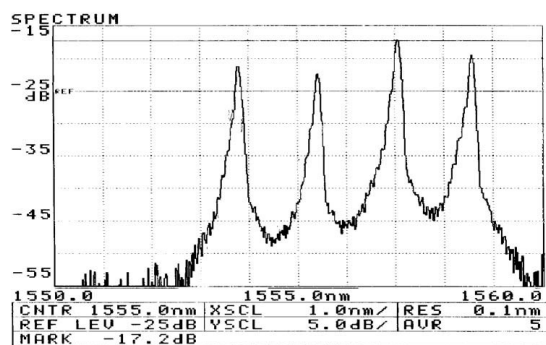
FLS nr	Våglängd [nm]	ITU kanal
1	1557.36	25
2	1554.13	29
3	1555.75	27
4	1558.98	23
-	1552.52	31
-	1550.92	33
-	1549.32	35
-	1547.72	37

Tabell 1: DWDM kanaler.

Först kontrollerades att samtliga lasrar lyste som de skulle. Med pumplaserströmmen satt till 390 mA fick vi ett optiskt spektrum ut från WDM kopplaren enligt figur 17. Vi ser våra fyra laserkanaler separerade med cirka 1.6 nm. De lyser med lite olika effekt vilket torde bero på att de inte är exakt lika. De skiljer cirka 5 dB optiskt mellan den lägsta och högsta toppen. Den exakta toppeffekten har inte någon betydelse för den här tillämpningen. Det är mest en fråga om att effekten överhuvudtaget är tillräcklig och det finns en god marginal i det nuvarande systemet.



Figur 16. Mätupställning. För RF spektrum användes detektorkonfiguration 1 och 3, för RIN mätningarna konfiguration 3 och för mätning av laserfrekvens konfiguration 2.

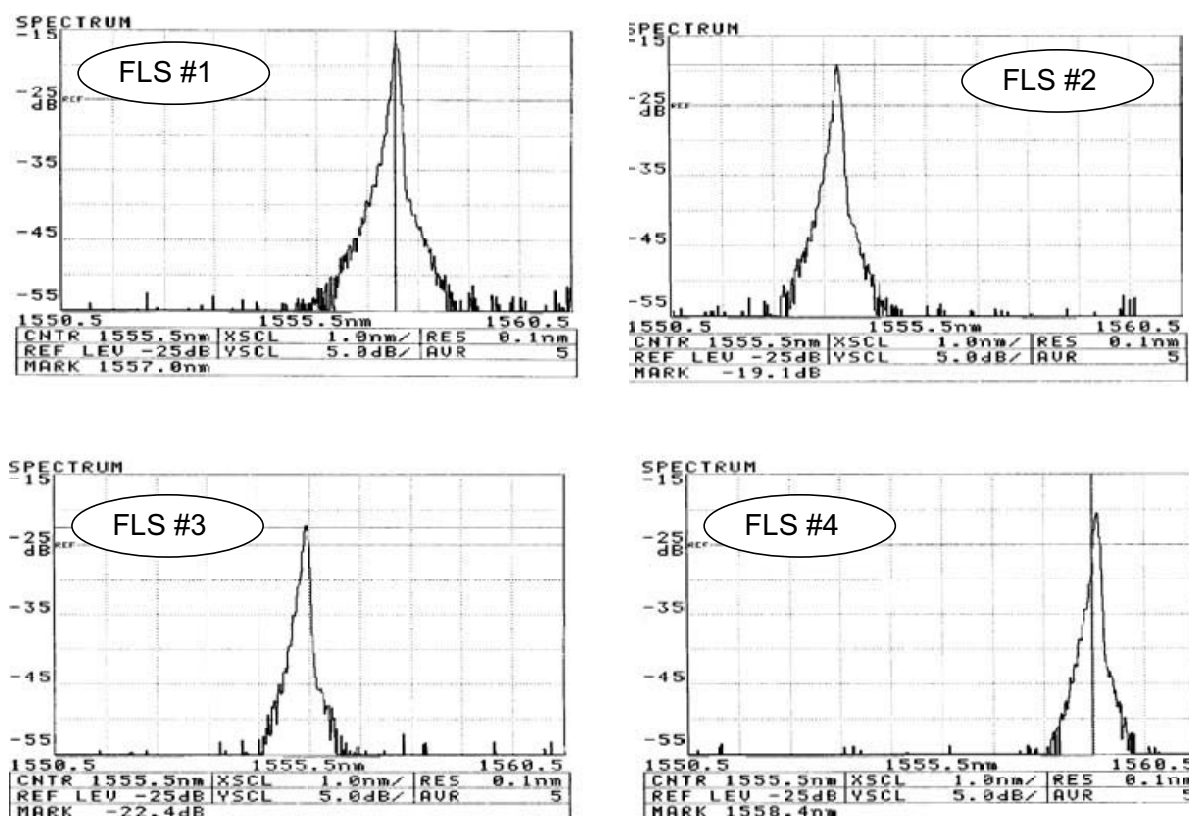


Figur 17 Optiskt spektrum ut från WDM kopplare.

I figur 18 visar vi vad vi ser på de fyra utgångarna från DWDM kopplaren då den kopplades in direkt efter WDM kopplaren. Noterbart är att varje kanal uppträder isolerat med en isolationsgrad på åtminstone 40 optiska dB vilket motsvarar 80 dB i den elektriska domänen eftersom den optiska effekten är proportionell mot fotodetektorströmmen. Det är värt att notera att bredden på topparna i de optiska spektrumen inte säger något om ljusets linjebredd utan ges av instrumentupplösningen.

I de följande mätresultaten har mätupställningen enligt figur 16 använts. Tabell 1 visar vilken våglängd som hör till vilken laser. Eftersom vi har en DWDM kopplare med 8 kanaler är 4 oanvända.

Då man kopplar in en fiberlaser mot en fotodetektor och mäter den optiska effekten så ser man en karaktäristisk signal kring ett antal hundra kilohertz. Genom intern återkoppling i pumpmekanismen uppstår vad som kallas för relaxationsoscillationer vilket är källan till störsignalen. Så länge dessa oscillationer är begränsade kan vi visa att de har mindre betydelse om man utnyttjar en demoduleringsprincip som kan särskilja amplitudmodulering från frekvensmodulering. Så sker också med FM demoduleringsprincipen vilket gör att vi kan leva med relaxationsoscillationerna. För optiska mätningar anges normalt intensitetsbrus i termer av RIN, relativt intensitetsbrus som ger ett mått på intensitetsvariationerna relativt den nominella optiska intensiteten. I figur 19 visar vi uppmätt RIN för de fyra lasrarna med mätkonfiguration 3 enligt figur 16. Vi ser att RIN spektrum domineras av relaxationsoscillationen med lite olika centerfrekvens för de olika lasrarna.



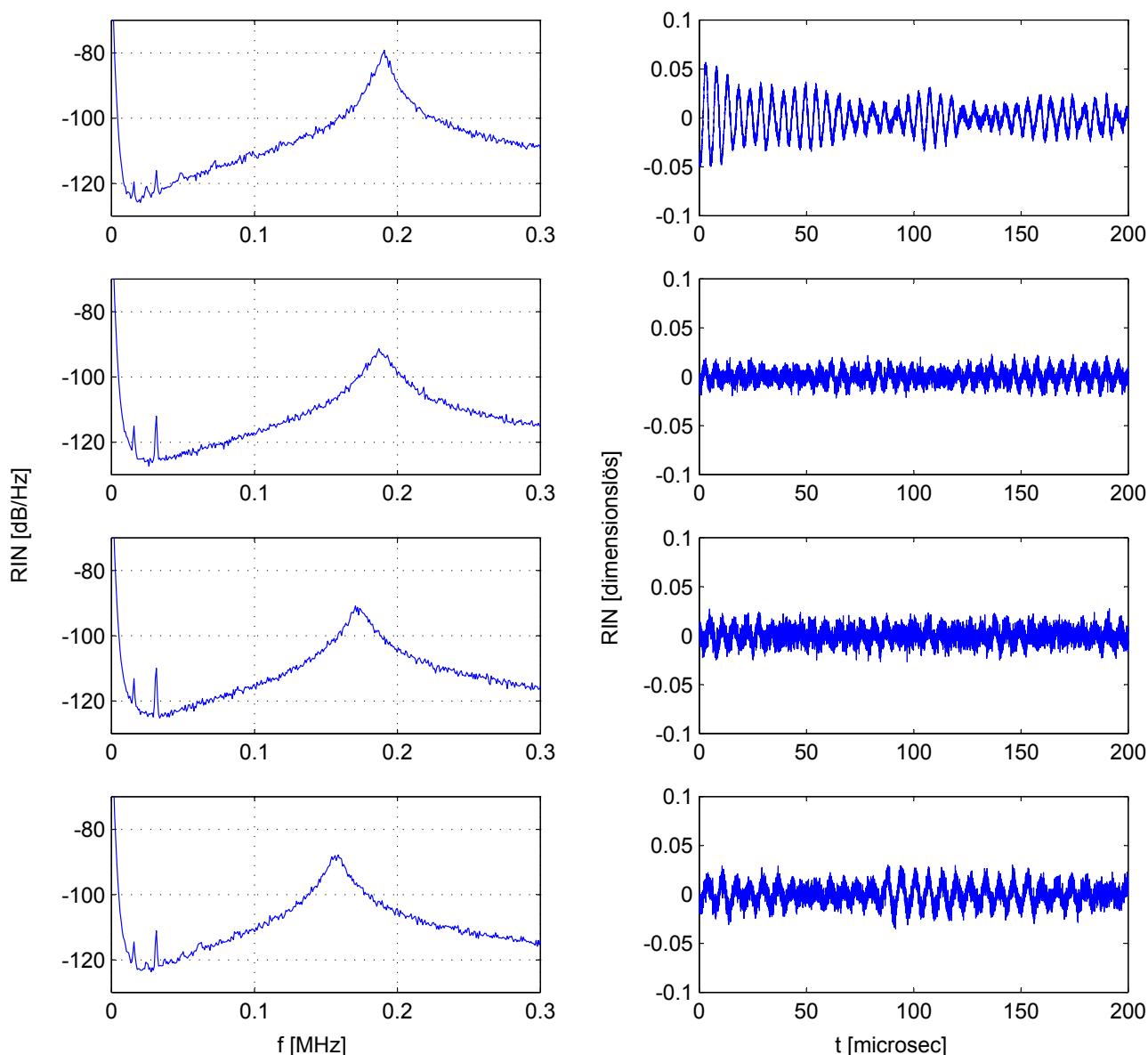
Figur 18. Optiska spektra uppmätta på respektive utgång från DWDM kopplaren.

Som sagt, med rätt demoduleringsmetod syns inte RIN bruset i vårt fall och vi borde då lugnt kunna gå vidare. Dessvärre är det just de här relaxationoscillationerna som kan förstärkas under vissa förutsättningar som vi ej i detalj ännu förstår. Vad man ser då man mäter med fiberlaserarrayen är utsignalerna under stundom börjar svänga kraftigare. Relaxationoscillationerna blir helt enkelt så kraftiga att de släcker ut den optiska effekten i dalarna. I det läget är det inte längre möjligt att demodulera signalerna och vi ser störningar även i FM signalerna. Det har dock visat sig möjligt att avstämna drivparametrarna för pumplaseren, dess temperatur och drivström, för att undanröja tillstånd av självsvängningar. När dessa parametrar ändras förskjuts pumplaservåglängden något vilket troligen är den effekt som har ett beroende till relaxationoscillationerna. Vi behöver utreda den här effekten bättre för att förstå hur den kan motverkas. Klart är dock att vi har en möjlighet att påverka att självsvängningar uppstår genom kontroll av pumplaserparametrarna. En väsentlig detalj som vi ännu inte studerat är om fiberlasarna störs samtidigt eller om villkoren för självsvängning uppstår individuellt för varje laser. Det förra vore att föredra eftersom det då bör

vara väsentligt lättare att kontrollera dem.

Även om relaxationoscillationerna är ett olöst problem har vi fått den uppfattningen att de uppstår sällan och är kontrollerbara vilket, skall tilläggas, gäller under de ordnade laboratorieförhållanden vi haft hitintills. Det återstår att se om de förblir hanterbara under mer praktiska förhållanden.

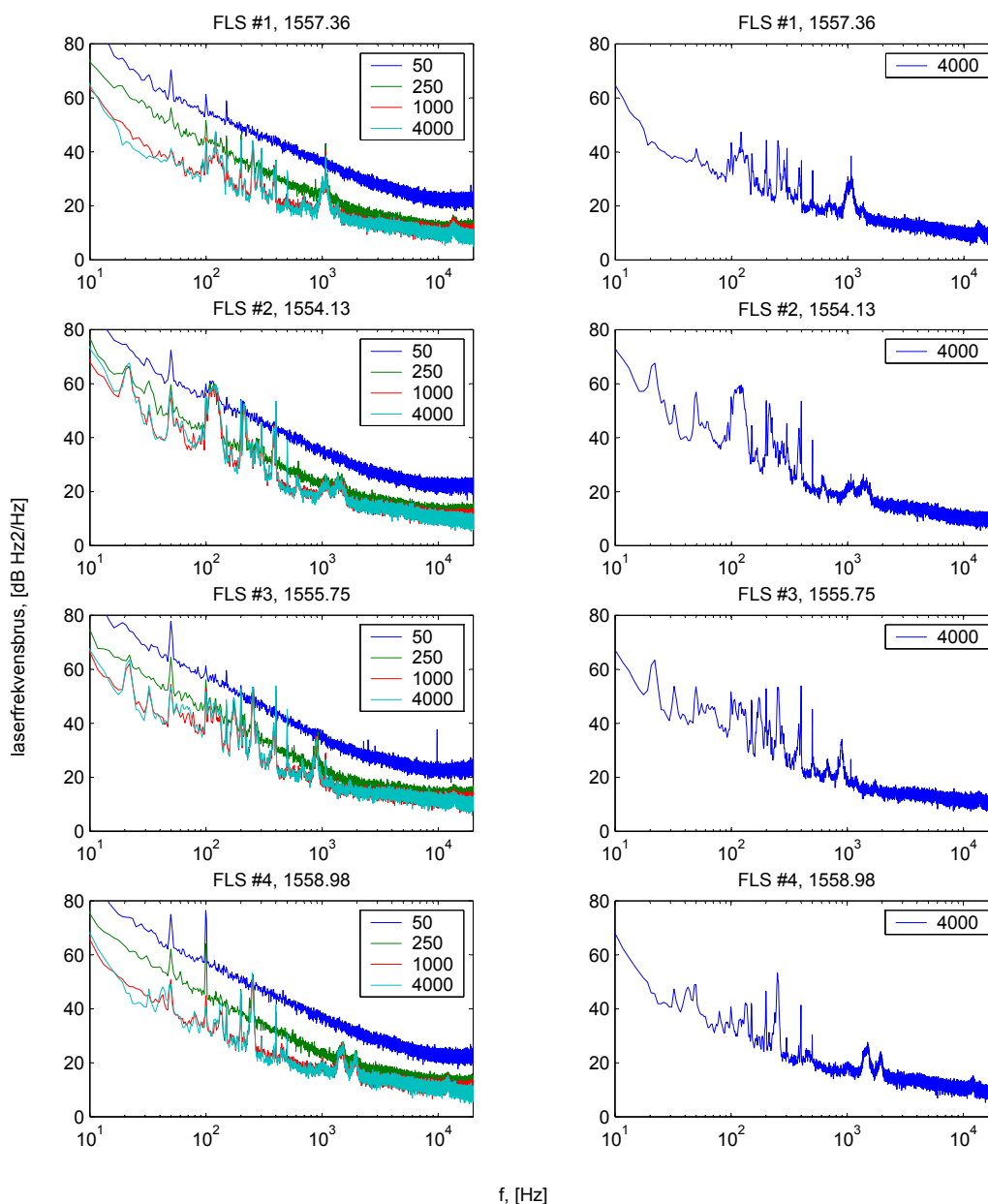
Med den akustooptiska modulatoren påkopplad och interferometerns väglängdsskillnad varierad från 50 till 4000 meter har vi karakteriserat fiberlasrarnas frekvensegenskaper. Genom att ha en stor väglängdsskillnad i fibern fås ett stort utväxlingsförhållande på mätsignalen, enligt formler i [3]. Det går alltså att förstärka känsligheten för laserfrekvensstörningar genom att använda en stor väglängdsskillnad. Den aktuella väglängdsskillnaden skall visa sig större än vad som kommer att krävas för att detektera signaler ned till det optiska brusgolvet. I mångt och mycket påminner de resultat vi här redovisar om det som gjordes i fjol på ett singelelement. Det är naturligtvis mycket bra eftersom vi inte förväntat oss att åstadkomma bättre signaler i och med att lasarna kaskadkopplats.



Figur 19. Relativt intensitetsbrus uppmättes med DWDM kopplaren ansluten direkt till utgången från WDM kopplaren. Relaxationsoscillationsresonansen dominerar spektrumen. Vi ser att RIN amplituden skiljer något mellan lasrarna. I tidsdomänen ser vi att oscillationerna är amplitudmodulerade vilket ger upphov till den spektrala breddningen.

I figur 20 visas mätresultat då mottagarutrustning nummer 2 enligt figur 16 användes. Spektrumen visar omräknade värden som motsvarar lasrarnas frekvenstörningar uttryckt i enheten $\text{dB Hz}^2/\text{Hz}$. Måttet avspeglar alltså den spektrala effekttätheten för laserfrekvensdeviationen. Vi ser att olika väglängdsskillnad ger olika resultat. Då väglängdsskillnaden är för kort dominerar inte lasersignalen över elektronikbruset och vi får en

missvisande bild av laserfrekvensbruset. Med längre väglängdsskillnad får vi bort inverkan av elektronikbruset och vi detekterar laserfrekvenssignalen. Ett kvitto på detta är att vi får ett nära identiskt signalspektrum vid 1000 och 4000 meters väglängdsskillnader. För senare användning då vi inte kommer att vara intresserade att karaktärisera lasrarnas brusegenskaper noggrant kan det vara tillräckligt med en väglängdsskillnad på ett par hundra meter.



Figur 20. Spektrum för lasrarnas frekvensstörning. Våglängdskillnader på 50, 250, 1000, 4000 meter användes. FM mottagarnas utsignal har konverterats till en ekvivalent laserfrekvensnivå med beaktande av hela mottagarkretsens överföringsfunktion. De två kortare våglängdskillnader ger inte tillräckligt hög omvandlingsförstärkning för att laserfrekvensbruset skall synas. Motsvarande kurvor domineras av elektroniskt brus och ger således en missvisande bild av laserfrekvensbruset. Tillräcklig förstärkning erhålles för våglängdskillnaderna 1000 och 4000 meter. Vi ser att kurvorna uppmätta vid 1000 och 4000 meter följer varandra väl. I högra diagrammen visas mätningar med 4000 meter exklusivt.

De högra diagrammen i figur 20 visar bara de uppmätta värdena vid 4000 meter. Vi hävdar att de visar det optiska brusgolvet för fiberlasrarna i deras nuvarande skick. Noterbart är att 50 Hz toner saknas. Olika toner höjer sig individuellt för lasrarna i ett band upp till 1 kHz. Källan till dessa toner är inte känd men eftersom de verkar vara olika för varje laser är det osannolikt att de uppstår i gemensamma källor som t ex pumplaser. Vi får tillsvidare nöja oss med det här brusgolvet som

är fullt acceptabelt och bättre än väntat. Vi har ett brus på cirka $40 \text{ dB Hz}^2/\text{Hz}$ vid 100 Hz och $20 \text{ dB Hz}^2/\text{Hz}$ vid 1 kHz. Dessa siffror kan ställas i direkt relation till den optiska bärvågsfrekvensen på 100 THz. Genom att normalisera mot laserfrekvensen får vi ett relativt mått på bruset som är proportionellt mot töjning och kan även uttrycka ett motsvarande hydroakustiskt brusgolv om vi känner töjningskänsligheten för givaren. Vi använder här fiberns nominella känslighet på $3 \cdot 10^{-12} \text{ 1/Pa}$.

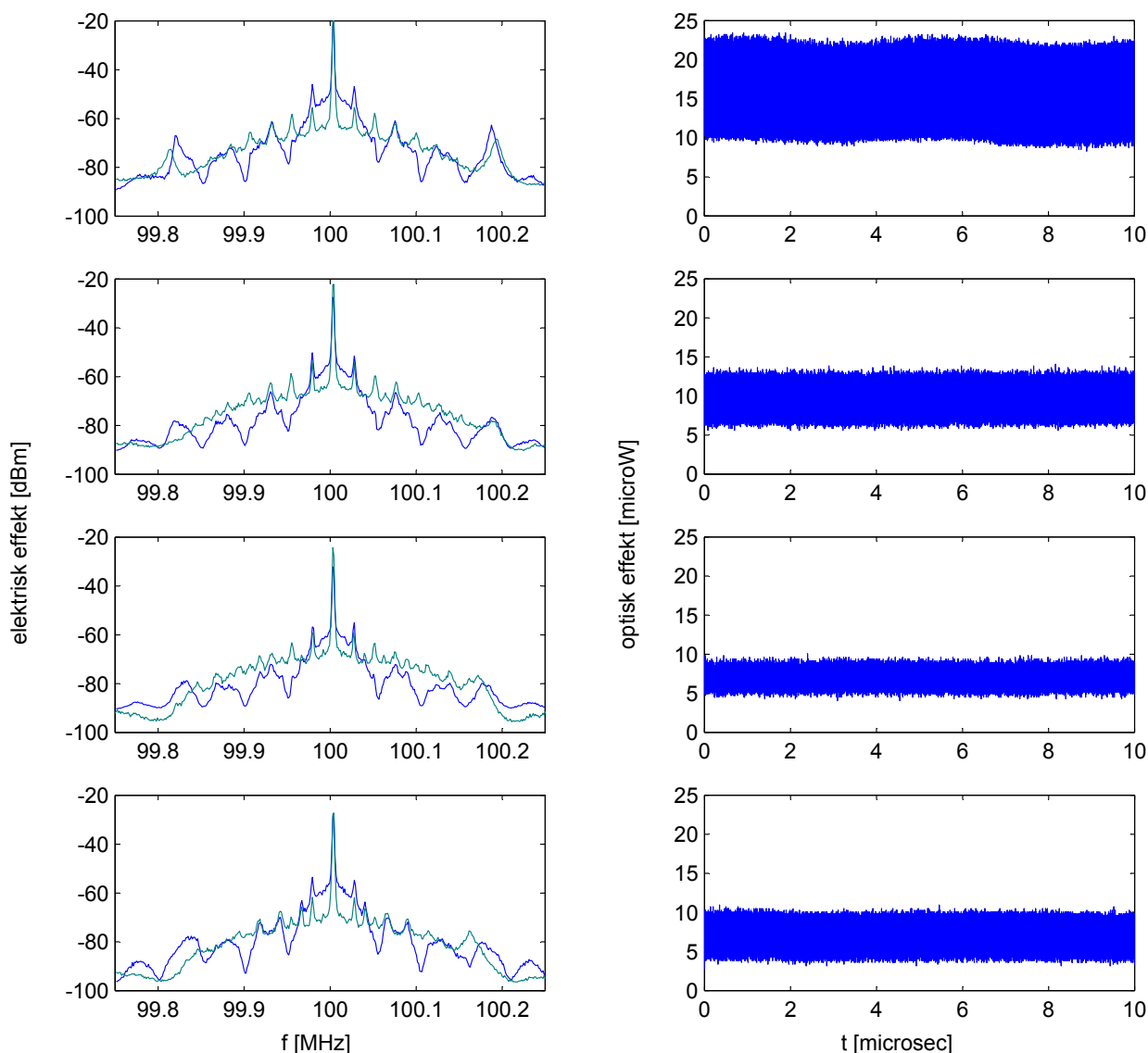
storhet	frekvensbrus	relativt frekvensbrus	hydroakustiskt brus
enhet	$\text{dB Hz}^2/\text{Hz}$	dB 1/Hz	$\text{dB } \mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$
	20	-260	90
	40	-240	110
	60	-220	130

Tabell 2: Omvandling från laserfrekvensbrus till förväntat hydroakustiskt brus antaget att känsligheten för fiberlaserhydrofonen är $3 \cdot 10^{-12} \text{ 1/Pa}$.

Tabell 2 visar att vi skall lägga till 70 dB på de avlästa frekvensbrusvärdena för att få ett mått på det hydroakustiska brusgolvet för en omantlad fiberlaser. Om vi till exempel avläser $20 \text{ dB Hz}^2/\text{Hz}$ vet vi att det motsvarar en hydroakustisk brusnivå för en omantlad fiberlaser på $20+70=90 \text{ dB } \mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$. Med en förstärkning på 50 dB

når vi SS0 vid 1 kHz ($40 \text{ dB } \mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$) och vi hamnar under SS0 brusnivån ($60 \text{ dB } \mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$) vid 100 Hz. Det är möjligt att laserfrekvensbrusnivån kan sänkas ytterligare. Troligen dock ej vid frekvenser över 1 kHz där fundamentalt termiskt brus tros utgöra gränsen [9]. Däremot är det mer oklart hur bruset vid lägre frekvenser uppstår. Sänkning av laserfrekvensbruset är liktydigt med en minskad linjebredd för laserljuset. Detta kommer inte att vara något vi själva kan arbeta med men vi kan påverka leverantörerna att sträva efter ännu smalbandigare lasrar. De gör redan detta i viss mån med tanke på att det är den utmärkande egenskapen för DFB fiberlasrar.

Vi avslutar det här avsnittet med att visa hur signalerna ser ut då de infaller på fotomottagarna. I figur 21



Figur 21. Elektriskt effekttäthetsspektrum uppmätt med en separat fotodetektor ansluten till respektive utgång på DWDM kopplaren. Spektrumanalysatorns upplösningsbandbredd var 1 kHz och spektrala data har medelvärdesbildats 50 ggr. Grön vågform-1000 meter, blå vågform-4000 meters våglängdsskillnad.

visas signalerna i frekvens och tidsdomän. Effekttäthetspektrummen är centrerade kring RF bärvågsfrekvensen 100 MHz och beroende på vilken väglängdsskillnad som använts i interferometern får vi olika utseende på sidbanden. Generellt sett uppkommer sidband som följer ett sinc^2 beroende med en deviationsfrekvens för det första lobminimat vid $1/\tau$ där τ är tidsfördröjningen mellan de två optiska fälten i interferometern. För 4000 meters fallet hamnar den frekvensen vid 50 kHz och för 1000 meter vid 200 kHz. Störningar som har att göra med laserns relaxationsoscillationer påverkar även den optiska frekvensen. Vi kan se antydning till toppar som höjer sig ovan det förväntade sinc^2 mönstret vid deviationsfrekvenser omkring cirka 170 kHz. Spikarna som ligger närmare bärvågen är troligen genererade i instrument varför vi tillsvidare kan bortse ifrån dem. Om vi betraktar frekvensområdet med några kHz bredd närmast bärvågen finner vi att nivån är högre för 4000 meters signalen. Detta är helt och hållet i enlighet med den omvandlingsförstärkning som sker i interferometern. Det är fasbrusnivån i detta band som utgör detektionsgränsen för sensorerna. Fasbruset vid högre frekvensdeviationer kommer i all väsentlighet att påverka fassignaler med högre amplitud och leda till distortion. Som det nu ser ut ligger dock nivån väl under den nivån som råder kring bärvågsfrekvensen varför det inte bör leda till något problem. Vi hade möjligen förväntat oss större inverkan av relaxationsoscillationerna än vad vi kan se.

I tidsdomänen visar vi signalen uttryckt i den optiska effekt som infaller mot detektorn. En fet linje uppstår till följd av bärvågen vid 100 MHz som är snabbare än vad tidsskalan tillåter upplösa. Vi noterar att vi har olika medeleffekter på de olika kanalerna och att även heterodynsignalens amplitud relativt medeleffekten är olika. Att medeleffekterna är lite olika beror på att fiberlasrarna lyser olika starkt. Att heterodynsignalen har olika styrka beror på polarisationseffekter. Eftersom vi genomgående arbetar med icke polarisationsbevarande fibrer kommer heterodynsignalens styrka att variera allteftersom polarisationstillståndet längs med fibrerna varierar. Det här kan leda till signalutsläckning men eftersom det tillståndet är ovanligt och sällan uppträder fungerar det bra. Om det skulle vara nödvändigt finns färdigutvecklad teknik för att hantera polarisationsproblematiken. För närvarande tror vi dock att det räcker att ha ordentlig marginal i den optiska effekten så att avsevärd dämpning pga. polarisationsutsläckning kan tillåtas.

Heterodynsignalens amplitud är också generellt sett lägre än vad som förväntades. I princip bör den ligga så att den sveper nära ned till noll. Detta har visat sig bero på att den akustooptiska modulatorens inte fungerat helt

bra, se under avsnittet "Övriga mätningar" där vi diskuterar den optiska effektnivån.

Överhörningsmätningar

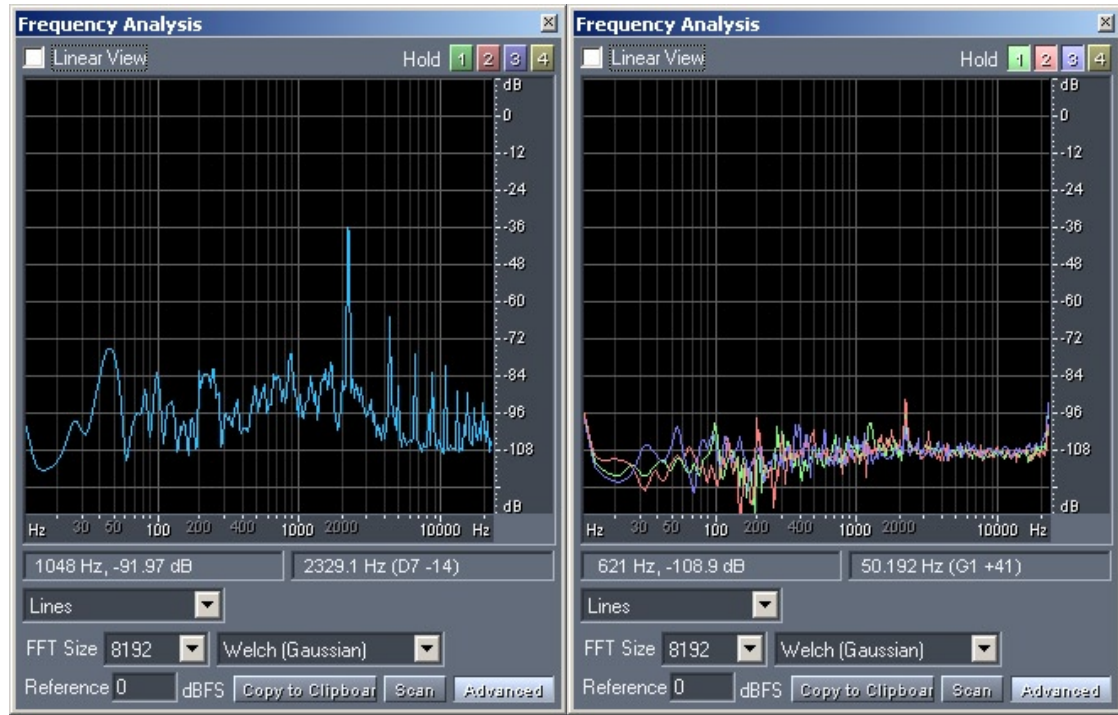
Överhörningsmätningarna gjordes med det sista fiberlaserelementet bortmonterat från plattan med de övriga elementen. Mätningen genomfördes endast med signal på den lasern. Möjligen kan resultatet ha blivit annorlunda om en av de andra lasrarna separerats och utsatts för ljud. Exempelvis kan pumplaserljuset förmedla överhörning. I så fall kommer inte den sista lasern att påverka de föregående längs med fibern. Ytterligare mätningar krävs således vad avser överhörning. Inte desto mindre var det mycket positivt att kunna konstatera att överhörningsnivån i det här försöket var cirka -55 dB. Detta är mycket bra och under vad som torde krävas för arraytillämpningar där lasrarna skall fungera som element i en akustisk antenn. I figur 22 ser vi signalen på de fyra kanalerna då ljud infaller mot den särkopplade fiberlasern. Som synes är signalen kraftigt dämpad.

Inledningsvis hade vi överhörning i det elektriska systemet. Det visade sig att utgångarna från radiomottagarna kopplades till varandra via en gemensam spänningsmatning. Detta kunde dock enkelt åtgärdas genom att använda separata strömförsörjningsaggregat till de fyra mottagarenheterna. En annan potentiell källa till överhörning var via RF signalerna. Det har dock inte visat sig vara något problem. Det var kanske inte heller att förvänta eftersom fotomottagarna byggdes samman med radiomottagarna. Den önskade signalstyrkan överstiger därmed vida den som kan tänkas koppla in i mottagarna via luft eller ledningar.

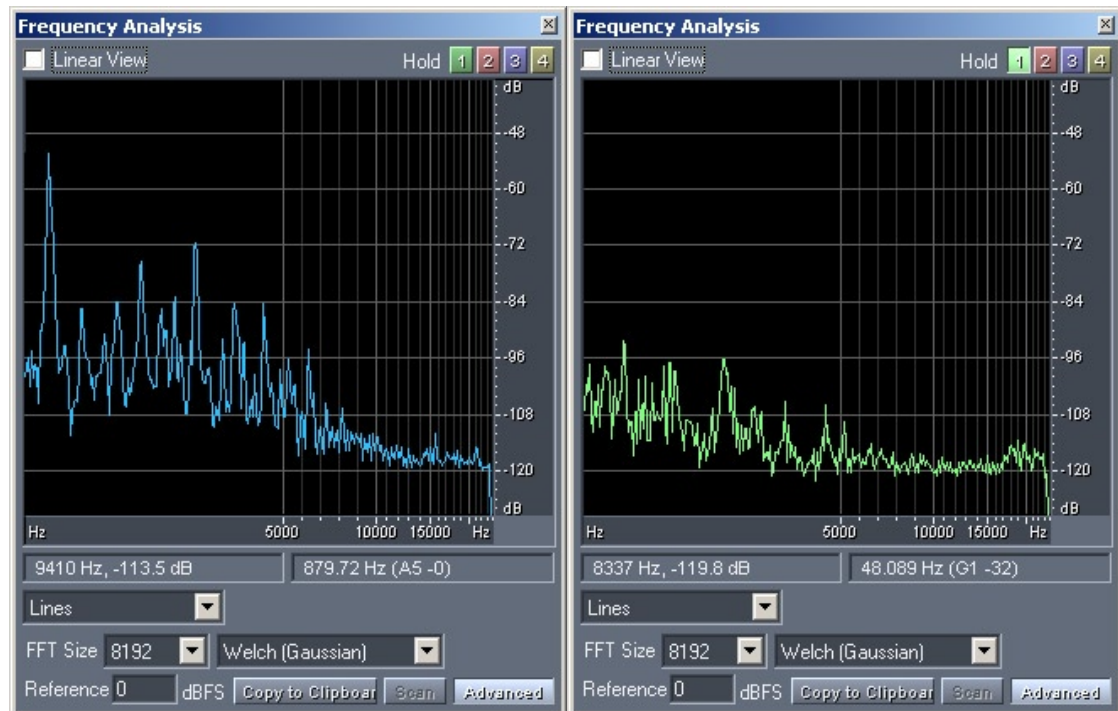
Ljudupptagningar i luft

Mest för demonstrationssyfte har vi provat att fånga upp ljud i luft med fiberlasern. Då fiberlasrarna legat uppfästa i sin ursprungskonfiguration mot ett kartongark visar de sig vara relativt känsliga för omgivande ljud. Då vi monterade loss en fiberlaser och fäste in den i en ram enligt figur 5 fann vi att ljudkänslighet sjönk avsevärt. Genom att fästa en aluminiumfolie i ramen så att den nuddade vid fiberlasern fick vi dock upp känsligheten avsevärt igen. Vi har gjort ett antal inspelningar där vi fångat upp ljud ifrån labbet och vi har funnit det möjligt att med efterfiltrering rekonstruera ljud så att det "låter som förväntat" och inte förvrängt. Efterbehandlingen består av att integrera signalen och kompensera för radiomottagarens frekvenskaraktäristik. De senare är naturligtvis inte nödvändigt för att återställa en korrekt ljudbild. Däremot måste integration göras, eller snarare en division med frekvensen om operationen görs i frekvensplanet, eftersom den fasmodulerade signalen demo-

duleras med en FM demodulator. I figur 23 visas typiska spektra erhållna för musik från datorhögtalarna på cirka 4 meters avstånd.



Figur 22. Överhörningsmätning. Ton med 2.2 kHz frekvens applicerad på FLS#4.



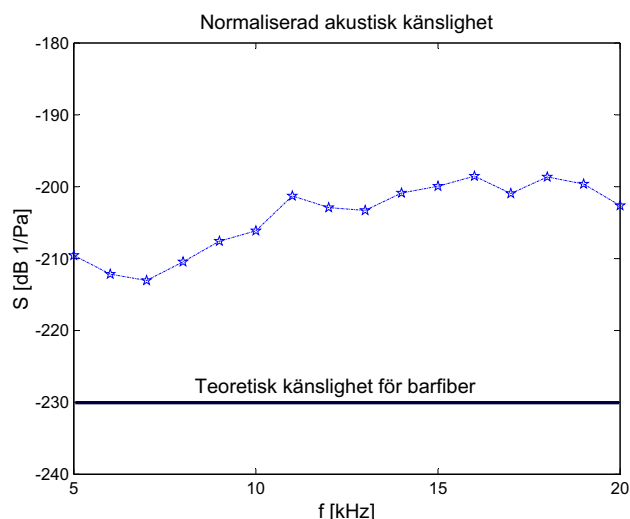
Figur 23. Spektra för akustisk signal uppfångad med fiberlaser; klassisk musik från datorhögtalare på ett par meters avstånd, samt utan musik.

Det är inte omöjligt att det även går att bygga bra mikrofoner med tekniken. Det ligger dock utanför det här projektets ansvarsområde.

En effekt som vi noterade i samband med dessa prover är att vibrationssignaler kan förmedlas längs med den optiska fibern mellan fiberlasrarna. Då vi rörde på fibern en meter från fiberlasern uppstår tydliga skrapljud i givaren. Fibern fungerar i princip som en sträng eftersom den är så styv. Det gick emellertid att dämpa bort ljud som uppstod på detta vis genom att klämma på fibern nära fiberlasern. Den här effekten kommer att vara viktig att tänka på när givarna skall börja användas i mer praktiska prov.

Ljudupptagningar i vatten

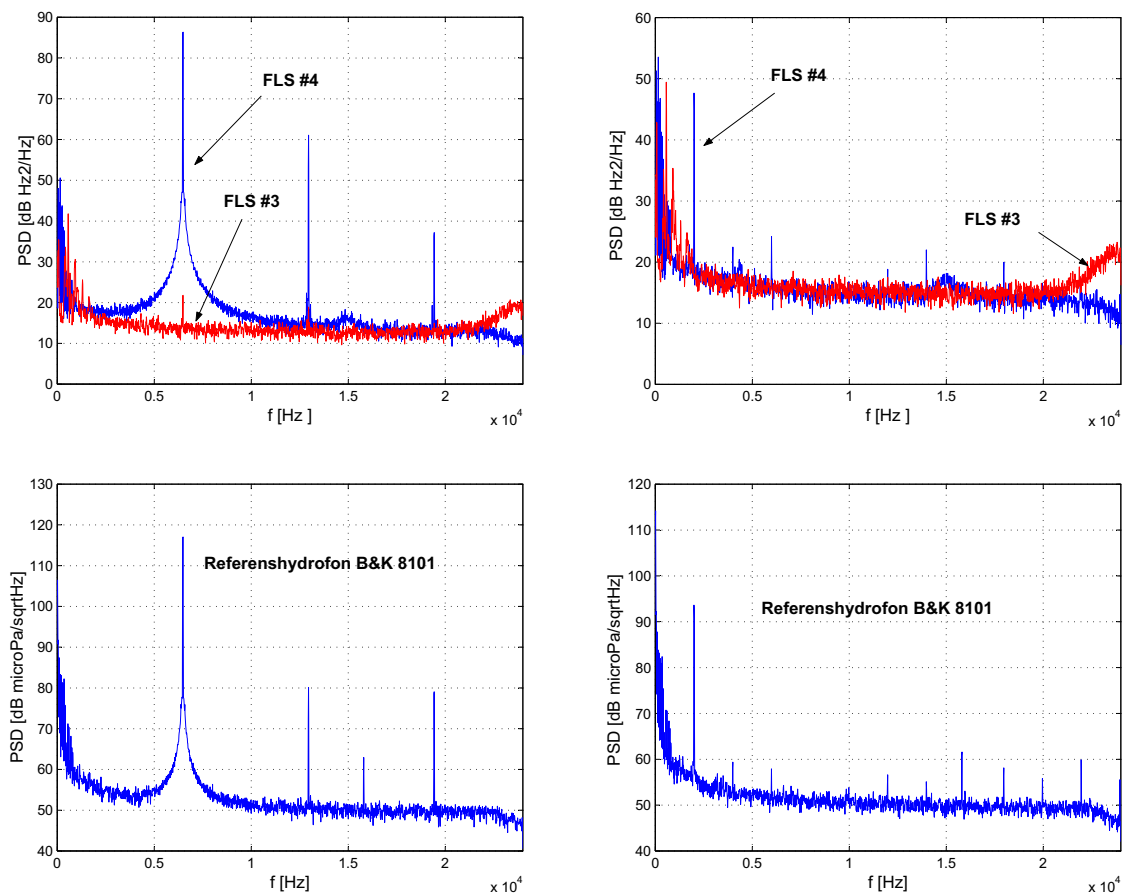
Som ett första prov på fiberlasrarnas hydroakustiska känslighet har vi sänkt ned en av fiberlasrarna i den lilla vattentank, på cirka 1 m³, vi har i Linköpingslaboratoriet. En enklare känslighetskaraktärisering utan anspråk på noggrannhet genomfördes. I den här mätningen har vi även kunna få ytterligare ett kvitto på att överhörningen är låg (åtminstone från FLS #4 till de övriga). I figur 24 visas den uppmätta frekvenskaraktärstiken för den nakna fiberlasern (dock med akrylatmantel).



Figur 24. Uppmätt känslighetskaraktärstik för FLS #4. Den normaliserade känsligheten S kan tolkas som töjning som funktion av akustiskt tryck. För att omvandla enheten till laserfrekvensdeviation som funktion av tryck multipliceras med laserfrekvensen 100 THz (+280 dB).

Mätningen gjordes med pulsteknik där svaret från en standardhydrofon (B&K 8101) jämfördes med fiberlasersignalen. Signalerna alstrades med en centralt placerad sändarhydrofon (ITC 1002) och referenshydrofonen och fiberlasern hängde på var sin sida på ett avstånd av 0.4 meter. Vi spelade in en serie med skurar (bursts) och jämförde signalerna med varandra. Vi ser att känsligheten för fiberlasern överstiger den teoretiskt beräknade. Denna skillnad kan ha flera orsaker varav en möjligen kan vara mätfel. Eftersom mättanken är så liten blir pulslängden under vilken man kan mäta amplitudsvaret mycket kort. Givarna hinner inte svänga in sig i stabilt tillstånd och mätningen blir osäker. Osäkerheten var störst för svaret på fiberlasern som inte hann anta formen av den utsända sinusfunktionen. Möjligen kan resonanseffekter göra att vi överskattat signalamplituden. Våra dåligt kalibrerade hydrofoner kan också ge upphov till systematiska avvikelser. En annan möjlig orsak, som kanske är mer väsentlig att ta i beaktande i nuläget är att fiberlaserns känslighet kan påverkas av hur den är upphängd. I vårt fall satt den löst uppspänd i plastramen enligt figur 5. Även om den satt löst uppspänd så kan det inte uteslutas att dess mekaniska egenskaper påverkas av ändefferter. En säkrare tolkning får anstå tills att en noggrannare mätning genomförs under det kommande året, exempelvis i Ursviks tanklaboratorium. Det är inte uteslutet att själva monteringen av fibern avsevärt kan öka känsligheten för sensorn.

I figur 25 jämförs kontinuerliga signaler upptagna i tanken. Eftersom ljudfältet är kraftigt reverberant i den lilla tanken är möjligheten stor att ljudtrycket är olika på olika positioner i tanken. Vi gör således återigen en kvalitativ jämförelse av signalen från fiberlasern med referenshydrofons signal. I ena mätningen är frekvensen 6480 Hz och ljudtrycket uppmätt med referenshydrofonen cirka 130 dB re 1 μ Pa. I andra mätningen är frekvensen 2000 Hz och ljudtrycket cirka 100 dB re 1 μ Pa. Vi noterar dels att vi har ungefär samma signal till brusförhållande för de båda givarna samt att fiberlasersignalen är fri från nämnvärd distortion. Dels ser vi att signalen på FLS #3 vid 6480 Hz mätningen är mer än 60 dB under signalen på FLS #4 vilket visar att överhörningen är låg.



Figur 25. Effekttäthetsspektrum för akustiska signaler uppmätta med fiberlaser och referenshydrofon. Fiberlaser FLS #4 är den som är nedsänkt i vatten, FLS #3 ligger ovanför vattenytan. Fiberlasersvaren är angivna i enheten $\text{dB Hz}^2/\text{Hz}$ som ger spektraltätheten i termer av laserfrekvensdeviation.

Övriga mätningar

Den detekterade optiska medeleffekten var förhållandevis låg, kring $10 \mu\text{W}$. Med specificerade uteffekter från fiberlasrarna kring 0.2 mW kan vi förvänta oss att lite mer återstår efter passage genom det fiberoptiska systemet. Detta är visserligen inte något direkt problem men det kan vara bra att känna till var den optiska effekten tar vägen. Då vi undersökte detta närmare fann vi att den akustooptiska modulatorens inte fungerade som den skulle och transmittade avsevärt mindre än vad som var specificerat. Det visade sig att RF oscillatoren som driver modulatorens inte gav specificerad uteffekt på 1 W vid 100 MHz . Vi har en förstärkare som vi kan sätta in men vi har inte velat göra det än för att inte äventyra modulatorens eftersom vi bara har en och är starkt beroende av den. Problemet aktualiserade dock ett behov av att köpa ytterliggare en modulator eftersom det är en kritisk komponent för våra mätningar. Om möjligt gör vi det under nästa budgetår. Mätningarna visade annars på förväntade förluster i form av kontaktdämpning och

en 3 dB förlust i interferometer. Den största källan till fel visade sig vara att vi driver fiberlasrarna med väsentligt mindre optisk pumpeffekt än vad de är specificerade för. De lyser helt enkelt svagare, cirka 10 dB under det specificerade värdet, men ändå fullt tillräckligt. Det är inte säkert att den mindre pumpeffekten förklarar hela skillnaden. Det kan möjligen också vara att den svetsning som vi själva utfört inte är perfekt. Det finns dock inget annat som tyder på att svetsningen skulle vara dålig men det kvarstår som en liten osäkerhet.

Sammanvägt resultat

De viktigaste som framkommit under året är att den seriella fiberlaserarrayen visar sig fungera som önskvärt i det prover vi hittills genomfört. Det optiska bruset från lasrarna håller acceptabelt låg nivå. Brusnivån tycks inte nämnvärt överstiga den vi tidigare uppmätt från enkla fiberlasrar.

Överhörningen mellan sensorerna är låg, mindre än 60 dB vilket är bättre än vad som skulle krävas i en antenntillämpning.

Ett problem som vi visserligen var medvetna om tidigare är att fiberlasrarna kan börja självsvänga kraftigt. Vi har sett effekten och noterat att den beror starkt av pumplaserparametrarna, våglängd och effekt. Det har visat sig möjligt att motverka självsvängningar genom att ändra pumpparametrarna. Fiberlasrarna tycks hamna i självsvängning då särskilda villkor uppfylls. Vår erfarenhet från året är att problemet är hanterbart. Frågan är om det förvärras om antalet lasrar ökas.

De optiska mätningarna genomfördes under kontrollerade former på optisk bänk och det kan möjligen vara så att nya problem dyker upp då vi arbetar friare med fiberlaserarrayen.

Avseende de akustiska gränssnitten har vi haft ett visst bakslag genom att vi tidigt under året använde en metod för att kapsla in fiberlasrarna som medförde viss risk för att ha sönder fiberlasrarna under monteringsfasen. En fiberlaser gick sönder och vi beslutade oss för att istället för att klämma fast komponenter på den optiska fibern limma dem. Mot bakgrund av de mätningar som tidigare gjorts tror vi oss nu ha en metod som ska ge den mekaniska förstärkning som krävs för att detektera signalnivåer ned till "Sea State Zero". Vi har dock ännu inte lyckats genomföra skarpa prover med fiberlasrar vilket vi delvis har sett som en kostnadsfråga.

Signalbehandlingen baserat på heterodyndemodulering har visat sig fungera mycket tillfredställande. Vad som möjligen kan vara ett problem är ett begränsat dynamiskt område. Annars fungerar FM demodulering bra genom att den anpassar signalområdet till det 1/f brusförhållande som förväntas råda i tillämpningen. Det är enkelt att återskapa en linjäriserad utsignal. Med anpassad digital filtrering kan vi enkelt modifiera såväl frekvens som färg för att erhålla önskad utsignal, dvs. en signal som exakt avspeglar det akustiska tryckfältet.

Slutsatser

Inget tyder på att det skulle vara omöjligt att bygga väl fungerande lågviktssläpsonarer. Det är enkelt att bygga ett system som detekterar ned till det fundamentala optiska brusgolvet och det tycks inte uppstå markant överhörning i den optiska domänen.

Det viktigaste i nuläget är att etablera ett sensorgränssnitt som ger acceptabel mekanisk förstärkning vilket ännu inte visats experimentellt.

Det är svårt att egentligen dra några slutsatser om hur många lasrar som kan kaskadkopplas. Det väsentligaste

problemet tycks vara de självsvängningar som uppstår. Den processen behöver vi förstå bättre för att kunna extrapolera våra mätresultat till större arrayer. För att reda ut detta finns då två vägar, att mäta eller att genomföra fördjupad analys av självsvängningar. Oberoende av vilket finns det skäl att göra det i viss samverkan med lasertillverkaren som självklart har god kännedom om problematiken och kanske redan kan bedöma var gränsen för antalet kaskadkopplade lasrar går. Frågan är hur djupt vi själva skall gå vad gäller den optiska analysen mot bakgrund av de begränsade resurser som står till förfogande.

Heterodyndemodulering med FM demodulatorer har fungerat mycket bra och kan mycket väl vara en bra slutlig lösning. En viktig aspekt kan vara att tillse att FM demodulatorerna dynamiskt låser mot en varierande RF bärvåg. När väl laserfrekvensen börjar moduleras av långsamma storskaliga signaler som kan uppstå pga. plötsliga temperaturförändringar och statiska tryckändringar behöver FM demodulatorerna kunna låsa mot en instabil RF bärvåg.

Samarbetsplaner

Vi har under året fört diskussioner med Norska FFI om eventuellt samarbete. De har dock för närvarande ingen direkt verksamhet på fiberlasersensorområdet däremot på en hel del andra områden inom fiberoptisk sensortechnik där de är mycket bra. Vi har inte kommit till något konkret samarbete och det är osäkert om det för närvarande skulle vara till gagn för oss då vi inte jobbar i samma spår.

Med såväl de forskare som arbetar med fiberlasersensortechniken på NRL och på QinetiQ har vi diskuterat tekniken och berättat lite om de planer vi har. Såväl forskarna från NRL och QinetiQ berättade om att de påbörjade nya (3 åriga) forskningsprogram kring fiberlasersensortechniken. Här finns klara möjligheter till samordningsvinster. Det som skall till är dock att vi har något att erbjuda från vår sida vilket vi tror kan bli vår fördjupade kunskap om hur vi så småningom konstruerar akustiska gränssnitt. Vad gäller den optiska tekniken ligger båda labben generellt sett före oss. Särskilt NRL har genom åren lagt betydliga resurser på att studera fiberlasersensorer.

För närvarande har det danska företaget Koheras A/S en central roll när det gäller fiberlasersensorer. De är främst i världen på att göra den här typen av fiberlasrar. Med dem har vi under året haft pågående diskussioner om eventuell samverkan kring mekaniska konstruktioner som kopplar eller frikopplar ett omgivande akustiskt fält till fiberlasern. De är (förutom sensortillämpningen)

intresserade av att konstruera stabila lasrar genom att kapsla in dem på ett sådant sätt att omgivningens inverkan minimeras. En närmare kontakt med dem tog vi inledningsvis för att vi trodde det skulle vara en fördel att applicera eventuella gränssnitt samtidigt som fiberlasrarna tillverkades. Även om vi nu tror att vi själva kan bygga givare efter leverans av fiberlasrarna till oss är det förmodligen fördelaktigt att så småningom göra allt på en gång. Konkret diskuterar vi att eventuellt skapa ett samarbetsprojekt med syfte att utveckla mekaniska anordningar för fiberlasrar. De har en doktorand som de vill placera hos oss under en begränsad tidsperiod.

Status är för närvarande att FOI Juridik undersöker formerna för ett eventuellt kommersiellt avtal med dem. Vi har tidigare försökt upprätta ett avtal via ett MoU (Memorandum of Understanding) med bl. a. Danmarks motsvarighet till FOI, FOFT men det gick ej beroende på att FOFT inte kunde ställa upp som en slags mellanhand. Vi avvaktar således fortfarande tills vi får reda på hur en samverkan i praktiken ska gå till.

Framtidsutsikter

Nästa år

Vi räknar med att nästa år kunna genomföra demonstrationer i Ursviks tanklaboratorium. Antingen med enstaka element eller med en fyrkanalsarray i vatten. Vi har ännu inte identifierat några problem som skulle göra en sådan demonstration omöjlig. Det är dock värt att poängtera att det trots allt kan uppstå en del svårigheter i att prova systemet under mer verklighetslika förhållanden. Risken i de mål vi kommer att sätta upp kommer inte att vara obetydlig.

Fokus hamnar kanske i större utsträckning än under nuvarande år på att få fram ett väl fungerande akustiskt gränssnitt. Vi avser att köpa det antal fiberlasrar som krävs för att klart visa att de här sensorerna kan fungera. Vi kommer möjligen också att kunna köpa en ny fyrkanalsarray och göra en enklare sensorkabel av den. Ambitionen kommer att vara att få den i vatten till en planerad demonstration.

Vad avser samarbeten hoppas vi på att vi kan etablera samverkan med Koheras. Därefter med QinetiQ och NRL

I ett längre perspektiv

Hydrofoner

Då vi visat att tekniken kommer att fungera och även klargjort dess begränsningar bör det här vara ett

område där vi skall sträva mot att få fram en operativ demonstrator så fort som möjligt. Det kan dock förutsättas finnas ett inslag av forskningsnära problem en bit in i framtiden men vi bör troligen ganska snart börja tänka i demonstratorbanor och tillämpa tekniken om än i liten omfattning.

Andra typer av sensorer

Ett mycket intressant forskningsområde vore att använda tekniken för att mäta andra fält för undervattens- men även andra tillämpningar. Det ligger nära till hands att tro att det går att göra högpresterande givare för akustiska signaler i luft (mikrofoner), seismiska signaler, magnetfält och elektriska fält. Vad gäller de två senare som ju är viktiga inom undervattensområdet har vi tidigare studerat fiberoptisk interferometri baserad på att koppla magnetostriktiva eller elektrostriktiva material till den optiska fibern. Ett problem har därvid varit att göra ett sånt gränssnitt med tillräckligt mycket fiber. Med en fiberlasersensor är det möjligt nå önskad detekterbarhet på den mycket korta sträcka som fiberlasern utgör. Det skulle därmed bli möjligt att förutom hydrofoner bestycka en tunn fiberoptisk släpkabel även med magnetsensorer och sensorer för elektriska fält. En inte helt ointressant multisensorkabel för små obemannade farkoster i vårt framtida undervattensförsvar.

Tackord

De som på olika sätt bidragit till årets resultat inom den här verksamheten i projektet "Spaningssystem mot marina mål" är:

Marie Andersson, inköp av optisk utrustning

Stig Gruffman, konstruktion av akustiska gränssnitt

Mattias Jönsson, korrekturläsning av rapport

Eva Norrbrand, rapportlayout

Fredrik Kullander, tekniskt ansvarig, rapportskrivning och optiska mätningar

Andreas Olsson, design och utprovning av akustiska gränssnitt

Jörgen Pihl, övergripande ansvar och planering

Stan Zyra, design och konstruktion av detektorer och FM demodulatorer.

Referenser

- [1] F. Kullander, B. Knuthammar, and M. Andersson, "Fiberoptisk hydrofonteknik, en översikt," FOI, Linköping FOA-R--00-01467-409--SE, Mars 2000.
- [2] F. Kullander and B. Knuthammar, "Fiber Laser Hydrophones, an Introductory Survey," FOI, Linköping FOA-R--00-01779-409--SE, December 2000.
- [3] M. Andersson and F. Kullander, "Mätningar av brusegenskaper i fiberlasersensorsystem," FOI, Linköping FOI-R--0313--SE, December 2001.
- [4] A. Olsson and F. Kullander, "Akustisk utprovning av ingjutningsmaterial för fiberoptiska hydrofoner," FOI, Linköping FOI-R--0314--SE, December 2001.
- [5] F. Kullander, "General purpose fiber optic hydrophones for shallow water applications," FOI, Linköping FOA-R--99-01102-409--SE, April 1999.
- [6] S. T. Vohra, A. Dandridge, C. C. Chang, G. A. Johnson, A. B. Tveten, and G. M. Nau, "High sensitivity pressure sensors utilizing advanced polymer coatings," presented at 13th international conference on optical fibre sensors, Kyongju, 1999.
- [7] J. Liljencrants, *Elektroakustik-Kurskompendium KTH*. Stockholm, 1993.
- [8] T. Volotinen, "The effect of wet and seawater environment on the performance and reliability of optical fibers, splices and couplers in hydrophone systems," FOI, Linköping FOA-D--99-00451-409--SE, Juni 1999.
- [9] E. Rønnekleiv, "Fiber DFB Lasers for Sensor Applications," in *Dept. of Physical Electronics*. Trondheim: Norwegian Univ. of Science and Technology, NTNU, 1999.