

Fiberoptisk hydrofonarray -utvärdering av teknik och möjligheter

**Fredrik Kullander
Mika Levonen
Per Morén
Andreas Olsson**

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Systemteknik 172 90 Stockholm	Rapportnummer, ISRN FOI-R--0950--SE	Klassificering Teknisk rapport
	Forskningsområde 4. Spaning och ledning	
	Månad, år September 2003	Projektnummer E6053
	Verksamhetsgren 5. Uppdragsfinansierad verksamhet	
	Delområde 43 Undervattenssensorer	
Författare/redaktör Fredrik Kullander Mika Levonen Per Morén Andreas Olsson	Projektledare Jörgen Pihl	
	Godkänd av Monica Dahlén	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning Forsvarsmakten	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig Fredrik Kullander	
Rapportens titel Fiberoptisk hydrofonarray -utvärdering av teknik och möjligheter		
Sammanfattning Ett prov med fiberoptiska hydrofoner genomfördes vid Oxdjupet 9 – 11 september 2002. Syftet med provet var i första hand att spela in experimentella data för att kunna utvärdera de fiberoptiska hydrofonernas prestanda vid mätning av mycket lågfrekventa signaler. Frågeställningen är om en signatur uppmätt med en fiberoptisk hydrofon kan ge en bättre klassificering än motsvarande signatur mätt med konventionella minsensorer. I rapporten jämförs experimentella data från fiberoptiska hydrofoner mätta vid olika fartygspassager med motsvarande data från både dynamisk tryckgivare och referenshydrofon. Nya erfarenheter från användandet av fiberoptiska hydrofoner vid fullskaleförsöket redovisas. Det höga ljudtrycket vid fartygspassage kom att orsaka oväntade störningar i signalen. I princip överstyrdes de fiberoptiska hydrofonerna vilket leder till att demoduleringsalgoritmen som använts upphör att fungera korrekt. En annan störning, en lågfrekvent svängning i området kring 2 Hz, som registrerades med de fiberoptiska hydrofonerna observerades inte i någon av de konventionella referenssensorerna. En möjlig orsak till svängningarna kan vara brister i ingjutningen av hydrofonelementen. De störningar som finns i de fiberoptiska registreringarna har till stor del försvårat analysen och därmed jämförelsen med de konventionella sensorerna. Baserat på dessa resultat är det därför svårt att se några uppenbara fördelar med fiberhydrofonerna i minsensortillämpningar. Fiberoptisk teknik kan ha en fördel i det att stora, yttäckande hydrofoner kan byggas.		
Nyckelord Fiberoptisk sensor, hydrofon, interferometer, hydroakustik, minsensorer		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor 18	
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--0950--SE	Report type Technical Report
	Research area code 4. C4ISR	
	Month year September 2003	Project number E6053
	Customers code 5. Commissioned Research	
	Sub area code 43 Underwater Sensors	
Author/s (editor/s) Fredrik Kullander Mika Levonen Per Morén Andreas Olsson	Project manager Jörgen Pihl	
	Approved by Monica Dahlén	
	Sponsoring agency Swedish Armed Forces	
	Scientifically and technically responsible Fredrik Kullander	
Report title (in translation) Fibre optic hydrophone array -evaluation of technique and possibilities		
Abstract A field experiment with fibre optic hydrophones was conducted at Oxdjupe Sept. 9 – 11 2002. The purpose was to collect experimental data suitable for evaluation of the fibre-optic hydrophone performance characteristics, especially at lower frequencies. The question is, does a signature measured with a fibre-optic hydrophone have the potential to give better classification compared to a signature measured with a conventional mine sensor? In the report, we compare data from the fibre optic hydrophones measured at different ship passages with corresponding data from a dynamic pressure sensor and a reference hydrophone. Gained experiences from the use of fibre optic hydrophones in a full-scale experiment are summarized in the report. The high intensity caused by the passage of large ships gave unexpected disturbances in the signal. Basically, the fibre optic hydrophones were over-driven meaning that the used demodulating algorithm ceased to work correctly. Another disturbance, a low frequent oscillation around 2 Hz, observed in the fibre optic hydrophone recordings was not at all visible in the reference recordings. A possible explanation of these oscillations can be related to defects in the embedment of the hydrophone elements. The disturbances in the fibre optic signals have to a great extent complicated the analysis and by that the comparison with the reference sensors. Based upon these results we have not found any advantages of fibre-optic hydrophones for the use in mine sensor applications. However, fibre-optic techniques could make it possible to construct new types of hydrophones such as large, area covering sensors.		
Keywords Fiber optic sensor, hydrophone, interferometer, hydroacoustics, mine sensor		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 18	
	Price acc. to pricelist	

Innehåll

1. Inledning	5
1.1 Bakgrund	5
2. Försöksbeskrivning	7
2.1 Mätplats	7
2.2 Utrustning	7
2.3 Fartygspassager	10
2.4 Registreringar	10
3. Mätdata	11
3.1 Identifierade fel i signalerna	13
3.2 Fördjupad spektralanalys	15
4. Slutsatser	16
4.1 Bedömning av proven vid Oxdjupet	16
4.2 Allmän bedömning	17
5. Referenser	18

1. Inledning

Ett prov med en 4-kanalig fiberoptisk hydrofonkedja genomfördes vid Oxdjupet mellan den 9 – 11 september 2002. Syftet med provet var i första hand att utvärdera de fiberoptiska hydrofonernas prestanda för registrering av mycket lågfrekventa akustiska signaler. I samband med ett antal olika fartygspassager registrerades signaler från de fiberoptiska hydrofonerna parallellt med signaler från vanlig hydrofon, tryckgivare, temperaturgivare samt elektroder. Avsikten med det jämförande provet var att undersöka om den signatur som uppmättes med de fiberoptiska hydrofonerna kan ge ett bättre underlag för en säkrare klassificering. Till grund för detta särskilda intresse ligger framförallt minsensortillämpningen.

Provet vid Oxdjupet gav samtidigt en möjlighet att mer generellt värdera tekniken och specifikt det fiberoptiska hydrofonsystem som vi tagit fram. Mätningarna utgör slutet på flera års arbete med just den här typen av fiberoptiska hydrofoner och vi ger därför också en allmän bedömning av tekniken.

1.1 Bakgrund

Fiberoptiska hydrofoner har studerats på FOI sedan början av 90-talet och på andra försvarsorienterade forskningslaboratorier främst i USA och England sedan slutet av 70-talet [1]. Det är flera aspekter av tekniken som gjort den intressant att studera. Eftersom signaler i optiska fibrer propagerar med liten dämpning, nedåt 0,2 dB/km, kan mycket vidsträckta sensorsystem realiseras utan kraftförsörjning. Det är möjligt att nå flera tiotals mil utan elektriska komponenter. Med endast en eller ett fåtal optiska fibrer kan dessutom nätverk med hundratala sensorer konstrueras genom utnyttjande av optisk multiplexeringsteknik. I och med att systemen inte kräver elektriska komponenter har de potential att bli mycket åldringsbeständiga, störtåliga och avlyssnings-säkra. Uppfångade signaler omvandlas direkt till optiska signaler i fibrerna. Dessa är mycket svåra att komma åt om man inte har fysisk kontakt med den optiska fibern. En drivkraft avseende tekniken har alltså varit möjligheten att göra stora sensornätverk. I tillämpningen tänker man då kanske främst på bottenfasta system som kan ligga ute länge utan underhåll. Den internationella trenden vad gäller denna typ av system har dock även varit snabbt utläggbara system och släpsonarer där man också kan dra nytta av fiberoptiska sensorers inneboende egenskaper.

Hydrofoner har genom åren fått störst uppmärksamhet tack vare hydroakustikens betydelse inom undervat-

tensområdet. Då det gäller mer kvalificerade sensorer baserade på interferometrisk mätteknik har dock även andra sensorer varit föremål för betydande forskningsinsatser. Högekänsliga sensorer för elektriska och magnetiska fält är de som ligger närmast det här området. Än så länge har dessa sensorer utnyttjat någon form av elektrisk koppling vid själva sensorn vilket till viss del undergrävt fördelen med en fiberoptisk sensor. Här har dock andra egenskaper varit drivande. För magnetiska sensorer t ex var det från början helt och hållet en prestandafråga. Eftersom en fiberoptisk interferometer kan göras mycket känslig fanns också möjligheten att få den att mäta mycket svaga magnetiska störningar. Sensorprestanda har varit en fråga även då det gäller hydrofoner. Framförallt lyfts den potentiellt höga känsligheten fram som en karaktäristisk egenskap men även då det gäller frekvensomfång, lågfrekvenskaraktäristik och dynamik finns potential för högpresterande sensorer. Till viss del beror dessa egenskaper på hur den interferometrisk tekniken tillämpas och det kan ibland vara nödvändigt att förbättra en egenskap på bekostnad av andra.

Då det gäller lågfrekventa signaler är det viktigt att undertrycka drift som uppstår på grund av annan inverkan än tryckvariationer. Ett exempel är termisk inverkan som är svår att undertrycka då den optiska väglängden i fibrerna är starkt beroende av temperatur. Eftersom en interferometer är ett relativmätande instrument där optisk fas från en fiber(lindning) jämförs med optisk fas från en referensfiber(lindning) kan dock detta kompenseras bort genom att utforma och placera referensfiberlindningen så att den utsätts för samma störningsinverkan som den tryckkännande fibern.

För punktformiga hydrofonelement i antennkonfigurationer har hydrofoner som motsvarar konventionella piezoelektriska antennelement prestanda oftast varit fullt tillräckligt. Även om det går att konstruera extremt känsliga hydrofoner har detta inte varit något som kommit fram som ett entydigt användarbehov. En aspekt på tekniken som däremot rönt inte obetydligt intresse ifrån användare är den geometriska mångfalden. Hydrofonerna behöver inte vara punktformiga i det akustiska fältet utan kan anta formen av linjer, ytor eller mer komplex geometri för att lösa olika former av signalbehandlingsproblem, kanske bara en så enkel sak som att täcka in större områden med färre sensorer. Plana hydrofonarrayer för skrovmontering är det som främst studerats. En rad andra tillämpningar är tänkbara och inte helt utforskade.

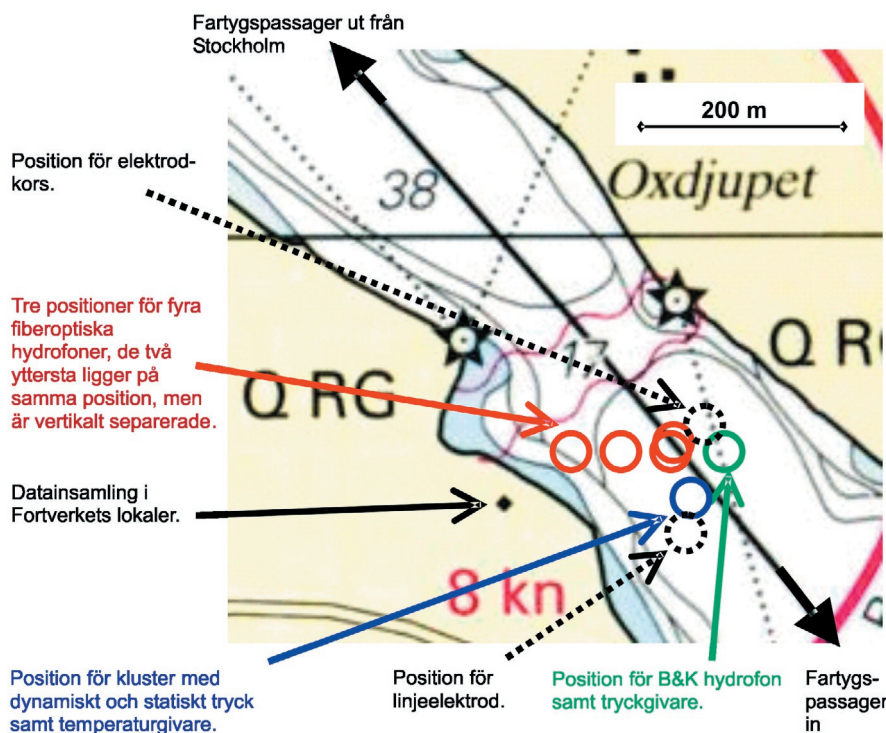
Fiberoptiska hydrofonsystem av interferometrisk typ utvecklas i dag av försvarsindustrin i USA i samverkan med NRL (USA) och Qinetiq (UK). För vår del i Sverige har studierna av den här tekniken dels renderat i djup kunskap och förståelse för tekniken vilket har gjort det möjligt att värdera den för marina tillämpningar men också, i relativt sett liten skala, egenutvecklad utrustning som använts i demonstrationssyfte. Det mesta av vårt arbete med den här tekniken finns dokumenterad i [3-5]. I [4] beskrivs den utrustning med fyra fiberhydrofoner som provades vid Oxdjupet utanför Vaxholm mellan den 9:e och 11:e september 2002 och jämfördes med konventionella sensorer [2]. Vi har nu signalbehandlat data från försöket och presenterar resultaten i denna rapport.

Det direkta syftet med försöket var alltså att studera fiberhydrofonernas lågfrekvenssegenskaper. Eftersom signalerna registreras i en och samma vågform från DC till högsta frekvenskomponent underlättas studiet av eventuella faskopplingar samt högre ordningens analys vid låga frekvenser. Piezoelektriska hydrofoner måste i regel AC kopplas för att undvika att långsamma tryckvariationer överstyr signalförstärkare.

2. Försöksbeskrivning

2.1 Mätplats

Försöksplats var det trånga sundet Oxdjupet som förbinder Stockholms inre och yttre skärgård. Genom sundet, som på sina smalaste delar bara är drygt 200 m brett, går fartygsleden till och från Stockholms hamn. Fartygspassager genom sundet är hastighetsbegränsade till 8 knop. Sensorerna placerades i farleden utanför Fortifikationsverkets lokaler på Rindö, se figur 2.1, vattendjupet var här mellan 20 och 30 m.



Figur 2.1 Översiktlig karta över provområdet i Oxdjupet.

Två fiberoptiska hydrofoner monterade i ett vertikalt par, den översta 3,6 m över botten och den undre 2,0 m över botten, sjösattes mitt i farleden där vattendjupet var ca 30 m. Två andra fiberhydrofoner placerades ca 50 m respektive 100 m från det vertikala hydrofonparet, båda på en höjd av 1,5 m över botten, se figur 2.2. Intill fiberhydrofon nr 3, placerad ca 50 m från hydrofonparet, fanns också en temperaturgivare monterad. Som referenshydrofon användes en Brüel & Kjær typ 8101, (B&K) som sattes mitt i farleden, 50 m öster om det fiberoptiska vertikala paret, jfr tabell 2.1. Referenshydrofonens höjd över botten var 1,5 m. Under referenshydrofonen, 0,2 m över botten, fanns även en tryckgivare monterad. Två andra tryckgivare, för statiskt respektive dynamisk tryckmätning, placerades tillsammans med en temperaturgivare i ett samlat kluster på botten 50 m sydost om det fiberoptiska hydrofonparet, tabell 2.1

I denna del av Oxdjupet fanns sedan tidigare även ett antal av FOIs elektrodsystem utlagda (i samband med ett försök som genomfördes 1997) och anslutningskablar till dessa var tillgängliga i Fortverkets lokal. Två av dessa elektroder, ett korsformat elektrodpar (två kanaler) samt en linje-elektrod (en kanal), fungerade fortfarande och användes vid mätningarna. Positionerna av de inkopplade elektroderna är hämtade från dokumentationen av försöket som genomfördes 1997. Övriga sensorer mättes in med en handhållen GPS både vid utläggningen och vid upptagningen, se tabell 2.1. Vattnets ljudhastighetsprofil uppmättes båda försöksdagarna, se figur 2.3.

Deltagare vid mätningarna var från FOI; Per Morén (försöksledare), Andreas Olsson (datainsamling fiber), Fredrik Kullander (del av tiden, datainsamling fiber), Stig Gruffman (protokoll vid utkik fyren), Peter Lindqvist (trycksensorer), Lennart Crona (del av tiden, för inkoppling av elektroder) och

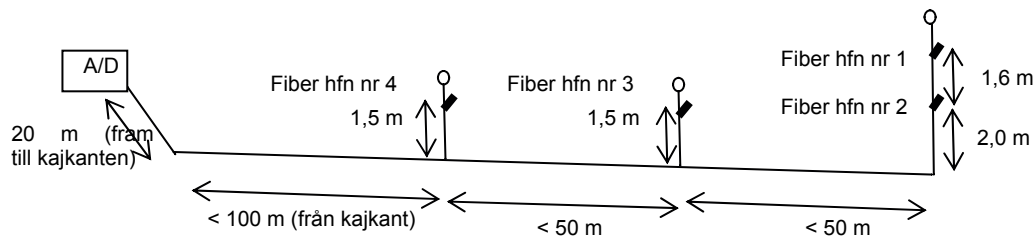
Jörgen Pihl (del av tiden för MOSES datainsamling). Utläggning och upptagning av sensorsystemen utfördes med hjälp från Amf 1 av Göran Andersson som förare av en G-båt. Utrustning för datainsamlingen var placerad i Fortifikationsverkets lokaler.

Jörgen Pihl (del av tiden för MOSES datainsamling). Utläggning och upptagning av sensorsystemen utfördes med hjälp från Amf 1 av Göran Andersson som förare av en G-båt. Utrustning för datainsamlingen var placerad i Fortifikationsverkets lokaler.

Jörgen Pihl (del av tiden för MOSES datainsamling). Utläggning och upptagning av sensorsystemen utfördes med hjälp från Amf 1 av Göran Andersson som förare av en G-båt. Utrustning för datainsamlingen var placerad i Fortifikationsverkets lokaler.

2.2 Utrustning

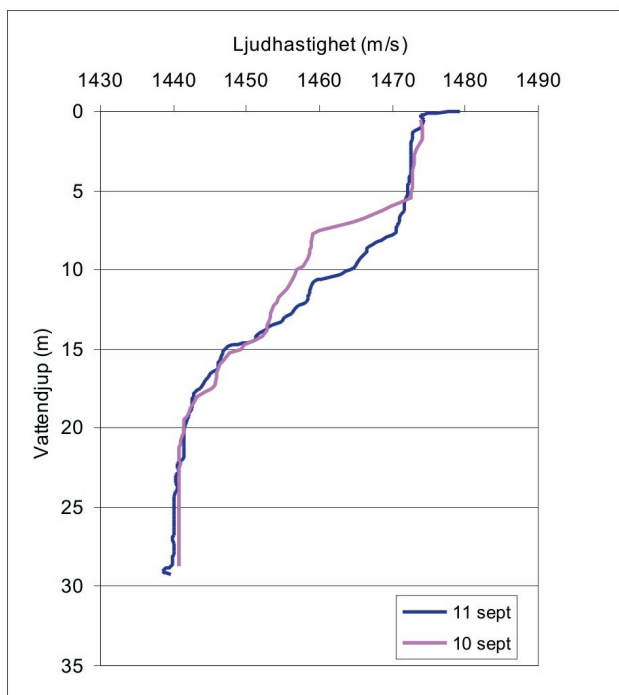
Den fiberoptiska hydrofonkedjan finns beskriven i en tidigare rapport [4]. Kedjan innefattar fyra identiska interferometriska fiberoptiska hydrofoner. Hydrofonerna är utformade som Mach-Zehnder interferometrar med en mätfiber och en referensfiber lindade på spolar



Figur 2.2 Schematisk bild som visar de fiberoptiska hydrofonernas inbördes placering under försöken.

Sensor, sensorgrupp	Position N (GPS)	Position E (GPS)	Vattendjup
Fiberhfn nr 1 och 2 (array)	59 23,89' N (utläggning)	18 26,44' E	ca 30 m
	(59 23,88' N, upptagning)	(18 26,43' E, upptagning)	
Fiberhfn nr 3 (samt tempgivare)	59 23,89' N	18 26,40' E	ca 27 m
	(59 23,88' N, upptagning)		
Fiberhfn nr 4	ca 100 m från land i riktning mot nr 3 och array		
	59 23,89' N (uppskattat)	18 26,36' E (uppskattat)	ca 21 m
		(18 26,35' E, upptagning)	
Hydrofon B&K och statiskt tryck	59 23,88' N	18 26,49' E (utläggning)	ca 30 m
		(18 26,44' E, upptagning)	
Kluster med tryckgivare	59 23,87' N	18 26,46' E (utläggning)	ca 30 m
		(18 26,44' E, upptagning)	
Elektroder, Korset kanal 1 & 2	59 23,888' N (mätt 1997)	18 26,470' E (mätt 1997)	
Elektrod, Linje kanal 3	59 23,860' N (mätt 1997)	18 26,450' E (mätt 1997)	

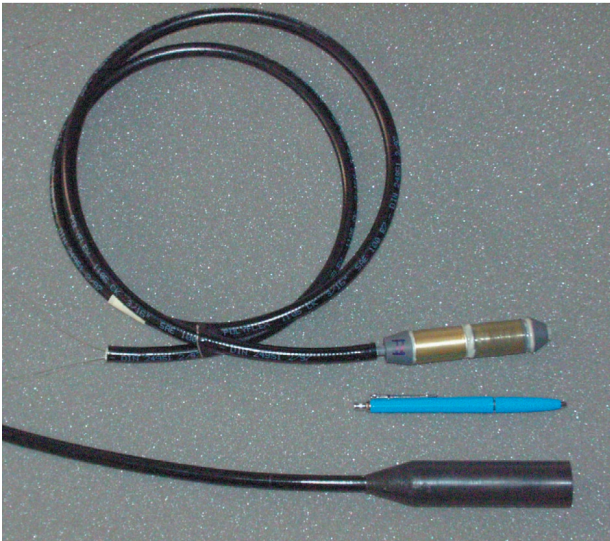
Tabell 2.1 Uppmätt position för samtliga tillgängliga sensorer.



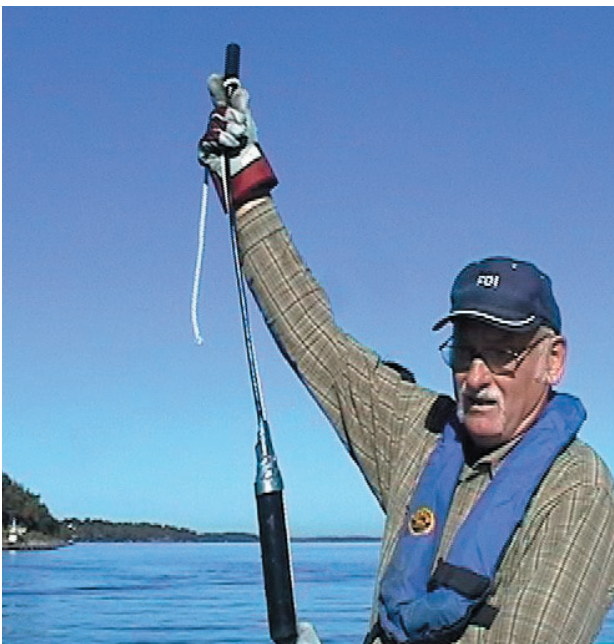
Figur 2.3 Jämförelse av ljudhastighetsprofilerna under de två försöksdagarna.

intill varandra i det cylinderformade hydrofonelementet som är cirka 7 cm långt och 3 cm i diameter, se figur 2.4.

Referens och mätfiberlindningarna var lika långa, ca 34 meter. Genom att mätfiber är lindad på en relativt elastisk spole jämfört med referensfibern åstadkommer tryckvariationer olika mycket töjning i de två spolarna. Den relativa töjningen ger ett optiskt fasskift som kan avläsas interferometriskt. I kabeln används fiberoptiska 3x3 kopplare, en för varje sensor, för att möjliggöra passiv demodulering av interferenssignalen, se [3]. Kabelkedjan är 270 meter lång med förgreningar för varje hydrofon. Den första kommer efter 120 meter och därefter sitter de med 50 meters mellanrum. Hydrofonerna betecknas FOH nr 1 till nr 4 med nr 1 monterad i den yttre änden på kabeln, figur 2.5. En väsentlig detalj vad gäller fiberoptiken är att de fiberoptiska kopplarna som utgör början och slut på varje interferometer är placerade vid kabelarrayens förgreningar. Därigenom är kabelbiten mellan förgreningen och hydrofonen känslig för ljudtryck. För att minimera inverkan från störningar går fibrerna där tätt intill varandra. I fiberkabeln går



Figur 2.4 Övre delen av fotot; en blottlagd fiberoptisk hydrofon med dess referensspole och mätpole. Den nedre detaljen visar en gummi-ingjuten fiberoptisk hydrofon. Kulspetspennan fungerar som måttreferens i bilden.

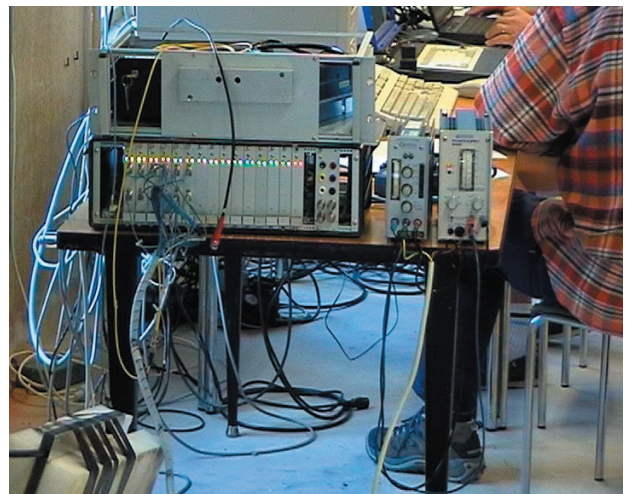


Figur 2.5 Den fiberoptiska hydrofonen som sitter i den yttersta änden på kabelarrayen, dvs nr 1. Det var också den hydrofon som kom att ligga närmast fartygen vid passagen.

separata fibrer till och från varje hydrofon. Det betyder att fyra fibrer används för laserljus ut till givarna och tre fibrer från varje hydrofon för ljuset tillbaka.

I kabelsystemet används tre separata fotodetektorer för varje hydrofon. Efter varje fotodetektor sitter en krets som delar upp signalen i en högpasfilterad

(100 Hz) och 20 dB förstärkt del samt en lågfrekvent del. Detta för att möjliggöra ökad upplösning vid lite högre frekvenser där den omgivande brusnivån i vattnet kan vara lägre. I de här försöken användes inte de högpasfilterade kanalerna även om de spelades in, mätresultaten baseras enbart på den lågfrekventa delen. Signalerna filterades i analoga antivikningsfilter anpassade till ställd samplingsfrekvens. Laserkällan var en kontinuerlig fasttillståndslaser av typ Neodymium-YAG laser, fabrikat Amoco. Våglängden var 1320 nm och uteffekten 4 mW (figur 2.6).



Figur 2.6 Till vänster i bild ses ingångarna till fotodetektorkorten med fiberanslutningar samt filterkort. Utgången från denna enhet är kopplad till ett externt 16 bitars A/D-kort i datorn. Ovanpå denna enhet står YAG-lasern.

Efter anslutning av kabelarrayen med optoelektroniken utfördes en kalibrering av systemet för att ta hänsyn till eventuella optiska kontaktförluster och dylikt. I kalibreringsrutinen upprättas kalibreringsvärden som beskriver dämpningarna genom det fiberoptiska systemet. Kalibreringsvärdena användes sedan för att justera data och kompensera för dessa skillnader, så att man återskapar data med ett ursprung från ett idealt och symmetriskt trefasssystem. Det är även nödvändigt att säkerställa att man har tillräcklig optisk visibilitet i fibrerna, där t ex polarisation har en inverkan.

I optoelektroniken saknas helt en funktion för automatisk polarisationskontroll. Vi har i tidigare rapporter visat hur det kan göras, men ej haft resurser att implementera det i praktiken. För försök som dessa går det att klara sig utan denna kontroll eftersom det är liten sannolikhet för att polarisationsutsläckning skall uppstå. Detta går manuellt att kontrollera men man får räkna med att signal till brus förhållandet plötsligt kan sjunka dramatiskt pga av att polarisationsriktningarna

för de interfererande strålarna hamnar i nära ortogonala tillstånd.

Den referenshydrofon av typ Brüel & Kjær 8101, (B&K) som användes har en känslighet av $-183,7$ dB re $1\text{V}/\mu\text{Pa}$. Hydrofonen var ansluten till ett reglerbart förstärkarsteg och vidare till en 500 m lång kabel till land. De fiberoptiska signalerna jämförs även med dynamiska tryck uppmätta med tryckgivare typ PSI:KP-10 som har en känslighet av $0,33 \cdot 10^{-3} \text{ V/Pa}$ samt en statisk tryckgivare med känsligheten $1,11 \cdot 10^{-5} \text{ V/Pa}$.

2.3 Fartygspassager

Målfartyg utgjordes till största delen av större Finlandsfärjor, men även passager av ett antal mindre fartyg i skiftande storlek registrerades. Från den 10 september finns 12 passager av större fartyg och 2 mindre båtar registrerade från samtliga sensorer. Den 11 september blev 6 passager av större fartyg och en mindre båt registrerade från samtliga sensorer. Dessutom har några passager spelats in utan att alla sensorer samtidigt varit inkopplade, vilket gäller båda dagarna.

Vid varje passage försökte vi starta inspelningen någon minut innan fartyget nådde mitt över sensorerna, CPA (Closest Point of Approach), för att få en kontinuerlig inspelning före och efter fartygens CPA. Utsikten från den lokal där själva datainsamlingen ägde rum var starkt begränsad och för att kunna få förvarning om fartygspassage var vi tvungna att postera en utkik vid fyren Oxdjupet. Fartygens hastighet inför passagen av Oxdjupet fick uppskattas och kunde ibland vara svår att bedöma. Detta innebar också att inspelningsstarten ibland blev missbedömd och kom emellanåt att startas för tidigt eller för sent. Vid vissa fartygspassager förekommer passager av mindre båtar i nära anslutning till målfartygets CPA. Många registreringar kom att innehålla bakgrundsstörningar från den vägfärja som regelbundet går mellan Rindö och Värmdölandet där avståndet till sensorerna var ca 200 m. En annan störkälla som finns i några registreringar var grävarbeten som pågick vid fyren Oxdjupet. Avståndet från denna störkälla till närmaste fiberhydrofon uppskattas till ca 150 m.

2.4 Registreringar

Vid registreringarna användes två separata datorer, en för de fiberoptiska hydrofonerna och en andra för övriga referenssensorer. Datorernas klockor synkroniserades dagligen manuellt, pga klockornas olika inre drift blev den största uppmätta tidsskillnaden under mätningarna ca 2 s. Data från de fyra fiberhydrofonerna samlades in på 12 kanaler, antingen med 5, 10 eller 20 kHz samplingsfrekvens per kanal. Framförallt användes 5 kHz för att begränsa datamängden då inspelningarna i en del fall pågick upp till 20 minuter.

Referenssensorerna, (elektrodena, de tre tryckgivarna, de två temperaturgivarna samt B&K hydrofonen), anslöts som nio separata analoga signaler som innan digitalisering individuellt förstärktes och filtrerades. Statiskt tryck och de två temperaturgivarna lågpasfilterades vid 10 Hz, övriga sju signaler vid 1 kHz.

Efter filtrering digitaliserades signalerna med en samplingsfrekvens på normalt 5 kHz/kanal. Vid fyra passager registrerades data med 20 kHz/kanal. Inspelningarnas längd varierar mellan fem och tio minuter. För att för framtida bruk ha tillgång till bredbandiga signaturer gjordes båda dagarna några kompletterande högfrekventa mätningar med enbart B&K hydrofonen inkopplad på 400 och 500 kHz samplingsfrekvens, en minut långa och bandpassfilterade mellan 1 Hz - 100 kHz, (totalt fem passager och däremellan fyra mätningar av bakgrunds nivåer utan passager).

3. Mätdata

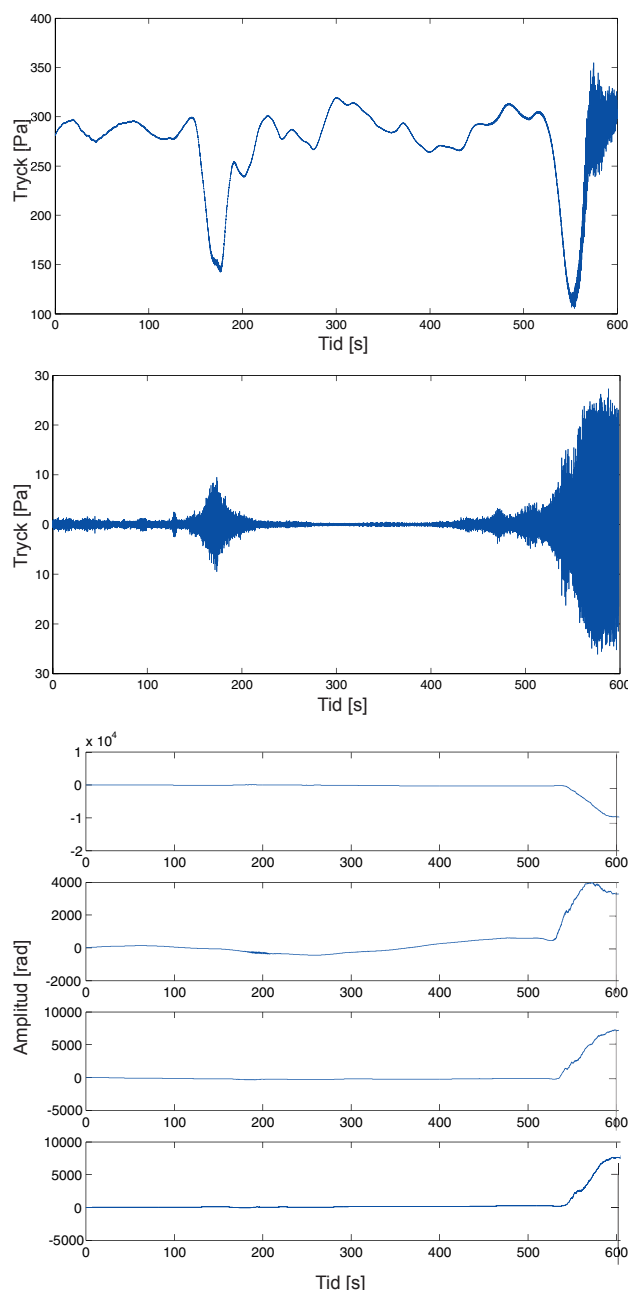
Då man lyssnar på ljudsignalerna som spelats in med hydrofonerna så får man ett intryck av en relativt god överensstämmelse mellan de fiberoptiska givarna och referenshydrofonen. I de flesta spektra finns samma spektrallinjer med och något så när liknande mönster framträder i spektrogrammen, särskilt för de givare som är placerade nära varandra. Det visar sig dock att signalerna i de fiberoptiska hydrofonerna, framförallt avseende lågfrekvensdelen är behäftade med allvarliga brister och fel. För att få fram en helhetsbild av resultaten har vi samlat ihop tids och frekvensdiagram för de relevanta givarna från varje passage. Här i rapporten presenterar vi data från två passager som är någorlunda representativa för hur signalerna såg ut. Som jämförelse till fiberhydrofonerna har vi valt att visa signalen från referenshydrofonen och den dynamiska tryckgivaren.

I tidsdomänen plottas de fyra fiberhydrofonsignalerna utan och med högpasstrerering från 20 Hz. För att underlätta plottningen nedsamlades samtliga data-serier, även registreringarna från referenssensorerna, till 1 kHz.

Figur 3.1 visar registrerade vågformer under loppet av 600 sekunder, då färjorna "Costa Romantica" och "Silja Festival" passerar ut från Stockholm. I registreringen från tryckgivaren, överst, ser vi på tiderna för färjornas passager karaktäristiska trycksänkningar på cirka 150-200 Pa. Även referenshydrofonen avspeglar tydligt de båda färjornas passager i form av amplitudtoppar kring 170 och 580 sekunder, varav den sista något avskuren i tid. Motsvarande utseende finns inte i de ofiltrerade fiberhydrofonsignalerna. I stället syns stora steg kring 550 sekunder vid tidpunkten för "Silja Festival" passagen. Vid tiden för "Costa Romanticas" passage syns jämförelsevis inga utslag. Vid zoomning av den passagen går det dock att se antydningar till variationer som liknar tryckgivarens signal. Dessutom stämmer inte nivåerna alls överens med de trycknivåer som uppmätts med tanke på att de fiberoptiska hydrofonernas känslighet är cirka 0,2 rad/Pa. De dynamiska tryckfallen på i storleksordningen 150 Pa motsvaras av fasskift på 20 radianer.

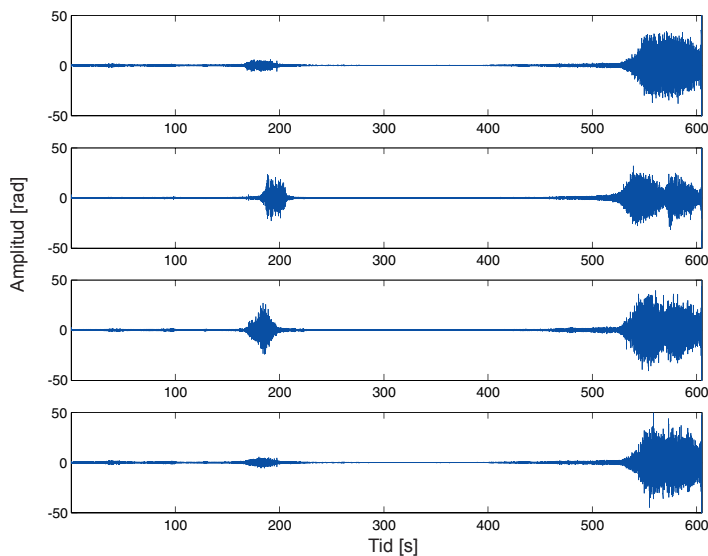
Efter högpasstrerering från 20 Hz försvinner nivåstegen i de fiberoptiska signalerna, figur 3.2, och överensstämmelsen med referenshydrofonen i figur 3.1 blir därmed tydligare. Men det är ändå mycket som är olika i fråga om amplitud som funktion av tiden.

I motsats till olikheterna i tidsdomänen visar diagrammen i frekvensplanet, figur 3.3, att hydrofonerna ger likartade svar bortsett från tidsperioder med överstyrning. De flesta spektrallinjerna upp till 100 Hz återfinns i såväl fiberhydrofondata, (i figuren visas endast



Figur 3.1 Registrerade vågformer för den dynamiska tryckgivaren (överst), referenshydrofonen (mitten) och de fyra fiberhydrofonerna (nederst) vid passage av färjorna Costa Romantica och Silja Festival ut från Stockholm.

nr 2), som referenshydrofondata. Fiberhydrofonernas spektrum liknar referenshydrofonens avseende signal till brus medan tryckgivaren ger väsentligt svagare signal. Mörka lodräta fält är en effekt av överstyrning och vi ser hur fiberhydrofonerna drabbas av det mitt under de två passagerna. Även referenshydrofonen var här överstyrd vid den sista passagen, dvs när "Silja Festival" passerar vid ca. 550 sekunder. Medan överstyrningen för referenshydrofonen består i att förstärkaren

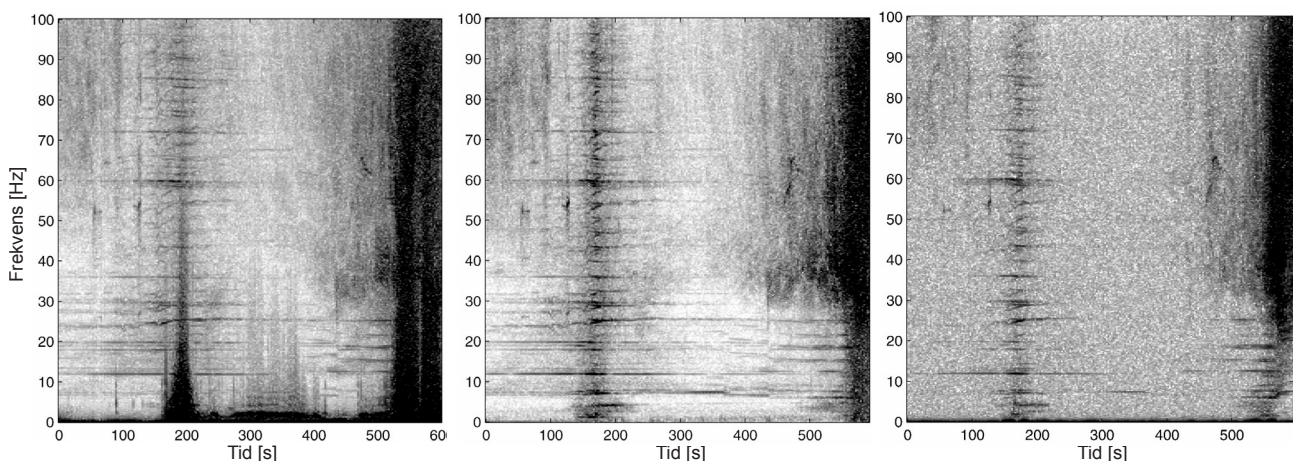


Figur 3.2 Fiberhydrofonsignalerna från figur 3.1 efter högpasfiltering med brytfrekvens 20 Hz.

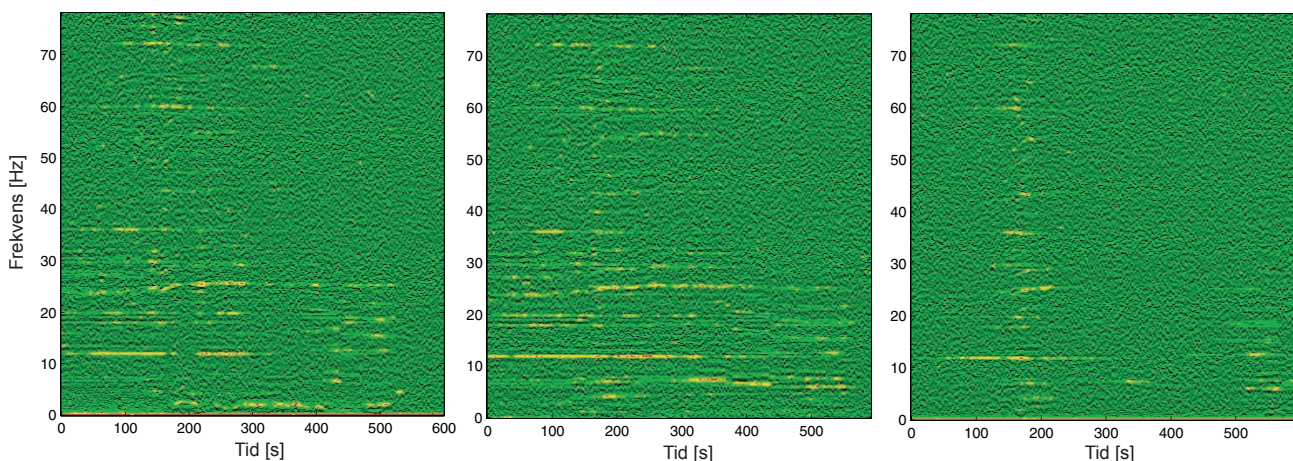
bottnar är effekten för fiberhydrofonerna mer komplicerad men ändå av samma art. Det finns därför inte samma entydiga gräns för en maximal signalamplitud.

I ett frekvensområde under 10 Hz uppkommer ibland signalkomponenter helt utan motsvarighet i referensgivarna. Fenomenet kan tydligare ses i ett normaliserat spektrogram där den momentana spektraltätheten normaliseras mot effekten, figur 3.4. I spektrogrammet från den fiberoptiska hydrofonen (nr 2) framträder kraftiga svängningar med frekvens kring 2 Hz i intervallet mellan 300 och 400 sekunder samt kring 500 sekunder. Motsvarande svängningar går inte att se i de jämförande spektrogrammen från referenshydrofon och tryckgivare.

Denna typ av signalkomponenter framträder även i registreringarna från de fiberoptiska hydrofonerna vid passagen av fartyget "Birger Jarl". I figur 3.5 jämförs ett normaliserat spektrogram från fiberoptisk hydrofon nr 2 med



Figur 3.3 Spektrogram med signalstyrkan gråskalad från ljus till mörkt. Fiberhydrofon 2 till vänster, referenshydrofonen i mitten och den dynamiska tryckgivaren till höger. Samma passage som i figur 3.1.



Figur 3.4 Normaliserade spektrogram med signalstyrkan färgkodad från grönt till rött via gult. I övrigt som i figur 3.3.

motsvarande spektrogram från referenshydrofon och tryckgivare. Det är bara i bilden från den fiberoptiska hydrofonen man kan se dessa svängningar. Här uppträder fenomenet dessutom under hela den 300 sekunder långa registreringen.

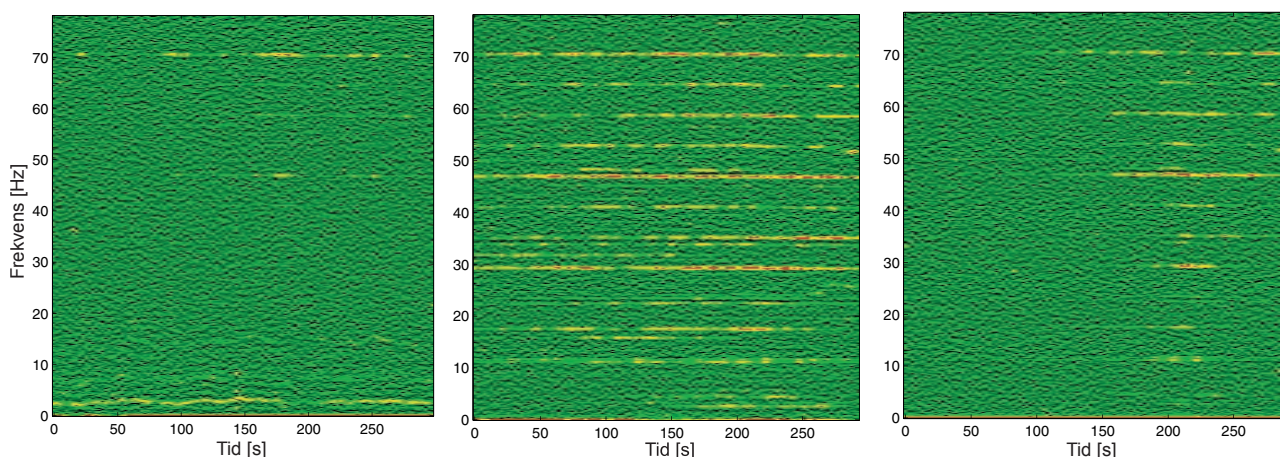
För varje fiberhydrofon registreras 3 detektorkanaler som idealt skall bilda ett trefassystem, i figur 3.6 visas detektorsignalerna från fiberhydrofon nr 2 vid registreringen av "Costa Romantica" och "Silja Festival". Den noggranne läsaren kan möjligen se att de tre kanalerna ligger 120 grader ur fas med varandra. Vad som också syns då långa förlopp betraktas är hur signalstyrkan varierar, vilket avspeglas i max och minvärdena för detektorsignalerna. I figuren 3.6 kan vi se markanta nedgångar i signalstyrkan kring 70 och 380 sekunder. Variationerna förekommer med olika intensitet i samtliga registreringar och är ett tecken på att polarisationen i fibrerna påverkas och ändras av någon mekanism. Med stor sannolikhet är detta kopplat till 2 Hz svängningarna diskuterade här ovan. Vi förstår dock inte vad som ger upphov till variationerna.

3.1 Identifierade fel i signalerna

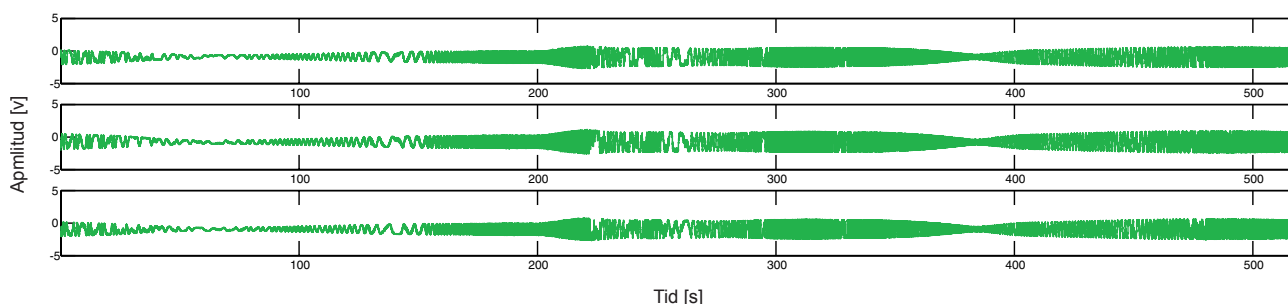
Signalerna från fiberhydrofona innehåller felaktigheter som försvårar en relevant lågfrekvensanalys. Det är uppenbart att registreringarna från fiberhydrofona inte ger en korrekt bild av de omgivande tryckvariationerna.

Den första och mest påtagliga skillnaden mellan referensgivarna och de fiberoptiska hydrofona är de stora nivåsteg som uppstår i signalerna när fartygen passerar nära och mitt över hydrofona. Stegen uppstår pga att den passiva demoduleringsalgoritmen som tolkar interferometersignalen [3], inte hinner med att korrekt avbilda de snabba signaländringar som uppstår, figur 3.7. En skansräknarrutin för periodens (2π steg) upp eller nedräkning av fasvärdet fungerar inte korrekt.

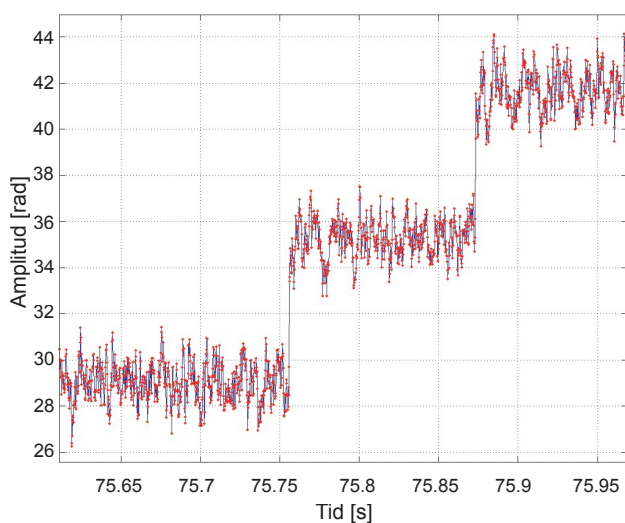
Vid närmare analys visar det sig vara ljudtrycket, snarare än det statiska tryckets förändring, som är den största orsaken till problemet. Man kan visa att ändringen i det statiska trycket (derivatan) ligger väl inom ramen för vad skansräknarrutinen hinner med.



Figur 3.5 Normaliserade spektrogram vid passage av fartyget Birger Jarl in mot Stockholm. Fiberhydrofon 2 till vänster, referenshydrofonen i mitten och den dynamiska tryckgivaren till höger.



Figur 3.6 Detektorsignalerna för fiberhydrofon nr 2 vid passagen med färjorna Costa Romantica och Silja Festival.



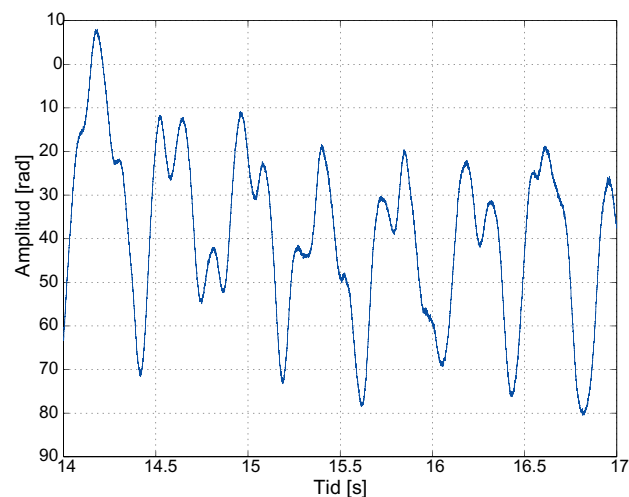
Figur 3.7 Bilden visar två fashopp pga att fasräknaren inte hinner med de snabba signalvariationerna som uppstår då ljudtrycket i vattnet överstiger en viss gräns. Data härstammar från fiberhydrofon nr 1 överst i vertikalar- rayen, dvs den hydrofon som är positionerad närmast målfartygets skrov vid CPA av ett lastfartyg (mer än 160 dB re1 V/ μ Pa vid referenshydrofonen).

I stället beror felet på att ljudtrycket blir så starkt då fartygen passerar över hydrofonerna att de fiberoptiska hydrofonerna genererar fasderivator i storleksordningen radianer/sampel (interferometrarna genererar fassignaler). Cirka 2 radianers fasändring mellan varje sampel är vad algoritmen klarar av att hantera innan det här problemet uppstår. Om signalfrekvensen är lika med Nyquistfrekvensen för samplingen blir den tillåtna signalamplituden 1 radian, för 1/10 av Nyquistfrekvensen 10 radianer, osv. Om vi beaktar den nominella känsligheten för de fiberoptiska hydrofonerna, 0,2 rad/Pa [4], så motsvarar 1 radians amplitud ett ljudtryck på cirka 3 Pa RMS, 10 radianer 30 Pa RMS och 100 radianer 300 Pa RMS. Dessa skulle således utgöra en ungefärlig övre gräns för ljudtrycket vid frekvenserna f_{NY} , $f_{NY}/10$, $f_{NY}/100$ motsvarande 2500, 250, 25 Hz (samplingfrekvens=5 kHz). För bredbandiga signaler beror gränsen på frekvensinnehållet. De högsta ingående frekvenskomponenterna är här f_{NY} , vilket innebär att systemet klarar ett ljudtryck på maximalt ca 3 Pa RMS.

Eftersom detektorsignalerna, som är sinusformade funktioner av fassignalen, är bandbegränsade blir effekten av snabba fasändringar även att en annan form av distortion uppstår.

Antivikningsfiltren på samtliga optiska ingångar begränsar frekvensinnehållet i detektorsignalerna till under Nyquistfrekvensen. Redan för signaler med cirka 3 radianers fasändring per sampel genereras i detektorsignalerna sk Besselkomponenter över Nyquistfrekvensen. Då dessa högre ordningens komponenter filtreras bort distordas detektorsignalerna. Fasdemoduleringsalgo-

ritmen upphör därmed att fungera korrekt och även andra frekvenskomponenter kan förvanskas.



Figur 3.8 En tre sekunder lång detaljbild över de periodiska vågor som ibland dominerar fiberhydrofonsignalerna. Data insamlade från passage av Birka Princess, fiberhydrofon nr 1.

Den andra egenskapen som starkt påverkat fiberhydrofonernas lågfrekvenssegenskaper är de vågliknande signaler som uppstår. Karaktäristiskt för svängningarna är att de ligger kring några Hertz och har relativt hög fasamplitud, se figur 3.8.

Motsvarande signal kan inte ses på referensgivarna. Det tycks heller inte finnas ett tydligt samband mellan de fyra fiberhydrofonerna. Svängningarna uppträder inte alltid på alla hydrofoner och har olika amplitud. Detta gör att laserkällans egenbrus troligtvis kan uteslutas. Om laserns frekvens ändrar sig så ändrar sig interferometerfasen om det finns en viss obalans (olika längd på referens och mätfiber) i interferometern. Eftersom fibrerna inte är helt exakt kapade skulle olika obalans kunna ge upphov till olika starka fassvängningar från en och samma laserfrekvenssvängning. Det skulle alltså kunna vara en förklaring om svängningarna hade sett lika ut men varit olika starka på de fyra hydrofonerna. Eftersom detta inte är fallet är orsaken troligen någon annan. En eventuell källa till störningarna kan vara ett långsamt läckage där vatten droppvis läcker in i hydrofonkonstruktionerna men detta är högst osäkert. Ytvågor kan ge upphov till tryckvariationer, men här är amplituden på de registrerade svängningarna för hög i förhållande till de vattendjup givarna var placerade på. Möjligen skulle effekten kunna vara orsakad av att vattenströmmen skapar virvlar runt den upphängda sensorn. Sådana effekter är kända att ge periodiska variationer i den storleksordning som observerats här [6]. Att svängningarna inte framträder på referenshyd-

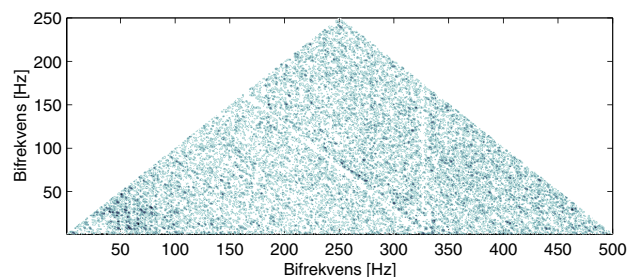
rofonen som var upphängd på motsvarande sätt skulle kunna förklaras med att den inte är känslig för så låga frekvenser. Tryckgivaren som var fast placerad på botten kan inte utsättas för strömrörelser på samma sätt som de upphängda hydrofonerna, varför effekten inte kommer att uppträda i trycksignalen.

3.2 Fördjupad spektralanalys

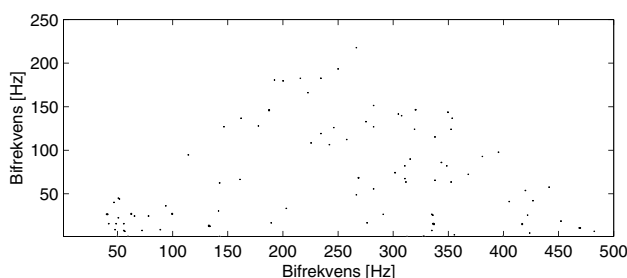
Tanken med mätdata ifrån Oxdjupet var givetvis att den skulle användas för att påvisa eventuella fördelar med signalerna från fiberhydrofonerna. Genom att lågfrekvensområdet från DC och uppåt är integrerat med ett högre frekvensband kan det bli enklare att ta fram kopplingar mellan olika signalkomponenter i och kring ett övergångsband mellan frekvensdomänerna.

Oavsett de brister data visat upp gjordes en analys av eventuella kvadratiske faskopplingar (QPC) [7-10] genom att beräkna bikoherensytan för de data insamlade med fiberhydrofonteknik samt med referenshydrofonen och den dynamiska tryckgivaren. Bikoherens är ett mått på andelen faskopplad energi vid ett visst bifrekvenspar.

Resultatet av analysen kan ses i figurerna 3.9-3.13. Figurerna 3.9 och 3.10 visar både en bikoherensyta med allt innehåll samt en yta med de punkter där QPC funnits. Om man jämför bikoherensytorna för hydrofon- och fiberhydrofondata, ser man att det inte skiljer något väsentligt mellan dem. Möjligen kan man påpeka att det finns fler bidrag långt ner i frekvens hos hydrofonens bikoherens yta. Detta gör att man inte kan säga att fiber-



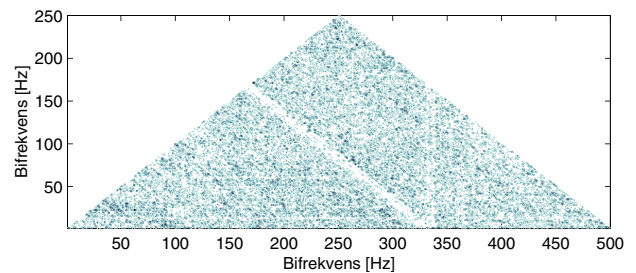
Figur 3.9 Bikoherensytan för data insamlad med hydrofon för första passagen för Costa Romantica.



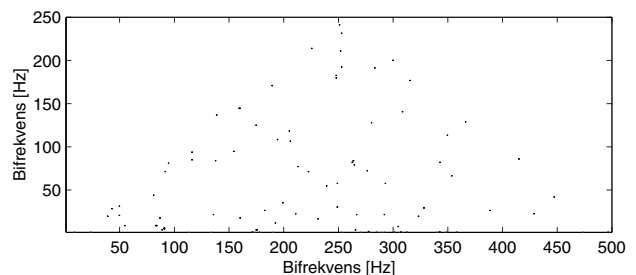
Figur 3.10 Bikoherensytan med enbart QPC komponenterna kvar för data insamlad med hydrofon för första passagen för Costa Romantica.

hydrofontekniken skulle tillföra mer information än konventionella metoder.

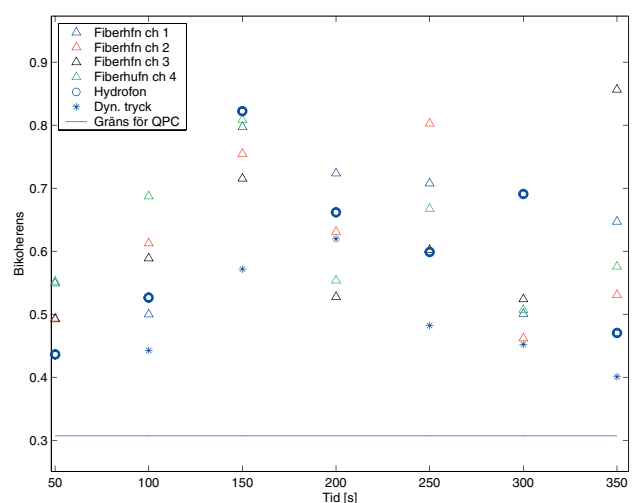
I figur 3.13 visas de maximala bikoherensvärdena från alla givare för 50 sekunders tidslucka. CPA ligger vid ca 150-200 sekunder. Värt att notera är att vid CPA har hydrofonen högst värden, samt att värdena för fiberhydrofonerna varierar kraftigt. De olika kanalerna byter plats med varandra med avseende på starkast bikoherensvärde.



Figur 3.11 Bikoherensytan för data insamlad med fiberhydrofon för första passagen för Costa Romantica, kanal 1.



Figur 3.12 Bikoherensytan med enbart QPC komponenterna kvar för data insamlad med fiberhydrofon för första passagen för Costa Romantica, kanal 1.



Figur 3.13 Maximala bikoherensvärden för data insamlad med hydrofon, tryckgivare, och alla fyra kanaler för fiberhydrofon. Passagen för Costa Romantica med CPA vid 150-200 sekunder. Trianglarna är fiberhydrofonernas nivåer, ringarna är hydrofonens nivåer och de blå stjärnorna är nivåerna för det dynamiska trycket.

4. Slutsatser

Vi skiljer här på de slutsatser vi kan dra med utgångspunkt från våra mätresultat och mer allmänna rekommendationer för fiberoptiska hydrofoner.

4.1 Bedömning av proven vid Oxdjupet

Det finns allvarliga brister i de signaler som registrerats med de fiberoptiska hydrofonerna, särskilt då det gäller lågfrekventa signalkomponenter. Vi ser två separata egenskaper som inte är i överensstämmelse med referensgivarna. Den första tror vi att vi kan förklara och också åtgärda, om än inte utan att ändra väsentligt i mätutrustningen. Den andra egenskapen kan vi idag inte riktigt förklara.

1. Stora signalsprång uppstår när fartygen passerar nära och mitt över hydrofonerna. Vid referenshydrofonen uppmättes signalnivåer med högt ljudtryck, ibland över 100 Pa. Fiberhydrofonerna klarar en gräns på ca 3 Pa. Hög akustisk amplitud omvandlas i fibersensorerna till höga optiska signalfrekvenser och när dessa faller utanför mätbandbredden uppstår problemen.
2. I ett lågt frekvensområde kring 2 Hz uppstod från och till svängningar i fassignalen som inte hade någon motsvarighet i referenssensorerna. Orsaken till fenomenet är inte säkerställd.

De fiberoptiska hydrofonerna fungerade alltså inte tillfredsställande för den här tillämpningen. Till viss del beror de felaktiga vågformerna på att systemet inte var avsett att mäta starka ljudsignaler. Hydrofonelementens känslighet hade anpassats för att kunna detektera signaler ned under "Sea State Zero" nivåer. Detta visar på ett inneboende problem med fiberoptiska interferometrar. Medan de elektriska givarnas förstärkning kan ställas om och anpassas efter rådande signalnivåer är de fiberoptiska hydrofonerna mer låsta i ett dynamiskt omfång. Det går visserligen mycket enkelt att minska tryckkänsligheten, men inte med mindre än att ett nytt sensorelement sätts på plats. Följden blir givetvis då också att minsta detekterbara ljudtryck ökar. Med de aktuella fiberhydrofonernas tryckkänslighet kommer det alltid vara så att ungefär de ljudtryck vi haft nu ger upphov till storleksordningen radianer i fasutslag och mer. Det är då högre frekvenskomponenter börjar dyka upp i interferometersignalerna och det behövs mer bandbredd (högre samplingtakt) för att öka dynamiken.

Den demoduleringsalgoritm vi använt, baserad på utläsning med 3x3 kopplare har två väsentliga nackde-

lar för det här ändamålet. En nackdel är att det krävs tre detektorsignaler för varje hydrofon. Särskilt markant blir denna nackdel då kraven på datatakt och dynamik höjs. Den andra nackdelen hänför sig till algoritmens fransräknare. Eftersom den momentana interferometerfasen bestäms i ett 2π intervall krävs en så kallad fransräknare som kan detektera fasrörelser ut ur varje 2π intervall och räkna upp eller ned ett värde som läggs till den momentana fasen. Då signalstyrkan blir för hög hinner inte fransräknaren räkna rätt och värdena kommer att avvika med modulo 2π . Stegen ger en helt distorderad signal. För att vara säker på att fransräknaren skall hinna med krävs en samplingtakt väl överstigande interferometersignalernas högsta ingående frekvens.

Om det är önskvärt att behålla den aktuella hydrofonkänsligheten finns det andra demoduleringsmetoder som förmodligen skulle fungera bättre under förhållanden med höga ljudtrycksnivåer, t ex andra algoritmer i kombination med 3x3 kopplaren eller så kallad pseudoheterodyn demodulering [1]. Även om pseudoheterodyn demodulering också kommer att innefatta steg där hög dynamik omsätts i hög bandbredd så är det mer naturligt att de stegen är elektroniska och att samplingen sker först efter demodulering. Sålunda blir kraven på datainsamlingens dynamik och datatakt liktydiga med kraven som ställs på den akustiska signalen.

De lågfrekventa svängningar som observerats, beror troligen på någon form av fel i hydrofonelementen. Det kan möjligen finnas ett samband med inkapslingen och eventuella läckage då de trycksätts. Tidigare prover [5] av fiberhydrofonernas känslighet för statistiskt tryck har visat mycket linjära funktioner av omgivningstrycket. Hydrofonerna var då emellertid inte ingjutna i ett gummiytterhölje. Om fiberhydrofonernas signaler studeras i områden utan överstyrning syns att signalen driver på ett sätt som inte överensstämmer med registreringarna på referensgivarna. Huruvida denna drift har liknande orsak som de mer tydliga svängningarna är oklart. Denna typ av drift är dock mer förväntad och kan bero på såväl små temperaturvariationer i vattnet som frekvensdrift i laserkällan. Det är svårt att säga hur bra de här givarna kan bli för mycket långsamma tryckvariationer. Klart är dock att de inte fungerade bra i den här mätningen.

Baserat på våra mätresultat är det svårt att se några uppenbara signalbehandlingsmässiga fördelar med fiberhydrofonerna vilket var syftet. Möjligen kan denna slutsats vara helt beroende på egenskaper i just vårt mätsystem och ej generellt gällande för fiberoptisk sensorteknik.

4.2 Slutsatser och rekommendationer

Låt oss först kort diskutera minsensorer och liknande tillämpningar där mycket låga frekvenser är av intresse. Ned i området kring 1 Hz och under är det mycket viktigt att laserljuskällan som används är stabil och att interferometern är väl balanserad för att undvika inverkan av andra effekter än tryck, främst acceleration och temperaturvariationer. Både vad gäller lasern och interferometern går det att tillse att störnivåerna är tillräckligt låga för en väl fungerande dynamisk tryckgivare. Som vi sett i dessa mätningar ställs också krav på ett relativt stort dynamiskt omfång. Hydrofonen och fiberoptiken medger i princip obegränsad dynamik. Det som sätter gränsen för det dynamiska omfånget är demoduleringen. I eventuella fortsatta studier av den här tillämpningen måste demoduleringsrutinen anpassas för att kunna hantera höga ljudtryck. Det här är en lärdom generellt sett eftersom situationer med höga ljudtryck kan uppstå i många hydroakustiska tillämpningar.

Av försöksresultaten lär vi oss också att det kräver större insatser än vad vi lagt ned på tekniken för att omsätta teori i praktik och ha den att fungera. Analysen av försöken här blev snarare en analys av tekniska problem i fibersensorerna än en analys av huruvida tekniken kan lösa ett tillämpningsorienterat problem vilket inte var meningen. En mer renodlad och genomtänkt sensor för den här tillämpningen hade varit bättre men det hade krävt en större initial insats, för vilket medel inte fanns. Ett så pass komplext system som fiberhydrofonkabeln innefattar många tekniska detaljer som kostar resurser att få fram första gången.

Vi kan nu relativt mycket om fiberoptisk interferometrisk sensorteknik och har en god förmåga att avgöra på vilket sätt tekniken generellt kan komma till användning och hur den bör implementeras. Om vi ser till arraysystem såsom bottenfasta nätverk med stor spännvidd, släpsonarer och snabbt utläggbara system så har definitivt tekniken en plats att fylla inom hydroakustiken. Den här typen av system utvecklas i USA och England och tekniken har en sån mognadsgrad att få frågeställningar ligger kvar på forskningsnivå.

Som behovsbilden ser ut idag är det inte rimligt att i Sverige börja bygga större system av den här typen. Det skulle kosta för mycket. Vi får förlita oss på andra nationer.

Förslagsvis inriktas fortsatt forskning inom området fiberoptisk hydrofoner mot tillämpningar där annan bra teknik i dagsläget saknas. I stället för att arbeta mot en vision med stora helt fiberoptiska arrayer med många element ser vi på speciella tillämpningar där den fiberoptiska sensorteknikens goda egenskaper kan ge nya möjligheter eller förbättrade prestanda.

Ett exempel på detta är fiberlasersensorer som kan möjliggöra mycket tunna och flexibla släpsonarer som kan hanteras från små undervattensfarkoster. Fiberlasersensorer utgör en särskild fiberoptisk sensorteknik där laserljuset alstras direkt i sensorn. Tekniken gör det möjligt att detektera ljud ned till havsomgivningsbrusnivå med endast ett par centimeter aktiv fiber. Det går därför att utforma tunna arrayer längs med en enda sträckt fiber till skillnad från konventionell fiberoptisk sensorteknik där fiberspolar måste lindas. Fiberlasersensorer kan däremot inte göras lika känsliga som dessa.

Ett annat exempel som nämnts tidigare [1] är icke punktformiga hydrofoner (punktelement i förhållande till det akustiska fältet). Den fiberoptiska sensortekniken medger att en fiberoptisk hydrofons geometri kan varieras fritt inom ramen för hur en optisk fiber tillåts att böjas. Det är t ex fullt tänkbart att göra avlånga hydrofoner, kanske flera mil långa, för att övervaka stora områden med få sensorkanaler. En sensor kan därmed användas för att lösa en uppgift som det skulle krävas en mängd punktsensorer för.

5. Referenser

- [1] Kullander, F., Knuthammar, B. Andersson, M: "Fiberoptisk hydrofonteknik, en översikt", FOA-R--00-01467-409--SE, Mars 2000.
- [2] Morén, P., "Prov med fiberoptisk hydrofonarray vid Oxdjupet september 2002, försöksprotokoll för internt bruk", FOI Memo Dnr 02-2381, September 2002.
- [3] Kullander, F., Gruffman, S., Laurent, C., Zyra, S: "Ny metod för demodulering och linjärisering av utsignalen från en fiberoptisk interferometer", FOA-R--96-00305-3.1--SE, oktober 1996.
- [4] Kullander, F., Andersson, M., Olsson A., "Demonstration of a four element fiber optic hydrophone cable", FOA-R--00-01778-409—SE, December 2000.
- [5] Kullander, F., "General Purpose Fiber Optic Hydrophones for Shallow Water Applications", FOA-R—99-01102-409—SE, April 1999.
- [6] Batchelor, G.K., "An Introduction to Fluid Dynamics", Cambridge University Press 615 p. , 1967.
- [7] Fackrell, J. W. A. and McLaughlin S. , "Robust non-parametric bicoherence estimation by stepwise outlier rejection", *Electronics Letters*, vol. 36, no 4, pp. 368-370, 2000.
- [8] Fackrell, J. W. A., McLaughlin, S. and White, P. R. "Practical issues concerning the use of the bicoherence for the detection of quadratic phase coupling", *Proc. of IEEE workshop on HOS*, Spain, 1995.
- [9] Lennartsson, R. K., Robinson, J. W. C., Persson, L. and McLaughlin, S. "Passive sonar signature estimation using bispectral techniques", *Proc. 10:th IEEE workshop on Statistical Signal and Array Processing, SSAP 2000*, Pocono, USA, 2000.
- [10] Persson, L., Lennartsson, R. K., Robinson, J. W. C. and McLaughlin, S. "Quadratic phase coupling analysis of passive sonar data using biphas techniques", *Proc. IEEE/MTS Oceans*, Providence, USA, 2000.