



(12) PATENT

(19) NO

(11) 339873

(13) B1

NORGE

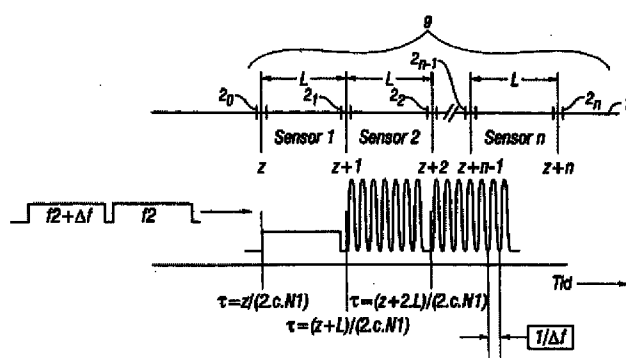
(51) Int Cl.
G01B 9/02 (2006.01)
G01D 5/353 (2006.01)
G01K 11/32 (2006.01)
G01L 1/24 (2006.01)

Patentstyret

(21)	Søknadsnr	20053157	(86)	Int.inng.dag og søknadsnr	2004.01.20 PCT/GB2004/00197
(22)	Inng.dag	2005.06.28	(85)	Videreføringsdag	2005.06.28
(24)	Løpedag	2004.01.20	(30)	Prioritet	2003.02.03, GB, 0302434
(41)	Alm.tilgj	2005.11.02			
(45)	Meddelt	2017.02.13			
(73)	Innehaver	Sensor Highway Ltd, 8th Floor, South Quay Plaza II, 183 Marsh Wall, GB-E149SH LONDON, Storbritannia			
(72)	Oppfinner	Arthur H Hartog, 31 Butterfield Road, GB-SO167EG SOUTHAMPTON, HAMPSHIRE, Storbritannia			
(74)	Fullmektig	Bryn Aarflot AS, Postboks 449 Sentrum, 0104 OSLO, Norge			

(54)	Benevnelse	Interferometrisk fremgangsmåte og anordning for å måle fysiske paramater.			
(56)	Anførte publikasjoner	US 5757487 A US 5488475 A US 5557400 A US 6208776 B1 WO 98/53277 A1			
(57)	Sammendrag				

En fremgangsmåte for måling av en valgt fysisk parameter ved en posisjon i et område av interesse, omfatter: å sende optiske pulser ved et antall forhåndsvalgte undersøkelsesbølgelengder inn i en optisk fiber (1) som er utplassert langs området av interesse, reflektorer ($2_0, 2_1, \dots, 2_n$) er gruppert langs den optiske fiberen (1) for å danne en gruppe (9) med sensorelementer, idet den optiske veilengden mellom reflektorene (2) er avhengig av den valgte parameteren; å detektere det returnerte, optiske interferenssignalet for hver av de forhåndsvalgte bølgelengdene; og å bestemme, fra det optiske interferenssignalet, den absolutte, optiske veilengden (L) mellom to reflektorer (2) ved nevnte posisjon, og fra den optiske veilengden (L) som er bestemt på denne måten, å bestemme verdien av den valgte parameter ved vedkommende posisjon; hvor trinnet med å bestemme den absolutte, optiske veilengden (L) omfatter å utføre en prosess hvor fasedifferansen mellom interferenssignalene for et par med de forhåndsvalgte bølgelengdene blir estimert ved å bruke en estimert verdi for den optiske veilengden (L) idet den estimerte fasedifferansen blir brukt til å estimere fasen ved hver av disse bølgelengdene, og den således fremskaffede fasen blir brukt til å revidere den estimerte verdien for den optiske veilengden (L), idet prosessen blir gjentatt for noen eller alle gjenværende bølgelengdepar i sekvens på basis av den optiske veilengden (L) estimert for det umiddelbart foregående par i sekvensen, for derved å revidere progressivt den optiske veilengden (L) inntil den er kjent til et ønsket nøyaktighetsnivå.



Foreliggende oppfinnelse angår en interferometrisk fremgangsmåte og en anordning for måling av fysiske parametere.

Distribuerte temperatursensorer (DTS) er kjent hvor en optisk fiber er utplassert gjennom et område av interesse, lys blir sendt inn i fiberen, og
5 tilbakespredt optisk stråling blir brukt til å bestemme temperaturvariasjonen langs fiberen. Slike distribuerte temperatursensorer har vist seg å være nyttige ved oljeproduksjon for å bestemme f.eks. strømningsbidrag fra forskjellige oljeproduserende soner, identifisering av posisjonen til innsivingen av andre fluider og den posisjon hvor gass bryter ut. Tolkningen av temperaturdata beror imidlertid
10 på kontrasten mellom den termiske profilen til en produksjonsbrønn og den geotermiske gradienten. I de tilfeller hvor den geotermiske gradienten er liten (f.eks. i en horisontal brønn), så kan informasjonen fremskaffes ved å indusere en termisk hendelser som kan spores, for derved å avdekke den lokale strømningshastigheten. Denne løsningen virker bra i langsomtstrømmende
15 brønner. For meget høyere strømningshastigheter kan noe informasjon oppnås fra friksjonsoppvarmingseffekter, men disse er meget små og temperaturopløsningen til DTS-systemer, spesielt i høyavviksbrønner, er marginal. Oppløsningsgrensen for DTS er i størrelsesorden 0,1 °C for lange måletider. Dette begrenser strømningsoppløsningen til typisk 5000 bpd i et
20 borehull med en diameter på 7".

Det er imidlertid antatt at meget mer informasjon kan oppnås hvis temperaturen kunne måle med høyere oppløsning, f.eks. 0,01 °C eller bedre.

DTS er dessuten forholdsvis langsom når den settes opp for best oppløsning i stor avstand. Det blir antatt at en hurtig temperaturmåling med høy
25 oppløsning kan gjøre det mulig enten naturlig eller indusert, å spore termiske svingninger og dermed fremskaffe en mer direkte indikasjon på strømning i hurtigstrømmende brønner.

Andre målinger ville også bidra til bildet av brønnen. En måling av trykkfordelingen langs produksjonsintervallet ville f.eks. muliggjøre en nøyaktig
30 bestemmelse av strømmingen i kombinasjon med en densitetsmåling (som også kan oppnås fra trykkmålinger) og en viss form for blanding. Trykksensorer med tilstrekkelig ytelse for strømningsbestemmelse (f.eks. permanente

kvartstrykkmålere) er imidlertid kostbare og har bare begrenset multipleksingskapasitet.

En løsning på disse vanskelighetene er nå søkt på grunnlag av interferometrisk undersøkelse av reflektorgrupper. Denne løsningen er vanlig brukt i fiberoptiske hydrofoner som er blitt utplassert for navigasjonsmessige anvendelser, som kjent fra Dakin, J.P., Wade, C.A. og Henning, M., 1984, "Novel optical fibre hydrophone array using a single laser source and detector", Electron. Letts, vol. 20, pp 53-54, og fra Dakin, J.P. og Wade, C.A., 1984, "Optical Fibre Hydrophone Array – recent progress", Proc. 2nd Optical Fibre Sensors Conference, Stuttgart, pp 375-379.

US 5757487 A beskriver et distribuert fiberoptisk sensorsystem som innbefatter en mønstret oppstilling av kly reflekterende bredbånds gitter eller andre sensorer i serie anordnet langs en felles fiber. Laserkildene er multiplekset på fiberen og forplanter seg gjennom en retningskopler mot sensorene. Retursignalene blir dirigert med en retningskopler til en demultiplekser som skiller signalene ved senterfrekvenser, og sender hvert signal til en respektiv detektor. Alle refleksjonssignaler generert av en enkelt inngangspuls med en gitt bølgelengde blir detektert før kobling av den neste inngangspuls.

Ved akustiske målinger er formålet bare å bestemme et AC-signal som er endringen i den relative fasen til de optiske refleksjonene fra tilstøtende reflektorer i gruppen. På grunn av signalbehandlingens AC-natur, blir mange problemer som påtreffes ved statiske målinger, omgått.

I en interferometrisk gruppe er reflektorer vanligvis atskilt med noen få titalls meter. I hydrofoner blir AC-signalet fremskaffet ved å eksponere fiberen for mekanisk spenning når en akustisk bølge er tilstede; midlene for omforming av en trykkbølge til en spenning kan innebære å vikle en fiber på en hul stamme. Selve fiberen har moderat følsomhet for trykkbølger selv ved fravær av en slik stamme. Dette signalet blir detektert i overflateinstrumenteringen i form av en variasjon av fasen som en funksjon av tid. Dette fasesignalet som kan strekke seg over mer enn 2π , gir informasjon om øyeblikkstrykket. Den relative fasen er selvsagt direkte relatert til den optiske veilengden i fiberseksjonen mellom reflektorene. I akustiske grupper blir imidlertid bare endringer i fasen tatt i betraktning. Den absolutte, optiske veilengden er ikke viktig og blir ikke målt.

Hvis den absolutte, optiske veilengden mellom reflektorer imidlertid er kjent med interferometrisk nøyaktighet (dvs. en liten andel av bølgelengden til lyset), så kan de fysiske parameterne, som den er basert på, (f.eks. temperatur og strekk) utledes meget nøyaktig. Den optiske veilengden er spesielt avhengig av den

5 fysiske lengden til den optiske fiberen mellom reflektorer og brytningsindeksen som atskiller reflektorene, som begge er følsomme for endringer gjennom termisk utvidelse og brytningseffekt. Mekanisk spenning påvirker likeledes opplagt lengden av fiberen, men også brytningsindeksen gjennom den spenningsoptiske effekten. I en optisk fiber er vedkommende indeks, den såkalte effektive indeksen,

10 en verdi mellom verdien til kjernen og kledningen, avhengig av visse bølgeledningseffekter; hvor sistnevnte effekter i seg selv kan være avhengige av en ytre fysisk parameter, men denne er ikke tenkt å være en annen ordens effekt.

Et problem er at interferometriske sensorer tilveiebringer en periodisk respons på måleobjekter og svaret er dermed tvetydig. Utgangen fra sensoren

15 som en funksjon av måleobjektet, er dermed nominelt sinusformet, der hver periode blir kalt en frynse. I den typiske veilengden mellom reflektorer finnes det et meget stort antall frynser, og det er derfor vanskelig å bestemme på hvilken frynse interferometeret for tiden er posisjonert.

Ta som eksempel en bølgelengde på 1550 nm og en avstand på 10m

20 mellom reflektorene. Antallet frynser mellom refleksjonene er i størrelsesorden $1,863 \times 10^7$. Hvis vi antar at sensoren kan oppløse 1/1000 av en frynse, så er oppløsningen ved bestemmelse av den optiske veilengden omkring $1:1,863 \times 10^{10}$. Hvordan denne oppløsningen omformes til en bestemmelse av den størrelse som er av interesse (f.eks. temperaturen) vil selvsagt være avhengig av følsomheten

25 av den optiske veilengden for denne parameteren. I eksempelet ovenfor vil temperaturopløsningen være bedre enn 1 mK. Med mindre målesystemet er i stand til å bestemme frynseordenen, er imidlertid denne meget høye oppløsningen betydningsløs. En akustisk sensor behøver derimot bare å spore endringer i frynseordenen over en akustisk periode (et par ms).

30 Nøkkelen til foreliggende løsning som inngår i bestemmelsen av den absolutte, optiske lengden mellom reflektorer, er derfor å løse frynseordenstvetydigheten over et slikt stort antall frynser.

I henhold til et første aspekt ved foreliggende oppfinnelse er det tilveiebragt en fremgangsmåte for måling av minst én valgt parameter ved en posisjon inne i et område av interesse, hvor fremgangsmåten omfatter følgende trinn: å sende ut optiske pulser ved et antall forutbestemte undersøkelsesbølgelengder i en optisk fiber utplassert langs området av interesse, idet reflektorer er gruppert langs den optiske fiberen for å danne en gruppe med sensorelementer, der den optiske veilengden mellom reflektorene er avhengig av den valgte parameteren; å detektere det returnerte optiske undersøkessignalet for hver av de forutbestemte bølgelengdene; og å bestemme fra de optiske interferenssignalene, den absolutte optiske veilengden mellom to reflektorer ved nevnte posisjon og fra den optiske veilengden som er bestemt på denne måten, verdien av den valgte parameteren ved nevnte posisjon.

Trinnet med å bestemme den absolutte optiske veilengden omfatter fortrinnsvis å utføre en prosess hvor den deriverte av fasen som en funksjon av bølgelengde blir estimert fra et delsett av interferenssignalene, og å benytte den deriverte og en estimert verdi for den optiske veilengden til å estimere faseforholdet mellom interferenssignalene, og faseforholdet som er oppnådd på denne måten, blir brukt til å revidere estimatverdien for den optimale veilengden, idet prosessen blir gjentatt for økende delsett av de gjenværende bølgelengder i rekkefølge på basis av de optiske veilengdene som er estimert for det umiddelbart foregående delsett i rekkefølgen, for derved progressivt å revidere den optiske veilengden inntil den er kjent til et ønsket nøyaktighetsnivå. I en utførelsesform omfatter minst ett av delsettene et par av interferenssignalene.

Den optiske fiberen omfatter fortrinnsvis en polariseringsbevarende fiber. Lys blir fortrinnsvis sendt inn i fiberen på en slik måte at effekten til lyssignalet er hovedsakelig likt fordelt mellom de ortogonalt polariserte forplantningsmodiene til fiberen for derved å undersøke hver hovedpolariseringstilstand for fiberen samtidig, idet returinterferenssignalene fra begge hovedpolariseringstilstandene blir brukt separat i prosessen for å bestemme den absolutte optiske veilengden for hver forplantningsmodus uavhengig av den andre modusen.

Alternativt blir lys sendt inn i den polariseringsbevarende fiberen på en slik måte at effekten til lyssignalet først blir rettet fullstendig inn i én av hovedpolariseringstilstandene og så den andre for derved å undersøke

hovedpolariseringstilstandene sekvensielt, idet de returnerte interferenssignalene fra begge hovedpolariseringstilstandene blir brukt separat i prosessen for å bestemme den absolutte optiske veilengden for hver forplantningsmodus uavhengig av den andre modusen.

5 I begge tilfeller er virkningen å tilveiebringe to uavhengige interferometriske grupper ved hjelp av en enkelt fiber for derfor å doble antallet målinger som er tilgjengelige for å fremskaffe den optiske veilengden og for å separere virkningene av flere måleobjekter.

10 I noen utførelsesformer kan den valgte parameteren omfatte temperatur. I denne forbindelse kan fremgangsmåten brukes til å overvåke fluidstrømning ved å detektere endringer i temperatur i det strømmende fluidet. I et eksempel kan området av interesse ligge inne i en rørledning, og fremgangsmåten kan videre omfatte å identifisere enhver temperaturvariasjon i rørledningen fra den forutbestemte verdien av temperaturen ved nevnte posisjon, hvor temperaturvariasjoner indikerer
15 en endring av strømningen til et fluid i rørledningen. Endringen av strømningen kan oppstå fra en lekkasje av fluid inn i eller ut av rørledningen, slik at fremgangsmåten omfatter å identifisere en lekkasje ved nevnte posisjon ut fra identifiseringen av en temperaturvariasjon ved vedkommende posisjon. Alternativt kan strømningsendringen oppstå fra en innsnevring i rørledningen, og fremgangsmåten omfatter å identifisere en innsnevring ved nevnte posisjon ut fra identi-
20 fiseringen av en temperaturvariasjon ved vedkommende posisjon.

I en annen utførelsesform kan den valgte parameteren omfatte mekanisk spenning. En dobbeltbrytende optisk fiber kan brukes til å detektere mekanisk spenning, slik at den optiske fiberen kan være en meget dobbeltbrytende fiber hvis
25 dobbeltbrytning endres i respons på mekanisk spenning påført den optiske fiberen. I den grad at dobbeltbrytningen til den meget dobbeltbrytende fiberen også endres som reaksjon på temperatur, kan fremgangsmåten videre omfatte å kompensere det returnerte, optiske interferenssignalet for virkninger som stammer fra temperatur ved nevnte posisjon. Dette gjør det mulig å utnytte følsomheten til
30 den meget dobbeltbrytende fiberen til å fremskaffe nøyaktige spenningsmålinger uten at nøyaktigheten blir ødelagt av kryssfølsomheten for temperatur som kan være tilstede i en slik fiber.

En utførelsesform av oppfinnelsen, brukt til å måle mekanisk spenning, kan omfatte den fremgangsmåte hvor området av interesse ligger på overflaten av en komponent i en oljebrønn, og fremgangsmåten omfatter videre å identifisere bevegelse av komponenten fra den bestemte spenningsverdien.

5 I ytterligere utførelsesformer kan den valgte parameteren omfatte trykk.

Fordelaktig i denne forbindelse er at den optiske fiberen kan omfatte en sidehullsfiber hvorfra nøyaktige trykkmålinger kan fremskaffes. Hvert sensorelement i fiberen kan videre være lokalisert inne i et forseglet, elliptisk rør fylt med et trykkoverførende fluid. Dette gjør det mulig for hvert element å bli isolert fra tilstøtende elementer slik at forskjellige trykk kan måles.

10

Trykkoverføringsfluidet tillater også god trykkommunikasjon til fiberen til tross for den isolasjon som tilveiebringes av rørene.

I et anvendelseseksempel ligger området av interesse inne i en rørledning, og fremgangsmåten omfatter å utplassere to eller flere slike optiske fibre ved forskjellige asimutverdier omkring en indre overflate av rørledningen, og å bestemme en densitet for fluid i rørledningen fra verdiene av trykk bestemt for hver optisk fiber. I en alternativ anvendelse ligger området av interesse inne i en rørledning, og fremgangsmåten omfatter å utplassere to eller flere slike optiske fibre ved forskjellige asimutverdier omkring en indre overflate av rørledningen, og å bestemme en orientering av rørledningen og/eller de optiske fibrene fra verdiene av trykk bestemt for hver optisk fiber.

15

20

I noen utførelsesformer kan den valgte parameteren være avhengig av en lokalisert hendelse som beveger seg langs området av interesse, og fremgangsmåten kan omfatte å bestemme verdien av den valgte parameter over tid ved mer enn én av posisjonene, og å bestemme bevegelsen av den lokaliserte hendelsen fra de bestemte verdiene av den valgte parameteren. På denne måten kan strømningshastigheten til et fluid langs området av interesse måles eller overvåkes, eventuelt for å detektere forekomsten av en uregelmessighet som påvirker strømmingen. Den lokaliserte hendelsen kan være en brukerindusert hendelse slik at fremgangsmåten videre omfatter å indusere den lokaliserte hendelsen. Et fluidvolum kan f.eks. varmes opp eller kjøles ned, eller en boble skapt for å danne et volum med lavere densitet. Uansett om hendelsen er brukerindusert eller naturlig forekommende, kan den lokaliserte hendelsen være et fluidvolum inne i

25

30

området av interesse som har en annen temperatur, et annet trykk eller en annen densitet i forhold til de omgivende fluidet i området av interesse, idet den valgte parameteren henholdsvis er temperatur, trykk eller densitet.

I ytterligere utførelsesformer blir minst to valgte parametere målt samtidig.

5 Temperatur kan f.eks. måles med trykk eller med mekanisk spenning. I noen tilfeller kan dette oppnås med en enkelt optisk fiber som gir optiske interferenssignaler fra hvilke mer enn én parameter kan bestemmes. Alternativt kan to fibere benyttes slik at fremgangsmåten videre kan omfatte å sende ut optiske pulser ved et antall bølgelengder i en ytterligere optisk fiber utplassert
10 langs området av interesse, idet reflektorer er gruppert langs den ytterligere optiske fiberen for å danne en ytterligere gruppe med sensorelementer, der den optiske veilengden mellom reflektorene er avhengig av en ytterligere valgt parameter; å detektere det returnerte, optiske interferenssignalet fra den ytterligere optiske fiberen for hver av de forutbestemte bølgelengdene og bestemme
15 fra de optiske interferenssignalene, den absolutte optiske veilengden mellom to reflektorer ved nevnte posisjon, og fra den optiske veilengden som er bestemt på denne måten, verdien av den ytterligere valgte parameter ved nevnte posisjon.

Den optiske fiberen og den ytterligere optiske fiberen kan dele det samme sekundærbelegget. Alternativt kan den optiske fiberen og den ytterligere optiske
20 fiberen utgjøres av en enkelt fiber som er følsom for begge parametere, idet fiberen har to kjerner. Disse arrangementene gir enkel utplassering siden begge fibre/kjernene kan utplasseres i et eneste utplasseringstrinn.

I en hvilken som helst av de ovennevnte utførelsesformene og eksemplene kan dessuten den målte verdien for parameteren brukes til å bestemme verdien
25 for et ytterligere måleobjekt avhengig av den målte parameteren. Dette øker omfanget av fremgangsmåten siden den gjør det mulig å måle parametere som i seg selv ikke påvirker den optiske veilengden på en bestembar måte. For eksempel kan den optiske fiberen være forsynt med et belegg som reagerer på det ytterligere måleobjektet ved strekking eller krymping. Dette vil endre den
30 spenning som fiberen utsettes for og dermed endre veilengden, hvorfra det ytterligere måleobjektet kan bestemmes.

Alternativt kan belegget være elektrostriktivt eller magnetostriktivt. Dette muliggjør måling av elektriske eller magnetiske felter. I et ytterligere alternativ kan belegget være følsomt for et valgt kjemisk måleobjekt.

En fremgangsmåte som anvender foreliggende oppfinnelse, kan videre omfatte å sende ut optiske pulser ved en fast bølgelengde i den optiske fiberen og bruke det returnerte interferenssignalet til å bestemme høyfrekvente faseendringer. Dette kan oppnås på en hvilken som helst hensiktsmessig måte, f.eks. ved å tilveiebringe en ekstra fiber for pulsen med fast bølgelengde, slik at fremgangsmåten videre kan omfatte å sende ut optiske pulser ved en fast bølgelengde i en ekstra optisk fiber utplassert langs området av interesse, idet reflektorer er gruppert langs fiberen for å danne en ekstra gruppe med sensorelementer, og å bruke det returnerte interferenssignalet fra den ekstra optiske fiberen til å bestemme høyfrekvente faseendringer. Den ekstra fiberen kan ha et belegg utformet for å fremheve akustisk sensitivitet. Slike høyfrekvente faseendringer blir fortrinnsvis brukt til å korrigere for dynamiske feil i de returnerte, optiske interferenssignalene.

I en fremgangsmåte som omfatter foreliggende oppfinnelse, blir det returnerte, optiske interferenssignalet fortrinnsvis behandlet for å fjerne krysstaleleddet, idet krysstaleleddet blir fjernet for hver av n sensorelementer ved å subtrahere krysstalefasevektoren for det n . sensorelementet fra den målte n . sensorelementfasevektoren, idet krysstalefasevektoren er estimert fra fasen til alle foregående sensorelementer i gruppen. Fjerningsprosessen begynner med å subtrahere krysstalefaseverdien for det andre sensorelementet fra det målte andre sensorelementets faseverdi, idet krysstalefaseverdien for det første sensorelementet i gruppen er lik null.

Utførelsesformene av det første aspekt ved foreliggende oppfinnelse er spesielt egnet for bruk i oljeindustrien, for brønnhullsovervåkende anvendelser i brønnhull. Optiske fibere er i stand til å motstå de barske brønnhullsmiljøene og gi nøyaktige måleresultater, og fremgangsmåten tilveiebringer teknikker for å måle parametere av spesiell interesse ved oljeproduksjon, innbefattende temperatur, fluidstrømning, trykk og mekaniske påkjenninger. Området av interesse kan derfor ligge innenfor en oljebrønn. I noen eksempler kan oljebrønnen være en horisontal oljebrønn.

I henhold til et annet aspekt ved foreliggende oppfinnelse er det tilveiebrakt en anordning for måling av en valgt fysisk parameter ved en posisjon i et område av interesse, hvor anordningen omfatter: en optisk fiber for uplassering langs områdene av interesse, idet den optiske fiberen langs sin lengde er utstyrt med
5 reflektorer som danner en gruppe med sensorelementer, hvor den optiske veilengden mellom reflektorene er avhengig av den valgte parameteren, kildeanordninger innrettet for å sende optiske pulser ved et antall forutbestemte undersøkelsesbølgelengder inn i fiberen; signaldeteksjonsanordninger innrettet for å detektere det returnerte, optiske interferenssignalet for hver av de forutbestemte
10 bølgelengdene; og signalbehandlingsanordninger innrettet for å bestemme, fra det optiske interferenssignalet, den absolutte optiske veilengden mellom to reflektorer ved nevnte posisjon og for å bestemme, fra den optiske veilengden som er bestemt på denne måten, verdien av den valgte parameter ved nevnte posisjon.

I en utførelsesform er signalbehandlingsanordningene innrettet for å
15 bestemme den absolutte optiske veilengden ved å utføre en prosess hvor den deriverte av fasen som en funksjon av bølgelengde estimert fra et delsett av interferenssignaler, ved å bruke den deriverte og en estimert verdi for den optiske veilengden til å estimere faseforholdet mellom interferenssignalene, og det således oppnådde faseforholdet blir brukt til å revidere den estimerte verdien for
20 den optiske veilengden, idet prosessen blir repetert for økende delsett av de gjenværende bølgelengder i rekkefølge på grunnlag av den optiske veilengden som er estimert for det umiddelbart foregående delsettet i sekvensen, for derved progressivt å revidere den optiske veilengden inntil den er kjent til et ønsket nøy-aktighetsnivå. I en utførelsesform omfatter minst ett av delsettene et par av
25 interferenssignalene.

Den optiske fiberen kan omfatte en polariseringsbevarende fiber, og anordningen omfatter videre effektutsendelsesanordninger innrettet for å utsende de optiske pulsene i fiberen på en slik måte at effekten til de optiske pulsene er hovedsakelig fordelt mellom de ortogonalt polariserte forplantningsmodiene til
30 fiberen for derved å undersøke hver hovedpolariseringstilstand for fiberen samtidig; og signalbehandlingsanordningen kan være innrettet for å bruke de returnerte, optiske interferenssignalene fra begge hovedpolariseringstilstandene separat for å bestemme den absolutte, optiske veilengden for hver

forplantningsmodus uavhengig av den andre modusen. Alternativt kan den optiske fiberen omfatte en polariseringsbevarende fiber, og anordningen omfatter videre en polariseringsmodulator innrettet for å sende de optiske pulsene inn i fiberen på en slik måte at effekten til de optiske pulsene først blir dirigert fullstendig inn i én av hovedpolariseringstilstandene til fiberen, og så den andre, for derved å undersøke hovedpolariseringstilstandene separat; og signalbehandlingsanordningene er innrettet for å bruke de returnerte optiske interferenssignalene fra begge hovedpolariseringstilstandene separat for å bestemme den absolutte optiske veilengden for hver forplantningsmodus uavhengig av den andre modusen.

I noen utførelsesformer omfatter parameteren temperatur. I denne forbindelse kan området av interesse ligge inne i en rørledning, og signalbehandlingsanordningene kan videre være innrettet for å identifisere eventuell temperaturvariasjon inne i rørledningen fra den bestemte verdien av temperaturen ved nevnte posisjon, hvor temperaturvariasjoner indikerer en strømningsendring i et fluid i rørledningen. Strømningsendringen kan også stamme fra en lekkasje av fluid inn i eller ut av rørledningen, og signalbehandlingsanordningene kan være innrettet for å identifisere en lekkasje ved nevnte posisjon fra identifiseringen av f.eks. en temperaturvariasjon ved vedkommende posisjon. Alternativt kan strømningsendringen skyldes en innsnevring i rørledningen, og signalbehandlingsanordningene kan være innrettet for å identifisere en innsnevring ved nevnte posisjon ut fra identifiseringen av en temperaturvariasjon ved vedkommende posisjon.

I andre utførelsesformer omfatter parameteren mekanisk spenning. Den optiske fiberen kan omfatte en meget dobbeltbrytende fiber, hvis dobbeltbrytning endres som reaksjon av mekanisk spenning påført den optiske fiberen. I det tilfelle at dobbeltbrytningen til den meget dobbeltbrytende fiberen også endres som reaksjon på temperatur, kan signalbehandlingsanordningene videre være innrettet for å kompensere det returnerte, optiske interferenssignalet for virkninger som skyldes temperatur ved nevnte sted.

Området av interesse kan ligge på overflaten av en komponent i en oljebrønn, og signalbehandlingsanordningene kan videre være innrettet for å identi-

fisere bevegelse av komponenten fra den bestemte verdien av den mekaniske spenningen.

I ytterligere utførelsesformer omfatter parameteren trykk. I slike utførelsesformer kan den optiske fiberen omfatte en sidehullsfiber (se Xie, H.M., Dabkiewicz, 5 Ph., Ulrich, R. og Okamoto, K. "Side-hole fibre for fiber-optic pressure sensing", Optics Letters 1986, vol. 11, p 333). Hvert sensorelement i fiberen kan videre være lokalisert i et forseglet, elliptisk rør fylt med et trykkoverførende fluid.

Anvendelser av anordninger utformet på denne måten, hvor området av interesse ligger inne i en rørledning, omfatter anordningen to eller flere slike 10 optiske fibre for utplassering ved forskjellige asimutverdier omkring den indre overflaten av rørledningen, og signalbehandlingsanordningene er innrettet for å bestemme en densitet for fluid i rørledningen fra trykkverdiene bestemt for hver optisk fiber. Andre anvendelser innbefatter de hvor området av interesse ligger inne i en rørledning; anordningen omfatter to eller flere slike optiske fibre for 15 utplassering ved forskjellige asimutverdier omkring en indre overflate av rørledningen; og signalbehandlingsanordningen er innrettet for å bestemme en orientering av rørledningen og/eller de optiske fibrene fra verdiene av trykk som er bestemt for hver optisk fiber.

I noen utførelsesformer kan den valgte parameteren være avhengig av en 20 lokalisert hendelse som beveger seg langs området av interesse, og signalbehandlingsanordningene kan være innrettet for å bestemme verdien av den valgte parameter over tid ved mer enn den ene nevnte posisjon, og for å bestemme bevegelsen av den lokaliserte hendelsen fra de bestemte verdiene av den valgte parameteren. Den lokaliserte hendelsen kan være en brukerindusert 25 hendelse. Den lokaliserte hendelsen kan være et fluidvolum inne i området av interesse som har en annen temperatur, et annet trykk eller en annen densitet enn det omgivende fluid i området av interesse, idet den valgte parameter henholdsvis er temperatur, trykk eller densitet.

I noen eksempler kan anordningen videre være innrettet for måling av en 30 annen, valgt fysisk parameter ved posisjonen i området av interesse, hvor den optiske veilengden mellom reflektorene videre er avhengig av den andre valgte parameteren; og signalbehandlingsanordningen videre er innrettet for å bestemme

verdien av den andre valgte fysiske parameteren fra den bestemte, absolutte optiske veilengden.

5 Anordninger i henhold til foreliggende oppfinnelse kan videre omfatte minst én ytterligere optisk fiber anordnet for utplassering gjennom området av interesse, idet reflektorer er gruppert langs den ytterligere optiske fiberen for å danne en ytterligere gruppe med sensorelementer, hvor den ytterligere optiske fiberen er egnet for måling av en annen fysisk parameter enn den andre fiberen. Fibrene deler fortrinnsvis det samme sekundærbelegget. Alternativt kan de utgjøres av én enkelt fiber som er følsom for begge parameterne, idet fiberen har minst to kjerner.

10 Anordninger ifølge foreliggende oppfinnelse kan være innrettet for å bruke den målte verdien for parameteren til å bestemme en verdi for et ytterligere måleobjekt avhengig av vedkommende parameter.

I denne forbindelse kan den optiske fiberen være forsynt med et belegg som reagerer på det ytterligere måleobjektet ved strekking eller krymping.
15 Belegget kan f.eks. være elektrostriktivt, magnetostriktivt eller innrettet for å være følsomt for et valgt kjemisk måleobjekt.

I anordninger ifølge foreliggende oppfinnelse er kildeanordningene fortrinnsvis også innrettet for å sende lys ved en fast bølgelengde og ved en varierende bølgelengde inn i fiberen, idet signalbehandlingsanordningene er innrettet for å bruke interferenssignalet fra undersøkelsen ved den fast
20 bølgelengden til å bestemme høyfrekvente faseendringer. I et slikt tilfelle kan anordningen videre omfatte ekstra optisk fiber for utplassering gjennom området av interesse, der reflektorer er gruppert langs fiberen for å danne en ekstra gruppe med sensorelementer, hvor kildeanordningen er innrettet for å sende signalet med fast bølgelengde inn i den ekstra fiberen. Den ekstra fiberen har fortrinnsvis et
25 belegg utformet for å fremheve akustisk sensitivitet. Anordningen ifølge foreliggende oppfinnelsen kan også sende ut lys ved varierende bølgelengde samtidig med utsendelsen av den faste bølgelengden. Signalbehandlingsanordningene kan videre være innrettet for å bruke de høyfrekvente faseendringene til å korrigere for
30 dynamiske feil i de returnerte, optiske interferenssignalene.

Signalbehandlingsanordningene kan videre være innrettet for å behandle det returnerte, optiske interferenssignalet for å fjerne krysstaleleddet, idet krysstaleleddet blir fjernet for hver av de n sensorelementene ved å subtrahere

krysstalefaseverdien for det n. sensorelement fra det målte n. sensorelementets faseverdi, idet fjerningsprosessen begynner med å subtrahere krysstalefaseverdien for det andre sensorelement fra det målte annet sensorelements faseverdi, idet krysstalefaseverdien for det første sensorelement i gruppen er lik null. I noen utførelsesformer kan området av interesse ligge inne i en oljebrønn. Oljebrønnen kan være en horisontal oljebrønn.

I henhold til et tredje aspekt ved foreliggende oppfinnelse er det tilveiebrakt en fremgangsmåte for måling av en parameter i en interferometrisk, optisk fibergruppe, omfattende å sende optiske pulser inn i gruppen, å skape et interferenssignal inne i sensorelementene i gruppen, å detektere fasen til interferenssignalene, hvor det returnerte, optiske interferenssignalet blir behandlet for å fjerne krysstaleleddet, idet krysstaleleddet blir fjernet for hver av n sensorelementer ved å subtrahere krysstalefaseverdien for det n. sensorelementet fra den målte faseverdien til det n. sensorelementet, idet fjerningsprosessen begynner med subtrahering av krysstalefaseverdien for det andre sensorelementet fra den målte faseverdien fra det andre sensorelementet, idet krysstalefaseverdien for det første sensorelementet i gruppen er lik null.

Foreliggende oppfinnelse er særlig egnet til å tilveiebringe en fremgangsmåte for å måle minst én valgt parameter ved en posisjon i et område av interesse, hvor fremgangsmåten omfatter følgende trinn:

å sende optiske pulser ved et antall på forhånd valgte undersøkelsesbølgelengder inn i en optisk fiber utplassert langs området av interesse, reflektorer er gruppert langs den optiske fiberen for å danne en matrise av sensorelementer, en optisk veilengde mellom de nevnte reflektorer er avhengig av den valgte parameteren;

å detektere det returnerte, optiske interferenssignalet for hver av de på forhånd valgte bølgelengder; og

å bestemme, fra det optiske interferenssignalet en absolutt optisk veilengde mellom to reflektorer på den nevnte posisjonen, og fra den absolutte, optiske veilengden så bestemmes verdien av den valgte parameter på nevnte posisjon,

hvor trinnet med å bestemme den absolutte, optiske veilengden omfatter å utføre en prosess i hvilken den deriverte av fasen som en funksjon av bølgelengde er beregnet fra et del-sett av interferenssignaler, ved hjelp av derivatet og en

estimert verdi for den optiske veilengden å beregne faseforholdet mellom interferenssignalene, og faseforholdet oppnådd på denne måten blir brukt til å revidere den estimerte verdien for den optiske veilengden, idet prosessen blir gjentatt for å øke del-sett av de gjenværende bølgelengder i rekkefølge, på basis
5 av den optiske veilengden estimert for det umiddelbart foregående del-settet i sekvensen, for derved å revidere progressivt den optiske veilengden inntil den er kjent til et ønsket nøyaktighetsnivå.

Foreliggende oppfinnelse er videre egnet til å tilveiebringe et apparat for måling av en valgt fysisk parameter ved en posisjon i et område av interesse, hvor
10 apparat omfatter:

en optisk fiber for utplassering langs området av interesse, den optiske fiberen har reflektorer (langsmed som danner en matrise av sensorelementer, en optisk veilengde mellom de nevnte reflektorer er avhengig av den valgte parameteren;

15 kildeanordning for å sende optiske pulser med et antall på forhånd valgte undersøkelsesbølgelengder inn i nevnte fiber;

signaldeteksjonsorganer som er innrettet til å detektere det returnerte, optiske interferenssignalet for hver av de på forhånd valgte bølgelengder; og

en signalbehandlingsanordning innrettet for å bestemme fra det optiske
20 interferenssignalet en absolutt optisk veilengde mellom to reflektorer på den nevnte posisjonen, og å bestemme fra den absolutte, optiske veilengden verdien av den valgte parameteren ved den nevnte posisjonen,

hvor signalbehandlingsanordningen er innrettet for å bestemme den absolutte, optiske veilengden ved å utføre en fremgangsmåte i hvilken den
25 deriverte av fasen som en funksjon av bølgelengde er beregnet fra et del-sett av interferenssignaler, ved hjelp av derivatet og en anslått verdi for den optiske veilengde for å beregne faseforholdet mellom interferenssignalene, og faseforholdet oppnådd på denne måten blir brukt til å revidere den estimerte verdien for den optiske veilengden, idet prosessen blir gjentatt for å øke del-sett av
30 de gjenværende bølgelengder i rekkefølge, på basis av den optiske veilengde estimert for det umiddelbart foregående del-settet i sekvensen, for derved å revidere progressivt den optiske veilengden inntil den er kjent til et ønsket

nøyaktighetsnivå.

Det vil nå som et eksempel bli vist til de vedføyde tegningene, hvor:

Fig. 1 viser et skjematisk diagram av en optisk fibersensorgruppe;

5 Fig. 2 viser en plotting av korrigert fase som funksjon av bølgelengde;

Fig. 3 viser en plotting av fase som funksjon av bølgelengde;

Fig. 4 viser en anordning for bruk ved utførelse av en fremgangsmåte ifølge foreliggende oppfinnelse;

10 Fig. 5 viser en anordning for bruk ved utførelse av en fremgangsmåte ifølge foreliggende oppfinnelse noe mer detaljert; og

Fig. 6 viser en trykksensor.

Fig. 1 i illustrerer en gruppe med reflektorer $2_0, 2_1, \dots 2_n$. Atskilt med en avstand L (tilnærmet konstant) påført en optisk fiber. Avsnittet av fiberen mellom hvert par med reflektorer $2_0, 2_1$, osv., utgjør et sensorelement. Reflektorene er
15 ment å være ganske svake, f.eks. i størrelsesorden 0,1% refleksjonsevne, delvis for å redusere tap til etterfølgende sensorelementer, men også for å redusere krysstale mellom elementene.

Krysstale mellom tilstøtende sensorelementer er en alvorlig begrensingsfaktor i akustiske sensorgrupper i det rent reflektometriske arrangementet. Imidlertid gjør arrangementets enkelthet, innbefattende det
20 reduserte antall fibre som skal føres til overflaten og fraværet av komponenter slik som brønnhullskopplere, det uhyre attraktivt i foreliggende forbindelse. Kompromisset er at reflektiviteten ved hver reflektor må reduseres for å begrense krysstale, noe som selvsagt påvirker signal/støy-forholdet som kan oppnås. I dette
25 tilfelle, forutsatt at akustiske målinger med høy ytelse ikke er nødvendig, gjør den enkle utformingen av brønnhullsutformingen den uhyre attraktiv.

For å ta hensyn til kryss-sensitiviteten mellom de forskjellige faktorer som påvirker optisk veilengde, blir det foreslått å bruke polariseringsbevarende fibre og å måle den optiske veilengden separat for hver av de to
30 hovedpolariseringstilstandene (SOP, states of polarisation).

En polariseringsbevarende fiber er én som er utformet for å være meget asymmetrisk. Asymmetrien sikrer at det finnes en stor forskjell mellom forplantningskonstantene til ortogonalpolariserte modi. På grunn av forskjellen i

forplantningskonstanter, er det minimal effektomforming mellom modiene som dermed forplanter seg hovedsakelig uavhengig av hverandre. Fiberen kan være utformet for å være svært forskjellig følsom for visse måleobjekter for de to SOP'ene. Sidehullsfiberen er ett slikt eksempel hvor den optiske veilengdeforskjellen mellom hoved-SOP'ene varierer markert som en funksjon av eksternt trykk. En ekstra fordel ved å bruke denne polariseringsbevarende fiberen (som er betydelig mer kostbar enn konvensjonelle fibere) er at det problemet som vanligvis oppstår i hydrofongrupper med å sikre at polariseringstilstandene til lyset fra tilstøtende reflektorer er innrettet, blir omgått.

Bruk av forskjellen mellom de optiske veilengdene i en dobbeltbrytende fiber er en velkjent metode til å utføre interferometri ved at det sikrer en felles vei for grenene til interferometere og også (i dobbeltbrytende fibere) sikrer at polariseringstilstanden til de kombinerende bølgene blir godt regulert. Denne løsningen er kjent i litteraturen som polarimetri. Den er imidlertid fundamentalt forskjellig fra det som foreslås her: konvensjonell polarimetri danner forskjellen i optisk veilengde mellom de to optiske veier direkte i det optiske domene, og bare denne forskjellen blir målt. I det foreliggende forslaget blir derimot den absolutte, optiske veilengden for hver optisk vei målt, og den resulterende informasjonen blir behandlet digitalt for å tilveiebringe uavhengige bestemmelser av to måleobjekter. Alternative løsninger er basert på å sammenligne de relative veilengdene til de to laveste modiene til en fiber, vanligvis utformet for å lede bare noen få slik rom liknende modi.

Anta at fiberen 1 derfor skal være polariseringsbevarende, og vi skal betrakte hver polarisering separat. Som antydnet på fig. 1, er avstanden mellom reflektorene tilnærmet konstant. Selv om multipler av L også vil virke, vil bare de avsnittene mellom reflektorene 2, atskilt med L , bli målt.

Som nevnt ovenfor tilveiebringer interferometriske sensorer en periodisk, og dermed tvetydig, respons. For å fjerne tvetydigheten repeterer foreliggende oppfinnelse målingen ved en rekke forskjellige bærefrekvenser, $f_c \pm f_1$. Prosessen med å etablere et forhold (uten 2π -tvetydighet) mellom fasen ved hver av bærefrekvensene, blir kalt utpakking. På denne måten kan variasjonen av fasen som en funksjon av bærefrekvensen bestemmes. Dens deriverte er gruppeforsinkelsen, $\tau = L/c \times N$, hvor N er gruppeindeksen og c er lyshastigheten i

vakuum. Siden relasjonen mellom gruppe- og fase-indeksene er kjent eller kan måles, kan faseindeksen fremskaffes. Alternativt kan gruppedataene brukes direkte som en indikator på de fysiske parameterne som det er nødvendig å måle.

For hver frekvens gjelder spesielt følgende:

5 Den totale differansen mellom tilstøtende reflektorer atskilt med avstand L er gitt ved:

$$\Phi(\lambda) := 4 \cdot \pi \cdot L \cdot \frac{n(\lambda)}{\lambda} \quad (1)$$

10 hvor $n(\lambda)$ er den effektive brytningsindeksen for bølgelederstrukturen. Differensiering med hensyn til bølgelengde λ , gir:

$$\frac{d}{d\lambda} \Phi(\lambda) := -4 \cdot \pi \cdot \frac{L}{\lambda^2} \cdot N(\lambda) \quad (2)$$

15 Her er $N(\lambda)$ refraksjonsgruppeindeksen (som dikterer informasjonsoverføringshastigheten i motsetning til den for bølgene for faseindeksen $n(\lambda)$).

Ved å kombinere (1) og (2) følger det at:

$$20 \quad \Phi(\lambda) := \lambda \cdot \frac{n(\lambda)}{N(\lambda)} \cdot \frac{d}{d\lambda} \Phi(\lambda) \quad (3)$$

I henhold til en utførelsesform av foreliggende oppfinnelse blir dermed følgende trinn utført for å fremskaffe en verdi for den absolutte, optiske veilengden:

25 For det første, blir lys ved en første rekke bølgelengder ført inn i fiberen for derved å innhente en rekke fasemålinger ved forskjellige bølgelengder. Noen av disse må ligge så nær hverandre at de kan pakkes ut (dvs. den bestemte fasen) utvetydig fra tidligere kjent kunnskap om L . L vil typisk være kjent på forhånd innenfor noen få prosent.

Ved så å bruke to eller flere slike tett atskilte bølgelengder, $d\Phi/d\lambda$ og de kjente verdiene for $n(\lambda)$ og $N(\lambda)$, blir ligning (3) brukt til å estimere fasen $\Phi(\lambda)$ ved hver av de to bølgelengdene.

5 Fra den inverterte ligningen (1) kan så et revidert estimat for L ved én av eller begge bølgelengdene fremskaffes på grunnlag av den estimerte verdien for $\Phi(\lambda)$.

Den nye estimerte verdien for $\Phi(\lambda)$ blir så brukt til å forbedre nøyaktigheten av $d\Phi/d\lambda$ og trinnene ovenfor blir gjentatt for alle dataene fra målingene ved den første rekken med bølgelengder. Prosessen blir så repetert ved en annen rekke
10 bølgelengder, forskjøvet fra den første rekken med bølgelengder, inntil fasen er blitt utpakket over området med undersøkelsesbølgelengder, som illustrert f.eks. på fig. 2, og den utpakkede fasen blir brukt til å forbedre estimatet av den optiske veilengden inntil dette estimatet er av tilstrekkelig kvalitet til å pakke ut fasen til DC (null frekvens).

15 For å pakke ut fasen ned til DC, blir det antatt at den utpakkede fasen minus en fase syntetisert fra det aktuelle lengdeestimatet, må ha en flat bølgelengde. En tilpasning av denne restfasen som funksjon av bølgelengde kan så brukes til å korrigere lengdeestimatet og dermed beregne antallet bølgelengder (eller frynser) i sensorelementet. Dvs. at måling av helningen til funksjonen som
20 er gitt av differansen mellom den aktuelle, utpakkede fasen og den utpakkede fasen som er beregnet fra det siste estimatet av den optiske veilengden, som illustrert f.eks. på fig. 3, gir et mål på den korleksjon som er nødvendig for å sikre at den utpakkede fasen er lik den som er beregnet fra den optiske veilengden.

Når den absolutte fasen er kjent ved en hvilken som helst (og dermed alle)
25 bølgelengdene, blir lengden beregnet for hver samplet bølgelengde. Gjennomsnittet av alle slik beregnede lengder gir det beste estimatet for den optiske veilengden (under antagelse av lik usikkerhet for hver fasemåling).

Den ovennevnte prosedyren primærlaster således fra tett atskilte frekvenser (som har liten risiko for utpakkingsfeil, men som gir dårlig oppløsning av lengden)
30 for å øke frekvensavstander som gir en lengre basislinje for å estimere faseforskjeller. Til slutt blir det nødvendig å overspenne et tilstrekkelig bredt område til at fasen kan utpakkes med konfidens ned til DC. Frekvenssamplingsmønsteret må

imidlertid være slik at hele kjeden fra de nærmeste frekvensene til de lengst atskilte blir nøyaktig utpakket.

Prosedyren kan generaliseres, og et sett med data innsamlet ved frekvenser med passende avstand, slik at faserelasjonen mellom alle data i settet kan etableres, og fra denne faserelasjonen kan den absolutte lengden L mellom reflektorene bestemmes til innenfor én frynse. Den spesielle utpakkingsprosedyren som er beskrevet ovenfor, er bare et eksempel på en løsning for å bestemme den absolutte veilengden.

Feil i resultatene kan minskes ved å øke antallet samplede frekvenser. Dette har imidlertid den ulempe at innsamlingstiden blir øket, og dette kan være uønsket siden den ekstreme følsomheten til systemet innebærer at alle målinger må foretas hurtigere enn måleobjektet sannsynligvis vil variere fasen med en signifikant mengde. Det kan derfor være nødvendig å akseptere en viss feilhyppighet og så anvende et ikke-lineært filter til å forkaste sterkt avvikende verdier.

Det optiske arrangementet som er foreslått for å utføre disse målingene, er vist på fig. 4. En smal båndlaser 3 blir brukt som oscillator og leverer en meget ren, enkeltfrekvens-tone til resten av systemet ved en bære­bølge­frekvens f_c . Laseren 3 kan avstemmes (dvs. at den har variabel frekvens) slik at suksessive målinger kan utføres med forskjellige bærefrekvenser. Undersøkelseslyset er fortrinnsvis en dobbeltpuls tidsstyrt slik at refleksjonen til den første pulsen fra den fjerntliggende reflektoren 2 i et gitt sensorelement faller sammen med refleksjonen av den andre pulsen fra den nærmeste av reflektorparene. Frekvensene til disse pulsene er f_2 og $f_2 + \Delta f$, hvor frekvensforskjellen Δf er liten sammenlignet med den optiske bærefrekvensen. Selv om det ikke er nødvendig at pulsene er ved litt forskjellige frekvenser, kan en frekvensforskyvning mellom pulsene gjøre tolkningen av fasen enklere, løfte visse tvetydigheter og gjør signalgjenvinningen mindre avhengig av styrken til reflektorene 2. For en avstand $L=10\text{m}$, er den tilsvarende frem/tilbake-tiden mellom reflektorene 2 grovt regnet 100 ns, og en frekvensforskyvning på 10 MHz er nødvendig for at signalet skal oppvise en fullstendig periode (de sju periodene som er vist i diagrammet og som svarer til $\Delta f \sim 70\text{ MHz}$). Svevningsfrekvensen er nøyaktig lik differansen i frekvens mellom de to pulsene og er således kjent med høy nøyaktighetsgrad. Det følger at ved å

sample de optiske retursignalene, kan den relative fasen for hvert reflektorpar bestemmes modulo 2π . Den kontinuerlige utmatingen fra laseren 3 blir derfor omformet til en dobbelpuls med en definert frekvensdifferanse Δf mellom de to pulsene, ved hjelp av en dobbelpulsmodulator 4. Det resulterende pulsparet blir

5 forsterket til en toppeffekt som nærmer seg den ikke-lineære grensen, ved hjelp av en forsterker 5, båndpassfiltrert med et båndpassfilter 6 for å eliminere uønsket, forsterket spontan utsendelse, og blir sendt inn i sensorgruppen 9 via en viss form for en retningskopler 9 (f.eks. en fiberkopler, eller sirkulator, eller et optisk massearrangement). Alle fiberkomponentene må fortrinnsvis være laget av

10 polariseringsbevarende fibere og effekten må utsendes på aksen. Ved et visst punkt, enten i instrumentet eller umiddelbart forut for gruppen 9 (eller ved et hensiktsmessig sted mellom disse) blir effekten omformet til lik effekt i de ortogonale modi, enklest utført med en splitter 8 ved 45° mellom suksessive fiberseksjoner. Dette betyr at de to interferometerne i hvert sensorelement som

15 utgjøres av hver hoved-SOP, blir avspurt samtidig. Alternativt ville det være mulig å bruke en polariseringsmodulator i instrumenteringen for å kople SOP fra en hovedakse til en annen og avspørre SOP'ene sekvensielt. Det lyset som returneres fra sensorgruppen 9, blir sendt via retnings-kobleren 7 og en optisk forforsterker 10, til polariserings-splitteren 11 som velger de ortogonale, lineære

20 tilstandene til polariseringen og sender hver av disse til et separat deteksjons-system 12a, 12b.

Som forklart ovenfor krever prinsippet bak måleteknikken at frekvensen til bærebølgen varierer. Det er flere former for avstembare lasere som er kommersielt tilgjengelige. Distribuerte tilbakekoplingslasere (DFB, distributed

25 feedback-lasers) laget av optiske fibere dopet med sjeldne jordmetaller oppviser smal båndbredde og kan avstemmes enten ved hjelp av strekking (f.eks. med piezoelektriske drivanordninger) eller ved å endre deres temperatur. Alternativt muliggjør spesialutforminger av DFB-halvlederlasere separat frekvens- og effekt-regulering. Det kan bli foretrukket å bruke én eller flere lasere med fast frekvens,

30 og så modulere deres utmating for å generere elektronisk regulerede sidebånd som så blir filtrert for å isolere programmerbare optiske frekvenser. Dette er den løsningen som er illustrert på fig. 5.

Utgangen fra laseren 3 blir ført gjennom en modulator 31 som genererer sidebånd, f.eks. en integrert optisk modulator som for tiden har den bredeste modulasjonsbåndbredden. Posisjonen av sidebåndene blir bestemt ved hjelp av en første RF-frekvens f_1 innmatet til modulatorene 31, og kan derfor reguleres. En
 5 akusto-optisk deflektor (AOD) 33 brukt som en modulator, er utformet i dobbelt-veikonfigurasjonen både for å hakke opp et puls-par fra utgangen fra den første modulatorene 31, og også for å tilveiebringe en differensiell frekvensforskyvning Δf mellom pulsene i paret ved å regulere en annen RF-frekvens f_2 . Bruk av AOD 33 i en dobbelgjennomgangs-konfigurasjon doubler den frekvensforskyvningen Δf som
 10 påføres f_2 . En sirkulator doubler frekvensforskyvningen Δf som påføres f_2 . En sirkulator 32 blir brukt til å aksessere AOD 33, men kan selvsagt erstattes av en kopler som er billigere hvis det tilsvarende tapet i signalstyrke er aksepterbart (eller hvis de polariseringsbevarende sirkulatorene ikke er tilgjengelige). Alternativt kan konstruksjonen være realisert i blokkoptikk.

15 Avstembare Bragg-fibergitre 36a, 36b er anordnet og blir brukt til å velge bare én av sidebåndene. De er plassert mellom forsterkningstrinn 34, 37, som bringer signalet opp til noen få hundre mW, nær den ikke-lineære grensen. Dette blir så utsendt til sensorgruppen 9, eventuelt gjennom en nedad-førende ledning bestående av en polariseringsbevarende fiber. Ved et visst punkt, enten ved
 20 inngangen til nedad-lederen eller hvor sensorgruppen 9 virkelig starter, må det være en $\sim 45^\circ$ rotasjon av fiberaksene for å sikre at effekt blir utsendt i begge akser. På returveien blir det reflekterte lyset fra sensorgruppen 9, etter å ha passert gjennom en retningskopler 37 og i denne utførelsesformen en optisk forforsterker 38, sendt til en polariseringssplitter 39 som velger de ortogonale,
 25 lineære tilstandene til polariseringen og sender hver av disse til et separat deteksjonssystem, 40a, 40b.

Frekvensområdet som systemet kan spenne over, vil bestemme dets evne til å løse tvetydighet over et bredt område av distanser L . Som illustrert, vil variasjoner av RF-frekvensen f_2 gjøre det mulig for frekvensen å bli sveipet over et
 30 lite område ($\pm 10\text{--}15\%$ av RF-senterfrekvensen f_2). Bredere frekvensutslag kan oppnås ved å variere f_1 . Integrerte optiske modulatorer (IOM) er f.eks. tilgjengelige med båndbredder som nærmer seg 20 GHz. Et gitt sidebånd kan derfor sveipes over et område som f.eks. dekker 10 GHz, og ved å velge det andre sidebåndet

kan et totalt spenn som nærmer seg 40 GHz dekkes. Dette er imidlertid sannsynligvis ikke tilstrekkelig til å løse frynsetvetydigheter i sensorelementer med $L = 10\text{m}$. En bredere avstand kan fremdeles oppnås enten ved addisjon av ytterligere lasere ved valgte bølgelengder som er forskjellige fra den første, eller det å

5 avstemme bølgelengden til den opprinnelige kilden som illustrert på fig. 3.

Modellering antyder at to sett med sampler som hver spenner over 40 GHz og er atskilt med 300–400 GHz, vil være tilstrekkelig til å oppløse frynsetvetydigheter i $L = 10\text{m}$, under antagelse av en usikkerhet på hver faseavlesning i størrelsesorden 10 mrad.

10 Uansett hvilken løsning som blir anvendt til å generere en programmerbar, optisk frekvens, bør laseren eller laserne være låst til nøyaktige, stabile bølgelengder (dette er spesielt viktig der hvor mer enn én kilde blir brukt, eller hvor en eneste kilde er avstemt).

Det er to hovedgrunner til stabilisering av laserfrekvensen. Den første er å

15 sikre at de flere målingene av fasen er innbyrdes konsistente slik at disse målesamplene kan rekonstrueres til en absolutt måling av L . Med mindre de suksessive målingene gjelder kildefrekvenser som er kjent med høy nøyaktighet, vil deres relasjon være ubestembar og derfor vil det ikke være mulig å løse frynsetvetydigheten. Dette påfører et anstrengende, men bare kortvarig, krav til

20 laserfrekvensens stabilitet. Den andre grunnen er at laserbølgelengden er lengdereferansen i systemet, den "linjalen" som målingene av L blir sammenlignet med. Av disse to er det kortvarige behovet som er viktigst; mislykket bestemmelse av en konsistent frekvens over det korte tidsrommet vil hindre fremskaffelse av en måling i det hele tatt. En langsom drift av den sentrale frekvensen vil derimot bare

25 påvirke nøyaktigheten og kan i tilfelle med differensielle målinger ikke være kritisk.

Kravet om kortvarig frekvensstabilitet er at en verdi av størrelsesorden 100 kHz i tiden for en måling (ca. 6 ms) er nødvendig for å unngå en degradering av det effektive signal/støy-forholdet for hver utsendelse. (For forforsterkede systemer er kravet en ytterligere størrelsesorden i frekvensstabilitet (dvs. 10 kHz eller

30 der omkring) for å unngå forringelse av estimatet av fasen). Uttrykt ved langsiktig stabilitet vil vi behøve en frekvensnøyaktighet på 3 MHz (i tilfelle med sensorelementer med en lengde på 10 m) for å sikre en nøyaktighet på 1 mK for temperaturavlesningen.

Det er et antall veletablerte fremgangsmåter for å fastsette lasere til fundamentalt definerte frekvenser.

En målemetode som anvender foreliggende oppfinnelse, vil nå bli beskrevet mer detaljert.

5 For det første blir en rekke målinger tatt ved en frekvens f_c . Bærefrekvensen f_c er i sin tur lik $f_0 \pm f_1 \pm f_2 \pm \Delta f$, og blir bestemt ved hjelp av frekvensen til laseren (f_c) forskjøvet med én eller flere modulatorer (f_1, f_2) og hvor modulasjonsfrekvensen blir variert med en liten størrelse (Δf) mellom pulser, idet variasjonen av f_c er tilstrekkelig liten til at faseforholdet mellom suksessive

10 målinger er kjent. Frekvensintervallet kan velges for å sikre at fasedreiningen, som er forårsaket av frekvensendringen, er mindre enn 2π radianer, men like fasedreininger for noen få perioder kan vise seg å være håndterbare. For $L=10\text{m}$ svarer en frekvensendring på omkring 10 MHz til en hel periode.

 Forutsatt at forholdet mellom suksessive fasemålinger kan bestemmes med

15 absolutt tiltro (uten noen 2π -tvetydighet), så skal det største frekvensintervallet som oppfyller dette kriteriet, velges siden den deriverte av fasen som funksjon av frekvens da kan bestemmes med et minste antall målinger.

 I praksis bør den virkelige lengden mellom reflektorer være kjent innenfor noen få prosent, ganske enkelt fordi denne verdien overskrider den langsiktige

20 styrken til fiberen. Som et eksempel på forholdet mellom frekvensområdet og nøyaktigheten til estimatet av L , er antallet perioder som kan slippes gjennom i hvert frekvenshopp omtrent den resiproke verdien av den konfidens med hvilken lengden er kjent på forhånd. Fem perioder synes å være en trygg grense, og dermed vil en rekke med 10 likt atskilte målinger dekke 50 perioder. For et

25 signal/støy-forhold lik 100:1, vil den relative feilen av L , utledet fra helningen av fase/frekvens-funksjonen, være i størrelsesorden 5 ppm. Dette skulle gi tilstrekkelig konfidens til å hoppe til et annet frekvensbånd. Bruken av en fjernpumpet forsterker vil imidlertid sannsynligvis forbedre oppløsningen med en ytterligere faktor som er >10 .

30 I én løsning for planlegging av de frekvenser som brukes til å undersøke gruppen når den første rekken med målinger er blitt fullført, blir en hovedforskyvning i frekvensen til bærebølgen bevirket, og en ytterligere sekvens med fasemålinger som funksjon av bærefrekvens blir utført.

Målinger blir gjentatt ved ytterligere hovedinkrementer i kildefrekvensen som nødvendig for at den absolutte optiske veilengden skal kunne detekteres til et ønsket nøyaktighetsnivå.

Forutsatt at frynseordensfasen kan spores over hovedsprangene i bærefrekvens, er det ikke noe behov for å måle fasen ved mellomliggende frekvenser. For å bedømme konsistensen til et slikt sett med målinger, så ta igjen tilfellet med $L = 10\text{m}$. Anta at 10 målinger blir tatt med en tilnærmet faseforskjell på 5 perioder, dvs. 50 MHz fra hverandre, noe som dekker 100π radianer. Gjennomsnittet som er intrinsikt for tilpasningsprosessen er ventet å bringe usikkerheten av helningen ned til størrelsesorden 5 ppm; dette resulterer i at L blir bestemt med en lignende relativ nøyaktighet, dvs. 0,05 mm. Hvis hovedfrekvenssprangene er av størrelsesorden 10 GHz, svarer dette til 1000 perioder, og gitt den nøyaktighet med hvilken L kan være kjent fra frekvensavsøkningen med kort lengde, så kan frekvensstørrelsesordenen etter frekvensspranget lett korreleres til det for forutgående målinger (i det foregående numeriske eksempelet, etter spranget, bør den nye fasen forutsi ved hjelp av bestikkregning til $< 2\%$ av én periode, enkelt nok til å pakke ut fasen mellom frekvenssprang, men ikke nødvendigvis ned til likespenning (DC)).

Ved å bruke det maksimale spennet til en for tiden tilgjengelig IO-modulator (40 GHz, innbefattende et sidebånd på hver side av bærebølgen), bør fasen være kjent til 0,001 perioder i 4000, dvs. $1:4.000.000$ – ikke helt tilstrekkelig til å bestemme frynseordenen (hvis det antas at den optiske veilengden er innenfor et par prosent av en nominell verdi). Det følger at generelt er det nødvendig med større frekvensforskyvninger eller ytterligere målinger må tas med en annen kildefrekvens.

Antallet målinger som er nødvendige, vil i det minste i en viss utstrekning være avhengig av den anvendte signalbehandlingsmåten. Det er tenkt at ved å bruke en spesiell signalbehandlingsmåte, vil omkring 170 målinger være nødvendig som ved en pulsrepetisjonsfrekvens på 33 kHz vil ta mindre enn 6 ms. Med denne frekvensen vil akustiske signaler også bli plukket opp og en viss lavpassfiltrering kan bli nødvendig.

Det foregående forutsatte at de to polariseringene forplanter seg uten blanding. Hvis dette ikke er tilfelle, så blir effekt konvertert fra én SOP til en annen,

og dette kan føre til delvis (eller endog fullstendig) fading av interferensen, og dette er også en støykilde.

Denne risikoen for tap av polariseringskontrast må tas hensyn til ved å sikre at dobbeltbrytningen til både følings- og ned-førings-fiberen er tilstrekkelig til å unngå polariseringsomforming. Dette er forholdsvis oppnåelig for standard fibre med høy dobbeltbrytning. I tilfelle av en sidehullsfiber, medfører det at det må være en sterk, innebygget dobbeltbrytning i samme forstand som den trykkinduserte dobbeltbrytningen. Det betyr også at unngåelse av skarpe bøyer og mikrobøyer. Sistnevnte krav kan være i motstrid mot behovet for å forsegle trykket mellom sensorelementer i anvendelsen på trykkmålinger som diskutert nedenfor.

Etter definisjon forplanter en modus seg raskere enn sin ortogonale motpart i en dobbeltbrytende fiber. Denne polariserings-fragåingseffekten er kumulativ fra én reflektor til den neste. Hvis differansen i den optiske avstanden som ses av de to ortogonale modiene, blir betydelig sammenlignet med avstanden mellom reflektorene, må det tas i betraktning under signalbehandlingen. Det kan være mulig å kompensere for denne virkningen ved å bytte om de hurtige og langsomme aksene ved å danne skjøter der én fiber blir rotert med 90° i forhold til den andre.

Potensielt er den mest alvorlige av alle utenforliggende effekter virkningen av endringer i fasen under innsamling av måledataene. Hvis den optiske veilengden endrer seg meget hurtig, kan det bli vanskelig for overflateelektronikken å samle inn et konsistent sett med målinger mellom suksessive pulsrepetisjonsperioder. Hvis dette er tilfelle, kan det være nødvendig å sette opp pulsrepetisjonsfrekvensen, eller eventuelt å redusere frekvensinkrementene for å tilveiebringe en høyere grad av redundans i den innsamlede informasjon.

I praksis kan disse hurtige transientene komme enten fra en hurtig endring i det ønskede måleobjektet, dvs. temperaturen, eller fra en ytre forstyrrelse, f.eks. akustisk interferens. Det å sikre at måleobjektet blir sporet, innebærer en samplingshyppighet meget hurtigere enn den hyppigheten ved hvilken en signifikant faseendring opptrer. Som et eksempel er det nedenfor vist at en målelengde på 10 m vil oppvise en faseendring med et par hundre perioder for hver K temperaturendring. Hvis sampling ved 10 kHz og hvis det antas at ti

målinger brukes ved avsøking med små inkremerter, innebærer dette at en temperaturstigning på 1 K/s vil forårsake en feil på noen få tideler av en periode over de 50 periodene som brukes i eksempelet ovenfor. Dette feilnivået kan være marginalt i stand til å forvirre den frynsesporende algoritmen og dermed

5 representere et grovt estimat av begrensingshastigheten for temperaturendringen som systemet ventes å kunne håndtere.

Mer alvorlig er den mulige virkningen av akustisk støykopling. Hvis denne viser seg å være et betydelig problem, så vil det bli nødvendig å holde tilbake de individuelle fasemålingene som er innsamlet over et rimelig tidsintervall og midle

10 den fasen som er fremskaffet for hver bærefrekvens over dette intervallet, for derved, i virkeligheten, å lavpassfiltrere den akustiske responsen. Ulempen er selvsagt at den transiente responsen til sensorgruppen også vil bli langsommere. Hvis imidlertid disse akustiske virkningene viser seg å være betydelige, kan akustisk informasjon også utledes fra de innsamlede dataene.

15 Den intrinsike, relative fasefølsomheten til en konvensjonell fiber er $2,2 \times 10^{-12}/\text{Pa}$. I vårt tilfelle er derfor den totale fasen $1,87 \times 10^7$ frynser (hver lik 2π radianer) og dermed er følsomheten overfor akustisk støy $42 \mu\text{rad}/\text{Pa}$. Om dette er betydelig, er i sin helhet avhengig av støynivået nede i hullet som skyldes pumpevibrasjoner, strømningsstøy, osv. Målingen og behandlingen kan gjøres

20 mer robust ved å minimalisere den uønskede fasevariasjonen for hver sampel. I sin tur kan dette oppnås ved å øke pulsrepetisjonsfrekvensen (PRF) og øke antallet målinger som brukes til å utlede L. PRF er vanligvis begrenset av den tid det tar for en puls å forplante seg fra overflateelektronikken til det fjerneste punktet av interesse og returnere til opto-elektronikken. Hvis bare den siste seksjonen av

25 avfølingsfiberen er av interesse (og som inneholder reflektorer), så kan PRF økes over denne grensen: betrakt f.eks. en gruppe med en lengde på 3 km med en nedføring på 7 km. Den totale lengden (10 km) ville normalt begrense PRF til 10 kHz for å sikre at bare én puls er tilstede i fiberen til ethvert tidspunkt. Lyset som forplanter seg til og fra gruppen, er imidlertid uten interesse, og på grunn av

30 eventuelle skjøter som er tilstede med tilstrekkelig lav refleksivitet, kan derfor pulsene sendes ut med en hyppighet som bare er begrenset av behovet for å ha bare én puls i sensorgruppen til enhver tid. I dette eksempelet er PRF derfor begrenset til 33 kHz.

Trykkløsheten til fiberen er også avhengig av dens belegg. Det eksempel som er gitt ovenfor, er for en udekket fiber og gjelder i det minste tilnærmet for en fiber med et tynt, hardt belegg, f.eks. 10 μm med polyimid.

5 For å håndtere akustiske transienter kan det være ønskelig å arrangere to parallelle innsamlingsarrangementer, ett ved en fast frekvens og ett med en variabel optisk undersøkelsesfrekvens. Sistnevnte blir brukt som forklart ovenfor til å utlede absolutte veilengder. Førstnevnte blir brukt til å avføle akustisk induerte faseendringer og tilveiebringer dermed informasjon for å korrigere dynamiske endringer i de statiske måleobjektene og frembringer samtidig en passiv, akustisk
10 signalutgang.

Siden løsningen er i stand til ganske hurtig oppdateringshyppigheter, gir den muligheten for måling av trykk, eller strekk, fra DC til noen få kHz, dvs. fra statiske målinger til det område hvor akustisk informasjon er tilstede. Disse dataene blir fremskaffet hovedsakelig "gratis", selv om det kan foretrekkes å bruke
15 fiberpar i den samme kabelstrukturen (f.eks. et rør), én med et belegg utformet for å minimalisere akustisk følsomhet (for DC-målinger) og et annet brukt for akustiske målinger, der beleggene er utformet for å fremheve akustisk følsomhet.

En annen vanskelighet som finnes, er krysstalen mellom sensorelementer som oppstår fordi, for de fjerntliggende reflektorene, den energien som reflekteres
20 ved et tidspunkt som svarer til posisjonen av disse reflektorene, blir blandet sammen med den energien som ankommer samtidig, men som har gjennomgått flere refleksjoner fra nærmere beliggende reflektorer. Problemet er godt illustrert i US-patent nr. 5,987,197. Det er to virkninger som oppstår fra multi-ppelrefleksjoner. Den første er en økning i utsendelsesstøyen som et resultat fra
25 at et større optisk effektnivå som treffer detektoren. En mer alvorlig oppgave er at disse uønskede refleksjonene hver dreier fasen til det reflekterte signalet lite grann. Gitt at systemet er interferometrisk, er disse falske signalene proporsjonale med en elektriske feltamplituden, ikke optisk effekt, og deres virkning når man betrakter styrken til dobbeltrefleksjonen, er dermed proporsjonal med
30 refleksiviteten til en reflektor, ikke kvadratet av refleksiviteten. I lange grupper er det mange veier som kan bidra til at signalet ankommer ved et spesielt tidspunkt. Problemet er maken til det som opptrer ved fjernsynsmottakelse i bysenteret, hvor

det direkte signalet fra senderen blir blandet med andre signaler som er blitt reflekterer fra bygninger i nærheten.

I US-5,987,197 er den foreslåtte løsningen å lage suksessive sensorelementer av gitterpar der hvert par er ved et forskjellig bølgelengdebånd. 5 Selv om dette er effektivt, når det gjelder å redusere krysstale, er det uhyre uhensiktsmessig i forbindelse med den løsningen som er foreslått her fordi hver forskjellig bølgelengde innebærer enten en forskjellig kilde eller avsøking av en kilde ved et annet bølgelengdebånd, og dermed multipliseres innsamlingstiden med antall bølgelengdebånd som benyttes i systemet. I tilfelle med US-5,987,197 10 er dette sannsynligvis ikke noe tema fordi det konseptet tar sikte på bare akustiske grupper og det er derfor ingen avsøking av kilden. Følgelig kan hvert bølgelengdebånd være så smalt som gitterfremstillingsteknologien og begrensningene vedrørende brukermiljøet tillater (i praksis er temperaturavhengigheten til de sentral bølgelengdene til gitrene et alvorlig tema ved 15 oljefeltanvendelser).

I stedet blir det her foreslått å bestemme og korrigere krysstaleleddet. Selv om det er brysomt, er dette mulig å gjøre fordi det første sensorelementet ikke har noen krysstale, det andre elementet kan bare være beheftet med krysstale fra det første, og så videre. Det er derfor mulig å subtrahere krysstalefaseleddet på det 20 andre elementet på grunn av dobbeltrefleksjoner i det første elementet fra det målte andre elementets faseledd. Den samme prosessen kan repeteres suksessivt for hvert gruppeelement med økende kompleksitet med økende elementnummer. Til slutt kan kompleksiteten og, mer viktig, nøyaktigheten til korreksjonen bli umulig å behandle for lange grupper som kan tvinge frem en 25 inndeling i mindre grupper der gruppene blir avsøkt ved f.eks. forskjellige bølgelengder. Likevel skulle den korrektive løsningen, som er skissert ovenfor, gjøre det mulig å redusere det antall bølgelengder som brukes i systemet betydelig og også muliggjøre grupper bestående av identiske bølgelengder å bli konstruert, med den betydelige fordel ved at det bare kreves ett eneste gitter 30 mellom sensorelementer istedenfor to som i US-5,987,197.

Det vil endog være mulig å forskyve gitterbølgelengdene gradvis slik at det blir betydelig overlapping mellom tilstøtende gitre (siden hvert må være bredt nok til å reflektere ved den utformede refleksiviteten over et område av bølgelengder

tilstrekkelig til at laserfrekvensen kan søke for å bestemme den absolutte sensorelementutvetydigheten). Med en slik løsning vil laseren bli skannet over et bredere bølgelengdeområde enn refleksiviteten til et enkelt gitter, noe som begrenser antallet alternative veier som kan interferere med signalet for et spesielt gruppeelement.

Hvis måletiden er av viktighet, kan en viss grad av parallellisme innføres ved å sørge for flere innsamlingsdelsystemer (detektor, forforsterker og A/D-omformer med tilhørende digitalt minne og datareduksjon) for å samle inn forskjellige bølgelengdebånd samtidig. Kilden er da innrettet for å generere flere pulspar (ett i hvert av bølgelengdebåndene som gruppen er inndelt i) ved litt forskjellige tider (for å unngå optiske, ikke-lineære effekter).

Signal/støy-forholdet (SNR) som kan forventes, er blitt beregnet for grupper med reflektorer som hver har en refleksivitet på 0,2%. Tilfellet med en passiv brønnhullsgruppe (7 km nedføring fulgt av 3 km med avfølingsgruppe) fører til et forventet SNR på 100:1; innbefatningen av en fjernpumpet forsterker umiddelbart foran sensorgruppen 9 fører til et forbedret SNR på omkring 1500:1.

Fra en separat simulering, igjen for $L=10\text{m}$ og sampling ved fra 100 til 200 MSPS, faseoppløsningen utledet fra et gitt SNR, er den tilsvarende faseoppløsningen av størrelsesorden $0,8/\text{SNR}$ radianer. For et SNR på 100:1 er frynseoppløsningen av størrelsesorden 0,0015 frynse for hver av frekvensene. Usikkerheten ved målingen av gruppeforsinkelsen er da avhengig av usikkerheten til helningen av de tilpassede dataene.

I en sensorgruppe 9 hvor sensorelementene er 10 m lange og lys ved 1550 nm blir brukt (for hvilke gruppeindeksen $N=1,484$), blir det antatt at fasen kan oppløses til 1/1000 frynse, noe som gjør det mulig å bestemme temperaturen til $4\text{ }\mu\text{K}$.

En slik følsomhet indikerer en forbedring større enn fire størrelsesordener i evnen til å avlese temperaturgruppedata. En slik forbedring vil overvinne ulempene ved måling av temperatur i horisontale brønnenvendelser med nåværende distribuerte temperatursensortechnologi. Fiberen kan eventuelt blåses eller pumpes inn i brønnen forutsatt at reflektorene er belagt på nytt på en slik måte at den belagte diameteren er den samme som fiberen før gitteret er risset inn.

En annen anvendelse hvor evnen til å detektere mindre temperaturvariasjoner er uhyre verdifull, er for å detektere lekkasjer inn i rørledninger. Det skulle tilveiebringe mulighet til å detektere meget mindre gasslekkasjer og også lokalisering av mindre innsnevring i oljeledninger for å identifisere tidlig avsetninger av voks eller hydrater da det er plenty av tid til å rette på situasjonen.

I tilfelle av måling av strekk blir det foreslått bruke endringen i dobbeltbrytning i en fiber med høy dobbeltbrytning. Disse fibre er utformet for å innbefatte et høyt nivå med indre, asymmetrisk spenning forårsaket av forskjellige ekspansjonskoeffisienter. Dobbelbrytningen er meget følsom for temperatur, men også for strekk siden Poissons forhold for glass som utgjøre de spenningspåførende sektorene og resten av strukturen er markert forskjellige. For en frynseoppløsning på 1/1000 frynse, er strekkoppløsningen ventet å være av størrelsesorden 2 nε. Temperaturkryss-sensitiviteten vil imidlertid måtte tas i betraktning og kompenseres for.

Hvis den forutsagte oppfriskingshyppigheten er kjent, ville målingen av strekk i henhold til den løsningen som er presentert ovenfor, lett gjøre det mulig å spore bevegelser i stigerør, strømningsledninger, osv. Dette vil gjøre det mulig å identifisere potensiell skade (f.eks. forårsaket av landbevegelse) før den inntreffer. Det er også en anvendelse ved måling av selve røret, og det er blitt hevdet at målingen av strekk over overflaten av røret gjør det mulig å identifisere problemer slik som blokkeringer og korrosjon (som forårsaker svelling). Det er klart at et hvilket som helst måleobjekt, som kan omformes til strekk, kan anvendes til denne målingen.

I tilfelle av måling av trykk er én av løsningene å bruke en sidehullsfiber. Disse fibre oppfiser en sterk sensitivitet av dobbeltbrytningen overfor isostatisk trykk (og en forholdsvis lav temperatursensitivitet av dobbeltbrytningen). Erfaring i disse fibre indikerer en trykksensitivitet i størrelsesorden 1/20 frynser/psi/m. For $L = 10$ m og en frynseoppløsning på 1/1000 frynser, er den forventede trykkoppløsningen 0,002 psi i 5 ms.

Som antydnet ovenfor vil bruken av en sidehullsfiber tillate trykket i hver hydrokarbonsone å bli målt, eventuelt til det samme ytelsesnivå som ventet fra kvartskrystallmålere. Ett av problemene med distribuert trykkavføling er kommuni-

kasjonen med reservoartrykket. En løsning er illustrert på fig. 6. I hovedsak er avfølingsfiberen 1 plassert i et elliptisk rør 4 som har tetninger 42 ved hver ende og som er fylt med et trykkoverførende fluid, f.eks. silikonolje. Røret 41 er forseglet ved hver av reflektorene 2 og er overfylt med overskuddsfiber for å sikre at

5 rimelige strekknivåer ikke blir overført til fiberen 1. Trykk påført røret 41 blir overført til avfølingsfiberen 1 ved elastisk deformasjon av røret 41; isostatisk trykk har en tendens til å gjøre røret 41 flatere (den lille diameteren vil reduseres ytterligere) fordi tverrsnittsarealet til en ellipse blir redusert når forholdet mellom den store og lille akselen øker (dvs. når formen blir flatere). Dette har igjen en tendens til

10 å redusere det volumet som er forseglet i røret 41 og dermed overføre det påførte trykket til fiberen 1. Røret 41 virker dermed som en stiv belg.

Denne anordningen, hvor sensorelementene er lange, er spesielt passende for horisontale brønnen hvor tyngdekraft/densitet-effekter er små.

Plassering av flere rør ved forskjellige asimutverdier omkring rørledningen vil selvsagt muliggjøre en bestemmelse av fluiddensiteten og dermed

15 vanninnholdet. Som et grovt anslag for en 6 5/8" rørledning er differensialtrykket over en vertikal diameter ventet å være av størrelsesorden 0,20 psi, sammenlignet med 0,30 psi for mineralholdig vann. Med en oppløsning på 1 mpsi (som vil ta <1 s integrasjonstid) kan vannfyllingsgraden måles opp til noen få prosent. For å oppnå

20 dette nøyaktighetsnivået må imidlertid de to fibre kalibreres til den nøyaktighet som er antydnet ovenfor. Dette vil sannsynligvis måtte oppnås med en slags inngripen, f.eks. ved å sikre at fluidet mellom sensorene midlertidig er kjent.

Med den forventede trykkoppløsningen vil slike sett med trykksensorgrupper, f.eks. plassert 90° omkring en produksjonsrørledning, gjøre

25 det mulig å bestemme orienteringen av de fire elementene fra bare gravitasjonen. Hvis sensorelementer er integrert med rørledningen (i motsetning til å være festet på, eventuelt unøyaktig), så kan i sin tur orienteringen av rørledningen selv bestemmes. Dette kan så gjøre det mulig å utforme rørledningen med orienteringsspesifikke karakteristikk (f.eks. slisser som vender bare oppover).

30 Ved den hastighet ved hvilken transduseren er ventet å reagere, skulle det være mulig å spore induserte hendelser. Med en meget forbedret sensitivitet og responshastighet er løsningen ventet å virke ved langt høyere strømningshastigheter, noe som tillater øket bruk av strømningsmålere basert på

hetetråds-anemometri. I tillegg, behøver den induserte hendelsen ikke å begrenses til avkjøling eller oppvarming; hvis f.eks. en stor boble (eller fluid med markert forskjellig densitet fra produksjonsfluidet) ble injisert inn i fluidstrømningen, så skulle densiteten som avlest mellom vertikalt atskilte gruppeelementer
 5 (eventuelt ved å bruke separate grupper anordnet omkring periferien til rørledningen) detektere én differensialtrykkendring og dermed passasje av en boble.

I tillegg kan det være mulig å spore naturlig forekommende hendelser. Det finnes termodynamiske svingninger i de fleste egenskaper (lokal temperatur, trykk,
 10 densitet) for fluider. Uperfekt blanding av fluider med forskjellig temperatur eller densitet eller trykk kan f.eks. alle detekteres ved :K, mpsi-nivået.

Fibere med belegg utformet for å reagere på spesielle måleobjekter ved å strekke eller krympe kan påføres denne avspøringsløsningen.

Ta f.eks. i betraktning resistive grupper som forsøker å måle fremkomsten
 15 av en vannfront til et borehull. Disse gruppene måler i virkeligheten meget små spenninger. Hvis fiberbelegget var elektrostriktivt (f.eks. piezoelektrisk), så kan en liten spenning påført over belegget brukes til å avføle små spenninger. I denne forbindelse er karbonbelegget som er påført visse fibertyper, konduktivt (i det minste nok til de langsomme responstidene som er nødvendig her), noe som betyr at
 20 bunnelektroden allerede er tilstede på slike fibere. Rapporterte sensitiviteter (se Imai m.fl., Journal of Lightwave Technology, v LT5, p 926-931, 1987) for PVDF-piezoelektriske belegg er av størrelsesorden 10^{-5} rad/m/ (V/m) for et belegg med tykkelse 60 μm . I dette tilfelle vil dermed en spenning på 1 mV påført over et slikt belegg resultere i en faseendring på omkring 1,6 mrad. Hvis oppløsningen er av
 25 størrelsesorden 0,01 rad, vil det være nødvendig med 36 målinger for å oppløse 1mV i et sensorelement på 10 m, dvs. omkring 3,5 ms med en PRF på 10 kHz, dvs. en gjennomsnittstid på 1 time nødvendig for å nå en mikrovolt. Det er klart at meget omhyggelig temperaturkompensasjon vil være nødvendig for å nå dette nøy-
 30 aktighetsnivået. Likeledes er magnetostriktive belegg blitt brukt til å måle magnetfelter, og de kan brukes i denne forbindelse for måling av magnetfelter og elektrisk strøm.

Alternativt kan spesialiserte belegg, utformet for å reagere på spesifikke kjemiske stoffer ved å strekke fiberen, anvendes som kjemiske detektorer.

Det foreliggende systemet kan således brukes til samtidig å måle to av de følgende parameterne: trykk, temperatur og strekk, idet målinger, som beskrevet ovenfor, kan brukes til å utlede andre parametere (slik som kjemiske, elektriske og magnetiske egenskaper).

- 5 Det er ovenfor blitt vist hvordan trykk og strekk kan måles sammen med temperatur. Det kan være nødvendig å måle alle tre parameterne samtidig. Dette kan innebære fibere som har forskjellige trykk- og strekk-sensitivitetskombinasjoner. Et eksempel vil være en "ren" sidehullsfiber og en annen sidehullsfiber som også inneholder spenningspåførende sektorer. Ideelt vil disse fibre bli holdt
- 10 sammen (f.eks. i den samme kappen, slik som i et bånd med to fibere) eller en mer kompleks glasstruktur kan inneholde flere kjerner, f.eks. én kerne plassert mellom et par sidehull og den andre mellom et par spenningspåførende sektorer.

PATENTKRAV

1. Fremgangsmåte for å måle minst én valgt parameter ved en posisjon i et område av interesse, k a r a k t e r i s e r t v e d a t fremgangsmåten omfatter følgende trinn:

å sende optiske pulser ved et antall på forhånd valgte undersøkelsesbølgelengder inn i en optisk fiber (1) utplassert langs området av interesse, reflektorer (2) er gruppert langs den optiske fiberen for å danne en gruppe (9) av sensorelementer, en optisk veilengde (L) mellom de nevnte reflektorer er avhengig av den valgte parameteren;

å detektere det returnerte, optiske interferenssignalet for hver av de på forhånd valgte bølgelengder; og

å bestemme, fra det optiske interferenssignalet en absolutt optisk veilengde (L) mellom to reflektorer (2) på den nevnte posisjonen, og fra den absolutte, optiske veilengden (L) så bestemmes verdien av den valgte parameter på nevnte posisjon,

hvor trinnet med å bestemme den absolutte, optiske veilengden (L) omfatter å utføre en prosess i hvilken den deriverte av fasen som en funksjon av bølgelengde er beregnet fra et del-sett av interferenssignaler, ved hjelp av derivatet og en estimert verdi for den optiske veilengden (L) å beregne faseforholdet mellom interferenssignalene, og faseforholdet oppnådd på denne måten blir brukt til å revidere den estimerte verdien for den optiske veilengden (L), idet prosessen blir gjentatt for å øke del-sett av de gjenværende bølgelengder i rekkefølge, på basis av den optiske veilengden (L) estimert for det umiddelbart foregående del-settet i sekvensen, for derved å revidere progressivt den optiske veilengden (L) inntil den er kjent til et ønsket nøyaktighetsnivå.

2. Fremgangsmåte som angitt i krav 1, hvor nevnte optiske fiber består av polarisasjons-oppretholdende fiber og lys sendes inn i fiberen på en slik måte at effekten til lyssignalet blir i det vesentlige likt fordelt mellom de ortogonalt polariserte-forplantningsmoduser til fiberen, for derved samtidig å undersøke hver prinsipielle tilstand av polarisasjon av fiberen, returinterferenssignalene fra begge prinsipielle tilstander av polarisasjonen blir brukt hver for seg i den nevnte fremgangsmåten for å bestemme den absolutte, optiske veilengden (L) for hver utbredelsesmodus uavhengig av den andre modusen.

3. Fremgangsmåte som angitt i krav 1, hvor den optiske fiberen omfatter polarisasjons-oppretholdende fiber og lys sendes inn i fiberen på en slik måte at effekten av lyssignalet først blir ledet fullstendig inn i én av de prinsipielle tilstander av polarisasjon og deretter den andre, for derved å undersøke prinsipielle tilstander av polarisering sekvensielt, de returnerte interferenssignalene fra begge de prinsipielle tilstandene av polarisasjonen blir brukt hver for seg i den nevnte fremgangsmåten for å bestemme den absolutte, optiske veilengden (L) for hver utbredelsesmodus uavhengig av den andre modusen.

4. Fremgangsmåte som angitt i krav 1, hvor den valgte parameteren omfatter temperatur.

5. Fremgangsmåte som angitt i krav 1, hvor den valgte parameteren omfatter belastning.

6. Fremgangsmåte som angitt i krav 5, hvor den optiske fiberen er en høydobbeltbrytende fiber, dobbeltbrytningen endres som reaksjon på belastning som påføres den optiske fiberen.

7. Fremgangsmåte ifølge krav 6, hvor dobbeltbrytningen til høydobbeltbrytende fiber også endres som reaksjon på temperatur, og

fremgangsmåten omfatter videre å kompensere det returnerte, optiske interferenssignalet for effekter som skyldes temperaturen på den nevnte posisjonen.

5 8. Fremgangsmåte som angitt i krav 1, hvor den valgte parameteren innbefatter trykk.

9. Fremgangsmåte ifølge krav 8, hvor den optiske fiber omfatter en side-hul fiber.

10

10. Fremgangsmåte som angitt i krav 9, hvor hvert sensorelement av fiberen er plassert innenfor et tett elliptisk rør fylt med et trykkoverførende fluid.

15

11. Fremgangsmåte som angitt i krav 1, hvor den valgte parameteren er avhengig av en lokalisert hendelse som beveger seg langs området av interesse, og fremgangsmåten omfatter å bestemme verdien av den valgte parameteren over tid på mer enn én av de nevnte posisjoner, og å bestemme bevegelsen av den lokaliserte hendelsen fra de bestemte verdier av den valgte parameteren.

20

12. Fremgangsmåte som angitt i krav 11, hvor den lokaliserte hendelsen er en bruker-indusert hendelse, og fremgangsmåten omfatter videre å indusere den lokaliserte hendelsen.

25

13. Fremgangsmåte som angitt i krav 11, hvor den lokaliserte hendelsen er et volum av fluid innen området av interesse som har en annen temperatur, trykk eller tetthet i forhold til omgivende fluid i området av interesse, den valgte parameteren er henholdsvis temperatur, trykk eller tetthet.

30

14. Fremgangsmåte som angitt i krav 1, hvor minst to valgte parametere måles samtidig.

- 5 15. Fremgangsmåte som angitt i krav 1, hvor den målte verdi av parameteren benyttes for å bestemme verdien for en ytterligere målestørrelse avhengig av parameteren, og hvor den optiske fiber er forsynt med et belegg som reagerer på den nevnte ytterligere målestørrelsen ved strekking eller krymping.
16. Fremgangsmåte som angitt i krav 15, hvor nevnte belegg er elektrostriktivt.
- 10 17. Fremgangsmåte som angitt i krav 15, hvor nevnte belegg er magneto-striktivt.
18. Fremgangsmåte som angitt i krav 15, hvor nevnte belegg er følsom for en valgt kjemisk målestørrelse.
- 15 19. Fremgangsmåte i henhold til krav 1, hvor området av interesse ligger innenfor en oljebrønn.
- 20 20. Apparat for måling av en valgt fysisk parameter ved en posisjon i et område av interesse, k a r a k t e r i s e r t v e d a t apparat omfatter: en optisk fiber (1) for utplassering langs området av interesse, den optiske fiberen har reflektorer (2) langsmed som danner en gruppe (9) av sensorelementer, en optisk veilengde (L) mellom de nevnte reflektorer (2) er avhengig av den valgte parameteren;
- 25 kildeanordning (3) for å sende optiske pulser med et antall på forhånd valgte undersøkelsesbølgelengder inn i nevnte fiber;
- 30 signaldeteksjonsorganer (12a, 12b, 40a, 40b) som er innrettet til å detektere det returnerte, optiske interferenssignalet for hver av de på forhånd valgte bølgelengder; og
- en signalbehandlingsanordning innrettet for å bestemme fra det optiske

interferenssignalet en absolutt optisk veilengde (L) mellom to reflektorer (2) på den nevnte posisjonen, og å bestemme fra den absolutte, optiske veilengden (L) verdien av den valgte parameteren ved den nevnte posisjonen,

5

hvor signalbehandlingsanordningen er innrettet for å bestemme den absolutte, optiske veilengden (L) ved å utføre en fremgangsmåte i hvilken den deriverte av fasen som en funksjon av bølgelengde er beregnet fra et del-sett av interferenssignaler, ved hjelp av derivatet og en anslått verdi for den optiske veilengden (L) for å beregne faseforholdet mellom interferenssignalene, og faseforholdet oppnådd på denne måten blir brukt til å revidere den estimerte verdien for den optiske veilengden (L), idet prosessen blir gjentatt for å øke del-sett av de gjenværende bølgelengder i rekkefølge, på basis av den optiske veilengden (L) estimert for det umiddelbart foregående del-settet i sekvensen, for derved å revidere progressivt den optiske veilengden (L) inntil den er kjent til et ønsket nøyaktighetsnivå.

10

15

20

25

21. Apparat som angitt i krav 20, hvor den optiske fiberen innbefatter polarisasjons-oppretholdende fiber, og apparatet omfatter videre en effekt utsendende innretning (8) operativ for å sende optiske pulser inn i fiberen på en slik måte at effekten til de optiske pulsene er i det vesentlige fordelt mellom de ortogonalt polariserte-forplantningsmodi til fiberen, for derved å undersøke samtidig hver prinsipielle tilstand av polarisasjon av fiberen; og signalbehandlingsanordningen er innrettet til å bruke de returnerte optiske interferenssignaler fra begge de prinsipielle tilstander av polarisasjon separat for å bestemme den absolutte, optiske veilengden (L) for hver utbredelsesmodi uavhengig av den andre modusen.

30

22. Apparat som angitt i krav 20, hvor den optiske fiber innbefatter polarisasjons-oppretholdende fiber, og apparatet omfatter videre en polarisasjon modulator (11) operativ for å sende de optiske pulser inn i fiberen på en slik måte at effekten av de optiske pulsene først er ledet helt

inn i én av de prinsipielle tilstander av polarisasjon av fiberen og deretter den andre, for derved å undersøke de prinsipielle tilstander av polarisasjon sekvensielt; og signalbehandlingsanordningen er innrettet til å bruke de returnerte optiske interferenssignaler fra begge de prinsipielle tilstander av polarisasjon separat for å bestemme den absolutte, optiske veilengden (L) for hver utbredelsesmodus uavhengig av den andre modusen.

23. Apparat som angitt i krav 20, hvor parameteren omfatter temperatur.

24. Apparat som angitt i krav 20, hvor parameteren omfatter belastning.

25. Apparat som angitt i krav 24, hvor den optiske fiber er en høy-dobbeltbrytende fiber, dobbeltbrytningen endres som reaksjon på belastning som påføres den optiske fiberen.

26. Apparat som angitt i krav 25, hvor dobbeltbrytningen av den høy-dobbeltbrytende fiberen også endres som reaksjon på temperatur, og signalbehandlingsanordningen er videre innrettet for å kompensere det returnerte, optiske interferenssignalet for effekter som skyldes temperaturen på den nevnte posisjonen.

27. Apparat som angitt i krav 20, hvor parameteren omfatter trykk.

28. Apparat som angitt i krav 27, hvor den optiske fiber omfatter en side-hull fiber.

29. Apparat som angitt i krav 28, hvor hvert sensorelement av fiberen er plassert innenfor et tett elliptisk rør fylt med et trykkoverførende fluid.

30. Apparat ifølge krav 20, hvor den valgte parameteren er avhengig av en lokalisert hendelse som beveger seg langs området av interesse, og signalbehandlingsanordningen er innrettet til å bestemme verdien av den valgte parameteren over tid på mer enn én av de nevnte posisjonene, og å

bestemme bevegelsen av lokaliserte hendelser fra de bestemte verdier av den valgte parameteren.

5 31. Apparat ifølge krav 30, hvor den lokaliserte hendelsen er en bruker-indusert hendelse.

10 32. Apparat ifølge krav 31, hvor den lokaliserte hendelsen er et volum av et fluid inne i området av interesse som har en annen temperatur, trykk eller tetthet fra omgivende fluid i området av interesse, den valgte parameteren er henholdsvis temperatur, trykk, eller tetthet.

15 33. Apparat som angitt i krav 20, og videre for måling av en andre valgt fysisk parameter ved en posisjon innenfor området av interesse, hvor den optiske veilengden (L) mellom de nevnte reflektorer (2) videre er avhengig av den andre valgte parameteren; og signalbehandlingsanordningen er videre innrettet til å bestemme verdien av den andre valgte fysiske parameteren fra den beregnede absolutte, optiske veilengden (L).

20 34. Apparat som angitt i krav 20, virksom for å bruke den målte verdien for parameteren for å fastsette en verdi for en ytterligere målestørrelse avhengig av parameteren, og hvor den nevnte optiske fiberen er forsynt med et belegg som reagerer på den nevnte ytterligere målestørrelsen ved strekking eller krymping.

25 35. Apparat som angitt i krav 34, hvor nevnte belegg er elektro-strikativt.

36. Apparat som angitt i krav 34, hvor nevnte belegg er magneto-strikativt.

30 37. Apparat som angitt i krav 34, hvor belegget er laget for å være følsom for en valgt kjemisk målestørrelse.

38. Apparat som angitt i krav 20, hvor kildeanordningen kan bringes til å sende lys ved en fast bølgelengde, og ved en varierende bølgelengde, inn i

fiberen, og signalbehandlingsanordningen er innrettet til å bruke interferenssignalet fra undersøkelsen på den faste bølgelengden til å bestemme høyfrekvente faseoverganger.

5 39. Apparat som angitt i krav 38, hvor en optisk hjelpefiber for utplassering gjennom området av interesse omfatter reflektorer (2) som blir plassert langs fiberen for å danne en hjelpegruppe (9) med sensorelementer, kileanordningen er innrettet for å sende fast bølgelengde signalet inn i hjelpefiberen.

10

40. Apparat som angitt i krav 39, hvor hjelpefiberen har et belegg konstruert for å forbedre akustiske følsomhet.

15

41. Apparat som angitt i krav 38, hvor signalbehandlingsanordningen dessuten er operativ for å bruke de høyfrekvente faseendringer for å korrigere dynamiske feil i de returnerte optiske interferenssignalene.

42. Apparat ifølge krav 20, hvor området av interesse ligger innenfor en oljebrønn.

1/5

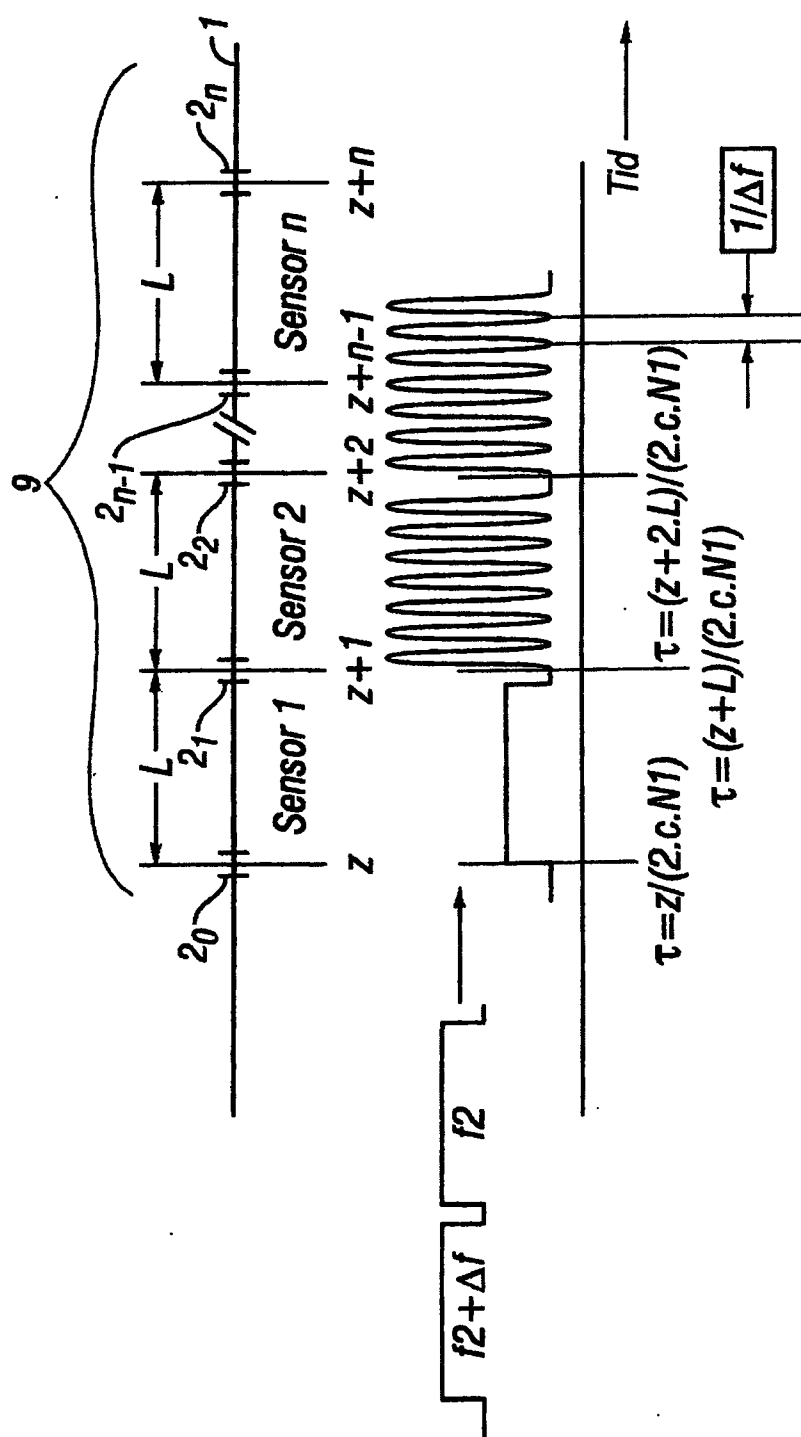


FIG. 1

2/5

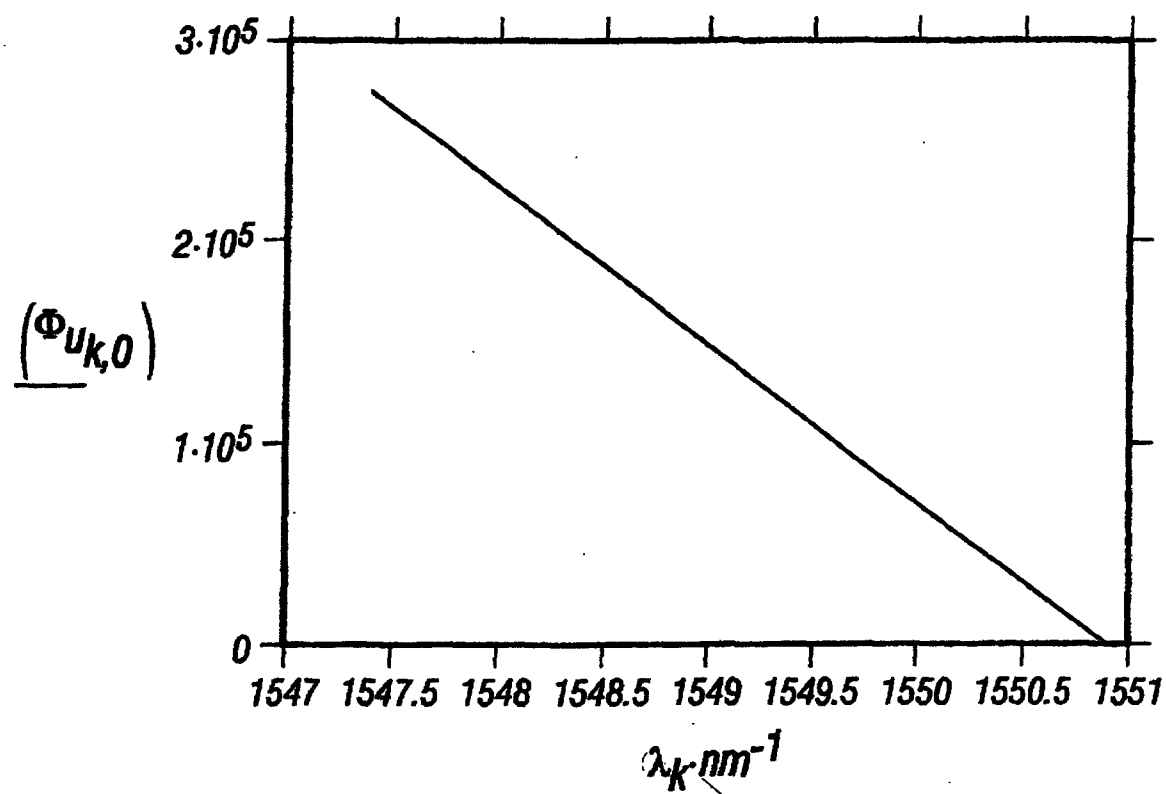


FIG. 2

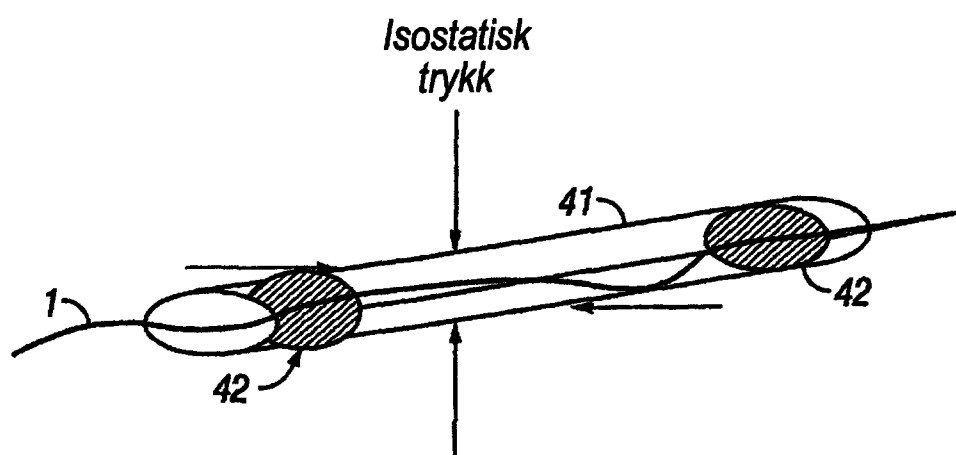


FIG. 6

3/5

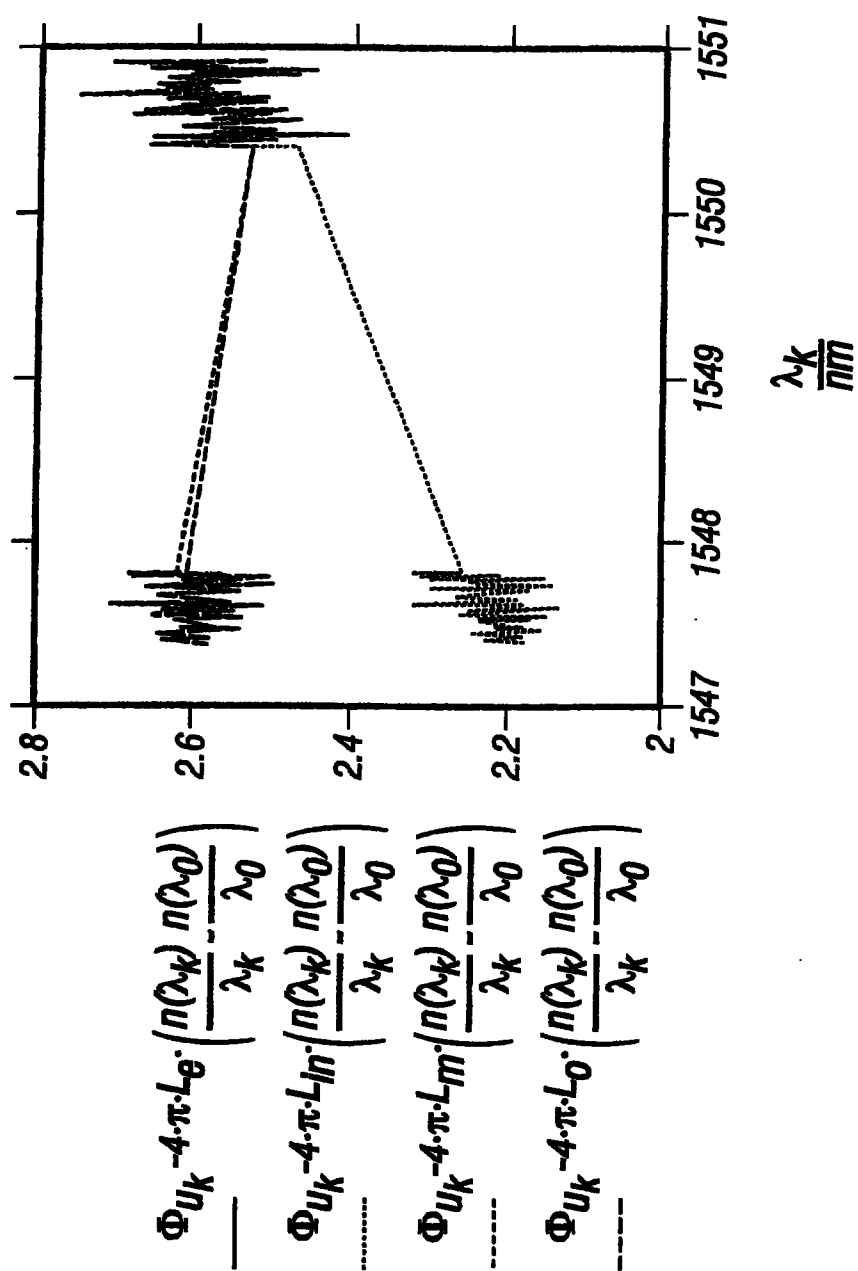


FIG. 3

4/5

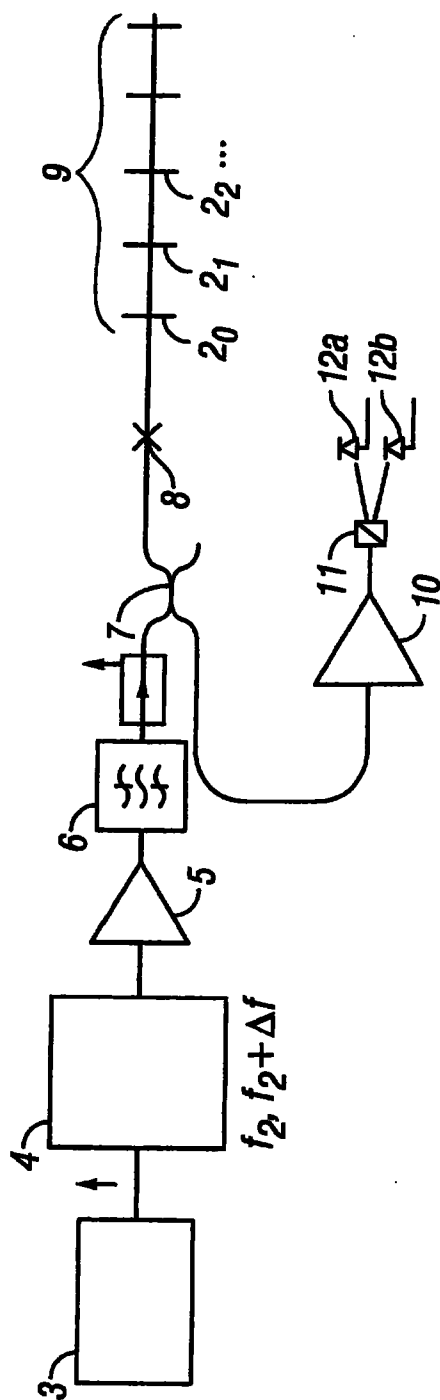


FIG. 4

5/5

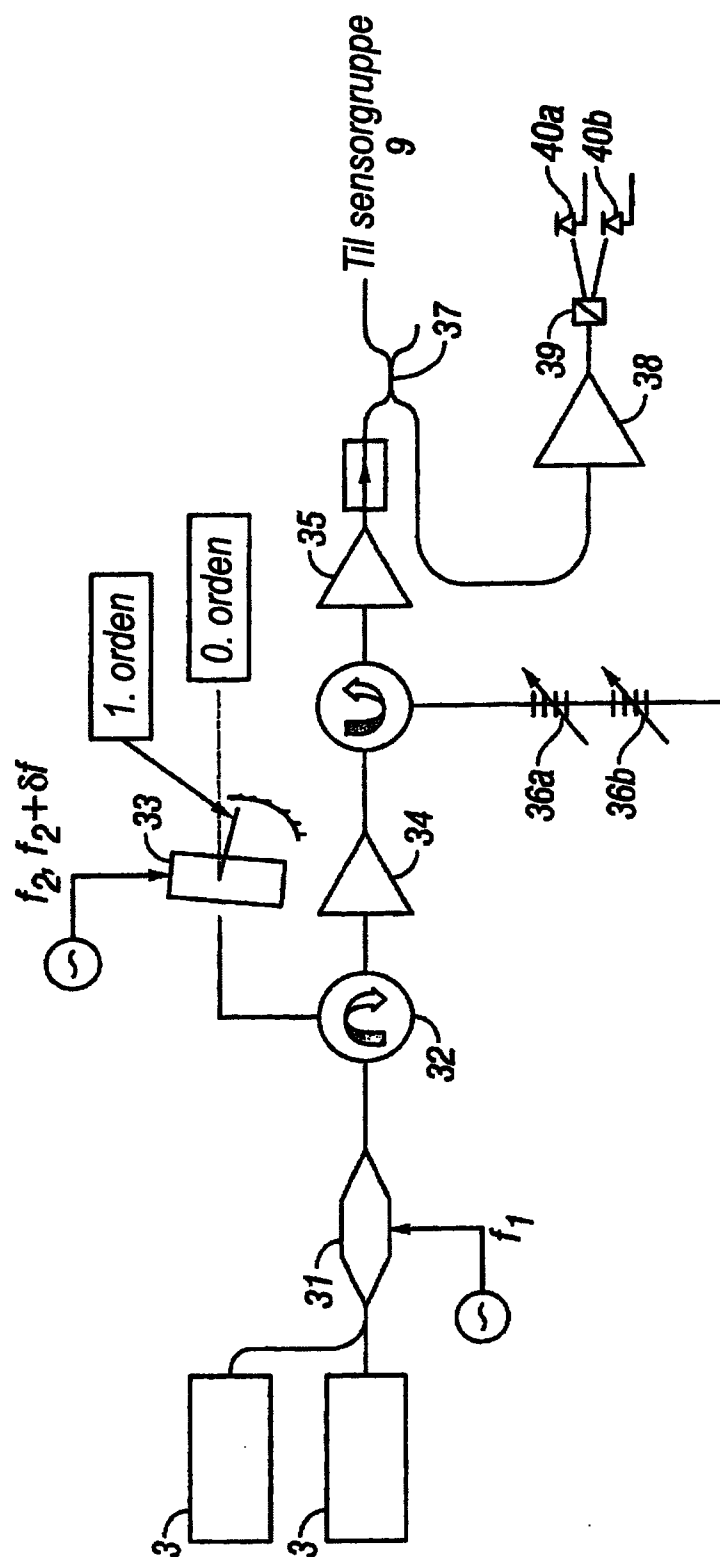


FIG. 5