



(12) **PATENT**

(19) NO

(11) **324699**

(13) **B1**

NORGE

(51) Int Cl.

G01D 5/353 (2006.01)

G01H 9/00 (2006.01)

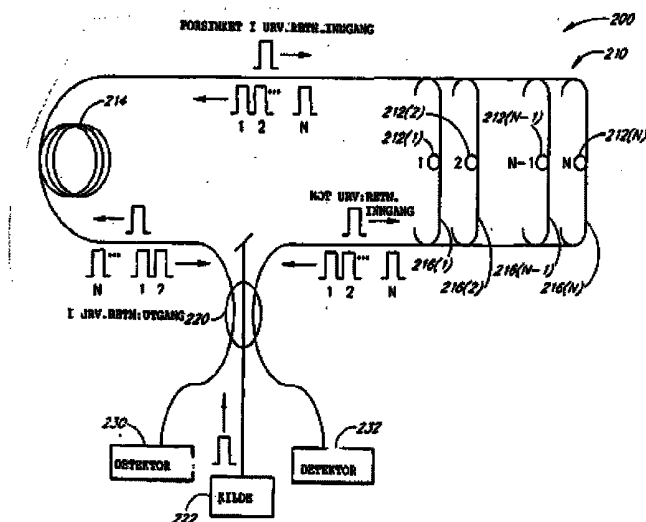
G01N 29/00 (2006.01)

Patentstyret

(21)	Søknadsnr	20004954	(86)	Int.inng.dag og søknadsnr	1999.03.29 PCT/US99/06763
(22)	Inng.dag	2000.10.02	(85)	Videreføringsdag	2000.10.02
(24)	Løpedag	1999.03.29	(30)	Prioritet	1998.04.03, US, 80542 1999.02.19, US, 253446
(41)	Alm.tilgj	2000.11.30			
(45)	Meddelt	2007.12.03			
(73)	Innehaver	The Board of Trustees of the Leland Stanford Junior University, Stanford University, Stanford, CA 94305, US			
(72)	Oppfinner	Gordon S. Kino, Stanford, CA, US Michel J F Digonnet, 1045 College Avenue, CA94306 SANTA BARBARA, US H. John Shaw, Stanford, CA, US Benjamin J Vakoc, Mountain View, CA, US			
(74)	Fullmektig	Zacco Norway AS, Postboks 2003 Vik, 0125 OSLO			

(54)	Benevnelse	Fiberoptisk akustisk sensoroppstilling basert på Sagnac-interferometer
(56)	Anførte publikasjoner	US 5 694 114
(57)	Sammendrag	

En fiberoptisk akustisk sensoroppstilling er basert på et Sagnac-interferometer i stedet for å være basert på Mach-Zehnder-interferometere som i kjente akustiske sensoroppstillinger. Den fiberoptiske akustiske sensoroppstilling blir benyttet til å påvise akustiske bølger i vann. Ved å basere sensoroppstillingen på Sagnac-interferometeret i stedet for på et Mach-Zehnderinterferometer, får sensoroppstillingen et stabilt forspenningspunkt, har redusert fasestøy, har større dynamisk område og gjør det mulig å benytte en bredbåndssignalkilde i stedet for å kreve en mer kostbar smallinjet laser. Et stort antall akustiske sensorer kan multiplexes inn i arkitekturen for Sagnac-interferometer.



Foreliggende oppfinnelse ligger på feltet for fiberoptiske akustiske sensoroppstillinger der lys forplantes i oppstillingene og der virkningene av akustiske signaler og lys som kastes tilbake fra oppstillingen blir analysert for å bestemme egenskapene ved de akustiske signaler.

5

Fiberoptikkbaserte akustiske sensorer er lovende alternativer til vanlige elektroniske sensorer. Blant deres fordeler er høy følsomhet, stort dynamisk område, lett vekt og kompakt størrelse. Muligheten til lett å multiplekse et stort antall fiberoptiske sensorer på felles busser gjør også fiberoptiske sensorer attraktive for storskalaoppstillinger. Den seneste vellykkede utvikling av flere lavforsterkende erbiumdopede fiberforsterkere (EDFA'er) i en fiberoptisk sensoroppstilling for å øke antall sensorer som kan drives med et enkelt fiberpar har gjort storskalafiberoptiske sensoroppstillinger ennå mer konkurransedyktige.

10

For akustisk påvisning, har den valgte fiberoptiske sensor vært Mach-Zehnder-interferometrisk sensor. I enhver interferometrisk sensor blir fasemodulasjon avbildet på en intensitetsmodulasjon ved hjelp av en hevet kosinusfunksjon. På grunn av denne ulineære overføringsfunksjon vil en sinusoidal fasemodulasjon frembringe høyereordens harmoniske. Et interferometer basert på kvadratur (interfererende stråler $\pi/2$ ute av fase) har en maksimal reaksjon på den første ordens harmoniske og minimal reaksjon på den andre ordens harmoniske. Av denne årsak er kvadratur det foretrukne forspenningspunkt. Siden forspenningspunktet har en drift bort fra kvadratur (f.eks. på grunn av eksterne temperaturvekslinger) vil reaksjonen på den første ordens harmoniske avta og reaksjonen på den andre harmoniske øke. Når interferometeret er forspent til 0 eller π ute av fase, vil den første ordens harmoniske forsvinne fullstendig. Denne nedsatte reaksjonen på den første ordens harmoniske (som skyldes forspenningspunktens drift bort fra kvadratur) blir betegnet som signalfading.

20

25

På grunn av at Mach-Zehnder-interferometriske sensorer har et ustabilt forspenningspunkt er de særlig utsatt for problemet med signalfading som nettopp er nevnt. For å overvinne signalfading, kreves det en demodulasjon av det returnerte signal. Den typiske demodulasjonsteknikk er "Phase-Generated Carrier" (PGC)-løsningen som krever en banemistilpasset Mach-Zehnder-interferometrisk sensor. (Se f.eks. Anthony Dandridge, m.fl., *Multiplexing of Interferometric Sensors Using Phase Carrier Techniques*, Journal of Lightwave Technology, utgave LT-5, nr. 7, juli 1987, s. 947-952). Denne baneubalanse fører også til omformning av laserfasestøy til intensitetsstøy, noe som begrenser ytelsene fra Mach-Zehnder-interferometriske sensoroppstillinger ved lave frekvenser og

30

35

stiller strenge krav til linjebredden for kilden. Dette smale linjebreddekrav har forsinket utviklingen av forsterkede Mach-Zehnder-interferometriske sensoroppstillinger ved 1,55 μm .

5 Sagnac-interferometerene har fått omfattende bruk i fiberoptiske gyroskoper. (Se f.eks. B. Culshaw, m.fl., *Fibre optic gyroscopes*, Journal of Physics E (Scientific Instruments), utgave 16, nr. 1, s. 5-15). Det er blitt foreslått at Sagnac-interferometeret kunne benyttes til påvisning av akustiske bølger (se f.eks. E. Udd, *Fiber-optic acoustic sensor based on the Sagnac interferometer*, Proceedings of the SPIE-The International Society
10 for Optical Engineering, utgave 425, 1983, s. 90-91; Kjell Kråkenes, m.fl., *Sagnac interferometer for underwater sound detection; noise properties*, OPTICS LETTERS, utgave 14, nr. 20, 15. oktober 1989, s. 1152-1145; og Sverre Knudsen, m.fl., *An Ultra-sonic Fiber-Optic Hydrophone Incorporating a Push-Pull Transducer in a Sagnac In-*
15 *terferometer*, JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, utgave 12, nr. 9, september 1994, s. 1699-1700). På grunn av sin fellesbaneutførelse er Sagnac-interferometeret resiprokt og har derfor et stabilt forspenningspunkt som eliminerer signalfading og motvirker omdannelse av kildefasestøy til intensitetsstøy. Av den grunn er Sagnac-interferometeret immunt overfor fasestøy som begrenser Mach-Zehnder-interferometriske sensorer ved lave frekvenser.

20

Sagnac-interferometeret er også blitt benyttet i målesystemer. For eksempel beskriver U.S. patent nr. 5,694,114 tilhørende Udd en koherent alarm for sikkerhetskommunikasjonssystemer som benytter et par enkelmodus fiberoptiske kabler i kombinasjon med en eller flere lyskilder, fasemodulatorer, detektorer og polarisasjonsomkastende kompo-
25 nenter til å danne et Sagnac-interferometer. Som vist f.eks. på figurene 13A og 19 i U.S. patent nr. 5,694,114, kan to Sagnac-interferometere dele et felles måleelement ved bruk av to lyskilder som har forskjellige optiske bølgelengder.

Foreliggende oppfinnelse tilveiebringer en måleanordning som benytter et Sagnac-
30 interferometer, hvilken måleanordning er kjennetegnet ved de trekk som fremgår av det vedfølgende selvstendige patentkrav 1.

Ytterligere fordelaktige trekk ved foreliggende oppfinnelses måleanordning som benyt-
ter et Sagnac-interferometer fremgår av de vedfølgende uselvstendige patentkravene 2
35 til og med 17.

Foreliggende oppfinnelse tilveiebringer en fremgangsmåte som benytter et Sagnac-interferometer, hvilken fremgangsmåte er kjennetegnet ved de trekk som fremgår av det vedfølgende selvstendige patentkrav 18.

- 5 Ytterligere fordelaktige trekk ved foreliggende oppfinnelses fremgangsmåte som benytter et Sagnac-interferometer fremgår av de vedfølgende uselvstendige patentkravene 19 til og med 25.

Et trekk ved foreliggende oppfinnelse er et akustisk sensorsystem som omfatter en lys-
 10 kilde. En kobler mottar lyset fra kilden, kobler en første del av lyset til en første koblerport og kobler en andre del av lyset til en andre koblerport. En interferometrisk sløyfe har en første ende koblet til den første koblerport for å motta den første del av lyset og har en andre ende koblet til den andre koblerport for å motta den andre del av lyset. Den interferometriske sløyfe forplanter den første del av lyset i en første retning til den
 15 andre koblerport og forplanter den andre del av lyset i en andre retning motsatt den første retning til den første koblerport. Den interferometriske sløyfe omfatter en forsinkelsesdel. Forsinkelsesdelen har en første ende i nærheten av den første ende av den interferometriske sløyfe og har en andre ende. Forsinkelsesdelen innfører en tidsforsinkelse for lys som passerer gjennom forsinkelsesdelen fra den første ende av forsinkelsesdelen
 20 til den andre ende av forsinkelsesdelen og for lys som passerer gjennom forsinkelsesdelen fra den andre ende av forsinkelsesdelen til den første ende av forsinkelsesdelen. En oppstilling har en første ende koblet til den andre ende av forsinkelsesdelen og har en andre ende koblet til den andre ende av sløyfen. Oppstillingen omfatter minst en første akustisk sensor og en andre akustisk sensor koblet mellom den første ende av oppstillingen og den andre ende av oppstillingen. Den andre akustiske sensor er plassert lenger
 25 fra den andre ende av forsinkelsesdelen og lenger fra den andre ende av sløyfen, enn den første akustiske sensor for at den andre akustiske sensor skal motta lys på et annet tidspunkt enn den første akustiske sensor. Den første akustiske sensor og den andre akustiske sensor reagerer på innkommende akustisk signal for å modulerer lys som passerer gjennom i de første og andre retninger. Minst en detektor mottar lys som returnerer kobleren fra den interferometriske sløyfe. Detektoren påviser lys som er modulert av den første akustiske sensor på et første tidspunkt og påviser lys som er modulert av den akustiske sensor på et andre tidspunkt etter det første tidspunkt. Detektoren frembringer et detektorutgangssignal. For hver sensor vil lyspulsene som forplantes gjennom sensoren i motsatte retninger gjøre dette på forskjellige tidspunkter. For de det akustiske signal som skal påvises forandres i løpet av tidsforsinkelsen som innføres i sløyfen, blir de
 35 to optiske signaler som forplanter seg i motsatte retninger gjennom hver sensor utsatt

for forskjellige faseskyvninger som skyldes det akustiske signal. Når de optiske signaler blir ført sammen ved sløftekobleren, frembringer den forskjellige faseforskyvning en amplitudemodulasjon som påvises av detektoren.

- 5 I noen utførelser omfatter det akustiske sensorsystem videre en andre forsinkelsesdel. Den andre forsinkelsesdel er koblet til den interferometriske sløyfe slik at bare en del av lyset forplanter seg gjennom den andre forsinkelsesdel. Den andre forsinkelsesdel bevirker at hver av de første og andre sensorer forplanter lys forsinket bare av den første forsinkelsesdel og også forplanter lys som er forsinket av både den første forsinkelsesdel og den andre forsinkelsesdel. Detektoren mottar derved minst to par interfererende
10 signaler fra hver av de første og andre sensorer.

- I særlige utførelser omfatter det akustiske sensorsystem dessuten et flertall forsterkere som er innskutt i oppstillingen for å utligne tap som skyldes deling av lyset mellom de
15 første og andre sensorer.

I noen utførelser blir det modulerte lys fra den første akustiske sensor adskilt fra det lys som er modulert av den andre akustiske sensor ved tidsdelt multipleksing.

- 20 En alternative utførelser, blir lyset modulert ved kilden for å frembringe frekvensdelt multipleksing av de returnerte signaler. I slike utførelser omfatter systemet videre en generator som frembringer en varierende frekvens. En intensitetsmodulator modulerer lyset fra lyskilden med den varierende frekvens. En elektronisk forsinker mottar den varierende frekvens og frembringer en forsinket varierende frekvens. Et blandetrinn
25 blander detektorens utgangssignal og den forsinkede varierende frekvens for å frembringe en respektiv svevefrekvens svarende til hver av de første og andre akustiske sensorer. Hver svevefrekvens har respektive sidebånd svarende til et tilhørende respektivt akustisk signal som påvises av de respektive første og andre akustiske sensorer.
- 30 I en ytterligere alternativ utførelse, blir retursignalene multiplekset ved kodedelt multipleksing. I denne alternative utførelse omfatter det akustiske sensorsystem videre en kodegenerator som frembringer en digital kode. En intensitetsmodulator modulerer lyset fra lyskilden med denne digitale kode. En elektronisk forsinker innfører en valgt forsinkelse i den digitale kode for å frembringe en forsinket digital kode. En korrelator korrelerer detektorens utgangssignal og den digitale kode for å frembringe et demultiplekset
35 signal svarende til et akustisk signal som påvises av en utvalgt av den første og den andre akustiske sensor. Den utvalgte av den første og den andre sensor velges av den valgte

forsinkelse. Ved å forandre den elektroniske forsinkelse, kan hver av sensorsignalene demultiplekseres i rekkefølge.

Den foreliggende oppfinnelse kan med fordel innbefatte en depolarisator i sløyfen for å
5 depolarisere det lys som forplanter seg i denne, for dermed å sikre at lys forplanter seg i begge polarisasjonstilstander gjennom sensorene.

Et annet trekk ved foreliggende oppfinnelse er et Sagnac-interferometrisk målesystem som omfatter et første Sagnac-interferometer. Det første Sagnac-interferometer har en
10 lyskilde som frembringer lys som et flertall lypulser som kommer i avstand fra hverandre. En kobler kobler lypulsene til en første koblerport og en andre koblerport. En optisk bane kobler lyset til fra den første koblerport til andre koblerport og fra den andre koblerport til den første koblerport. Den optiske bane har en forsinkelsesdel i nærheten av den første koblerport. Forsinkelsesdelen innfører en tidsforsinkelse for lys som forplanter seg gjennom forsinkelsesdelen fra en første ende av forsinkelsesdelen til en and-
15 re ende av forsinkelsesdelen og innfører også tidsforsinkelsen for lys som forplanter seg gjennom forsinkelsesdelen fra den andre ende av forsinkelsesdelen til forsinkelsesdelens første ende. En første akustisk sensor er koblet mellom den andre ende av forsinkelsesdelen og den andre port for kobleren. Det første akustiske sensor forplanter et første
20 lyssignal fra forsinkelsesdelens andre ende til den andre koblerport og forplanter et andre lyssignal fra den andre koblerport til den andre ende av forsinkelsesdelen. Den første akustiske sensor reagerer på et innkommende akustisk signal ved å modulere de første og andre lyssignaler. Det andre lyssignaler forsinkes i forsinkelsesdelen slik at det andre lyssignal ankommer ved den første port for kobleren stort sett samtidig med at det andre
25 lyssignal ankommer ved koblerens andre port. Det første lyssignal og det andre lyssignal interfererer ved kobleren og danner et første interferometerutgangssignal. En detektor er koblet for å motta det første interferometerutgangssignal. Et andre Sagnac-interferometer omfatter lyskilden, kobleren, den optiske bane, forsinkelsesdelen, detektoren og en andre akustisk sensor. Den andre akustiske sensor er koblet mellom den
30 andre ende av forsinkelsesdelen og den andre port for kobleren. Den andre akustiske sensor er forskjøvet fra den andre enden av forsinkelsesdelen og fra den andre port til kobleren for at den andre akustiske sensor skal koble et tredje lyssignal fra den andre ende av forsinkelsesdelen til den andre port for kobleren etter at det første lyssignal er koblet til den andre port for kobleren og for at den akustiske sensor skal koble et fjerde
35 lyssignal fra koblerens andre port til forsinkelsesdelens andre ende etter at det andre lyssignal er koblet til den andre ende av forsinkelsesdelen. Det fjerde lyssignal blir forsinket i forsinkelsesdelen for å ankomme ved koblerens første port omtrent samtidig

med at det tredje lyssignal ankommer ved den andre port for kobleren. Det tredje og fjerde lyssignal interfererer i kobleren for å frembringe et andre interferometrisk utgangssignal som blir påvist av detektoren etter at detektoren har påvist det første interferometriske lyssignal.

5

Et annet trekk ved foreliggende oppfinnelse er en påvisningsanordning som omfatter en kilde til lyspulser og en optisk kobler som mottar lyspulsene og kobler lyspulsene til en første koblerport og en andre koblerport. Et optisk fibersløyfe omfatter en første ende som er koblet for å motta lys fra den første koblerport og en andre ende som er koblet
 10 for å motta lys fra den andre koblerport. Lyset fra den første koblerport forplanter seg i en første retning i sløyfen til den andre koblerport. Lyset fra den andre koblerport forplanter seg i en andre retning i sløyfen til den første koblerport. En sensoroppstilling omfatter et flertall sensorer. Hver sensor mottar sin del av det lys som forplanter seg i den første retning i sløyfen og en egen del av det lys som forplanter seg i den andre retning i sløyfen. Hver av sensorene har en egen forskjellig optisk banelengde, slik at de
 15 mottatte deler av lys forplanter seg gjennom en første av sensorene før de respektive deler av lyset forplanter seg gjennom en andre av sensorene. Sensoroppstillingen er plassert optisk nærmere den første ende av sløyfen enn den andre ende av sløyfen, for å få lys som forplanter seg i den første retning til å bli forsinket i sløyfen og deretter forplante seg gjennom sensoroppstillingen og for å få lys som forplanter seg i den andre
 20 retning til å forplante seg gjennom sensoroppstillingen og deretter bli forsinket i sløyfen. På denne måte vil lyspulser som forplanter seg gjennom en gitt sensor i motsatte retninger gjøre dette på forskjellige tidspunkter. Fordi det optiske signal som skal påvises forandres under tidsforsinkelsen som innføres av sløyfen, vil de to optiske signaler få forskjellige faseforskyvninger frembrakt av det akustiske signal. Når de optiske sig-
 25 naler blir kombinert ved sløyfekobleren vil forskjellige faseforskyvninger frembringe en amplitudemodulasjon som blir påvist av detektoren.

Et annet trekk ved foreliggende oppfinnelse er en fremgangsmåte til måling av en parameter. I henhold til denne fremgangsmåte, forplanter lys seg fra en lyskilde gjennom en
 30 sløyfe, slik at de respektive deler av lyset forplanter seg motsatt i første og andre retninger i sløyfen. Lyset som forplanter seg i sløyfen passerer gjennom minst første og andre sensorer som reagerer på den parameter som skal måles for å modulere det lys som slipper gjennom. De første og andre sensorer har forskjellige optiske banelengder
 35 slik at lys som passerer gjennom den andre sensor blir forsinket i forhold til lys som passerer gjennom den første sensor. Lys som forplanter seg i sløyfen i den første retning blir forsinket før det passerer gjennom de første og andre sensorer. Lys som forplanter

seg i sløyfen i den andre retning blir forsinket etter å ha passert gjennom de første og andre sensorer. Lys som forplanter seg i de første og andre retninger interfererer med hverandre i en kobler for å frembringe et første utgangssignal som reagerer på lys som passerer gjennom den første sensor i de første og andre retninger og til å frembringe et
 5 andre utgangssignal som reagerer på lys som passerer gjennom den andre sensor i de første og andre retninger. Det andre utgangssignal blir forsinket i forhold til det første utgangssignal.

Et annet trekk ved foreliggende oppfinnelse er en måleanordning som omfatter en kob-
 10 ler der denne mottar lys fra en optisk kilde og kobler første og andre deler av lyset til første og andre koblerporter. En optisk sløyfe er koblet mellom de første og andre koblerporter for å forplante lys fra den første koblerport til den andre koblerport gjennom sløyfen i en første retning og for å forplante lys fra den andre koblerport til den første koblerport i en andre retning. Lys som forplantes i de første og andre retninger blir
 15 kombinert i kobleren. En sensoroppstilling omfatter minst første og andre sensorer som måler en parameter. De første og andre sensorer har hhv. første og andre optiske baner. Den første optiske bane gjennom den første sensor er optisk kortere enn den andre optiske bane gjennom den andre sensor. En optisk forsinkelsesdel er anbrakt i sløyfen mellom sensoroppstillingen og den første koblerport for å få lys som forplantes fra den første
 20 koblerport i den første retning til å bli forsinket av den optiske forsinkelsesdel før det når frem til sensoroppstillingen og for å få lys som forplantes fra den andre koblerport i den andre retning til å bli forsinket med den optiske forsinkelsesdel etter å ha passert gjennom sensoroppstillingen.

25 Et annet trekk ved foreliggende oppfinnelse er en fiberoptisk akustisk sensoroppstilling basert på et Sagnac-interferometer i stedet for å være basert på Mach-Zehnder-interferometeret slik det er kjent i akustiske sensoroppstillinger. Den fiberoptiske akustiske sensoroppstilling benyttes til å påvise akustiske bølger i vann. Ved å basere sensoroppstillingen på Sagnac-interferometeret i stedet for å et Mach-Zehnder-
 30 interferometer, får sensoroppstillingen et stabilt forspenningspunkt, har redusert fasestøy og gjør det mulig å benytte en bredbånds signalkilde i stedet for å kreve en mer kostbar smallinjet laser. Et stort antall akustiske sensorer kan bli multiplekset i arkitekturen for Sagnac-interferometeret.

35 Foreliggende oppfinnelse vil nå bli beskrevet i det følgende under henvisning til tegningens figurer, der:

Figur 1 som eksempel viser et Sagnac-interferometer med en enkel målesløyfe;

Figur 2 viser en Sagnac-sensoroppstilling ifølge foreliggende oppfinnelse der hvert trinn med en sensoroppstilling danner et ytterligere Sagnac-interferometer;

5

Figur 3 viser en Sagnac-sensoroppstilling som omfatter erbiumdopede fiberforsterkere for regenerering av signaleffekt som går tapt ved koblingstap og ledningstap;

Figur 4 er en graf over frekvensfølsomheten for et Sagnac-interferometer i henhold til foreliggende oppfinnelse sammenlignet med de tre typer støy som er dominerende på havbunnen;

10

Figur 5 er grafer som viser maksimum og minimum akustiske signaler som kan påvises med et Mach-Zehnder-interferometer og påvises med et Sagnac-interferometer i henhold til foreliggende oppfinnelse, der det forholdsvis konstante dynamiske området for et Sagnac-interferometer over et bredt område av frekvenser er vist;

15

Figur 6 er grafer for minimum påviselig akustisk signal i forhold til frekvensen for tre Sagnac-interferometerutforminger som har forskjellige fiberlengder i hydrofonen og forsinkelsessløyfen;

20

Figur 7 viser et Sagnac-interferometer i henhold til foreliggende oppfinnelse, der det omfatter en ytterligere forsinkelsessløyfe for å utvide interferometerets dynamiske område;

Figur 8 er en graf over det dynamiske området som frembringes av interferometeret på figur 7;

25

Figur 9a viser plasseringen av forsinkelsessløyfen for interferometeret i den tørre ende av et system for sensoroppstilling;

30

Figur 9b viser plasseringen av forsinkelsessløyfen for interferometeret i den våte ende av systemet for en sensoroppstilling;

Figur 10 viser Sagnac-interferometeret på figur 9b med angivelser som viser de lengder som benyttes ved beregninger av fasemodulasjonens virkninger;

35

Figur 11 viser teknikken for vikling av forsinkelsessløyfen for å redusere den virkning den akustiske bølge har på forsinkelsessløyfen;

Figur 12 viser et Sagnac-interferometer i henhold til foreliggende oppfinnelse der denne
5 omfatter tomme trinn som påviser fordelt støyopptak som kan subtraheres fra de signaler som sensorene frembringer;

Figur 13 viser et Sagnac-interferometer i henhold til foreliggende oppfinnelse der dette
10 omfatter en depolarisator for å redusere virkningene av polarisering innbefattende fading;

Figur 14 viser et Sagnac-interferometer som benytter frekvensdelt multipleksing;

Figur 15 er en graf som viser frembringelsen av svevesignaler mellom det forsinkede
15 modulasjonssignal og de returnerende sensorsignaler i interferometeret på figur 14; og

Figur 16 viser et Sagnac-interferometer som benytter kodedelt multipleksing.
Den foreliggende oppfinnelse blir nedenfor beskrevet i forbindelse med en oppstilling
av akustiske sensorer (f.eks. hydrofoner) i en Sagnac-sløyfe. Før de foretrukne utførelser
20 beskrives, blir det gitt en kort oversikt over virkemåten for en Sagnac-akustisk sensor med enkel sløyfe.

Sagnac-akustisk sensor med enkel sløyfe

En enkel Sagnac-basert akustisk sensor 100 er vist på figur 1. Sagnac-sløyfen er delt i to
25 deler, en forsinkelsessløyfe 102 og en hydrofon 104. Forsinkelsessløyfen 102 er ganske enkelt en lang fiberlengde som regel mer enn 1 km. Hydrofonen 104 er en del av en fiber hvori en akustisk bølge omformes til fasemodulasjon av et optisk signal som forplanter seg gjennom fiberen. En høy følsomhet overfor akustiske følger blir som regel oppnådd ved å velge optimaliserte belegg for den seksjonen av fibere som befinner seg i
30 hydrofonen 104 og ved å vikle fibere rundt en dor med egnet sammensetning. (Se f.eks. J.A. Bucaro, m.fl., *Optical fibre sensor coatings*, *Optical Fiber Sensors, Proceedings of the NATO Advanced Study Institute*, 1986, s. 321-338). Lengden av den fiber som er viklet rundt hydrofonen 104 er som regel 10 m til 100 m. Lys fra en kilde 110 som f.eks. en superfluorescent fiberkilde (SFS), blir delt i stråler i urviserretningen (CW) og
35 mot urviserretningen (CCW) av en 3x3 kobler 112. Virkemåten for 3x3 kobleren 112 er velkjent og beskrevet f.eks. i Sang K. Sheem, *Fiber-optic gyroscope with [3x3] direc-*

tional couple, Applied Physics Letters, utgave 37, nr. 10, 15. november 1980, s. 869-871.

Selv om det her beskrives bruk av en 3x3 kobler 112, kan andre koblere (f.eks. en 2x2 kobler, en 4x4 kobler, etc.) benyttes med alternative utførelser av foreliggende oppfinnelse. For eksempel, for å benytte en 2x2 kobler, blir begge porter på en side benyttet for å danne Sagnac-interferometeret. En port på den andre side er en påvisningsport. Den gjenværende port benyttes til å sende lys inn i oppstillingen og kan også benyttes som en påvisningsport hvis en kobler eller sirkuleringsanordning benyttes (på en måte som svarer til det som gjøres i fiberoptiske gyroskoper). Rent generelt, kan enhver nxm kobler benyttes ved å anvende to porter på en side av kobleren for å danne Sagnac-interferometeret og ved å benytte portene på den andre side av kobleren som påvisningsport, utsendelsesport eller begge.

Etter deling, løper strålen i urviserretningen gjennom forsinkelsessløyfen 102 først og deretter gjennom hydrofonen 104, mens strålen mot urviserretningen beveger seg gjennom hydrofonen 104 først og deretter gjennom forsinkelsessløyfen 102. I løpet av en tidsforsinkelse T_{delay} mellom et tidspunkt da strålen i urviserretningen beveger seg gjennom hydrofonen 104 og et tidspunkt da strålen i moturviserretningen beveger seg gjennom hydrofonen 104, vil det akustisk signal og på samme måte den akustisk induerte fasemodulasjon i hydrofonen 104 forandre seg. Denne endring i fasemodulasjon blir gjengitt i en faseforskjell mellom strålene som beveger seg i motsatte retninger og blir omformet til en intensitetsmodulasjon når strålene igjen kombineres ved 3x3 kobleren 102. Denne intensitetsmodulasjonen blir så påvist av den første detektor 120 og den andre detektor 122 eller ved bare en av detektorene.

Mer bestemt, hvis et akustisk signal induserer en fasemodulasjon $\phi_h \cos(\Omega t)$ i fiberen for hydrofonen 104, blir den resulterende fasemodulasjon mellom de interfererende stråler ved hydrofonen 104, $\phi_{\text{int}}(t)$ gitt med:

30

$$\begin{aligned}\phi_{\text{int}}(t) &= \phi_h \cos(\Omega t) - \phi_h \cos(\Omega(t + T_{\text{delay}})) \\ &= 2\phi_h \sin\left(\frac{\Omega \cdot T_{\text{delay}}}{2}\right) \sin\left(\Omega t + \frac{\Omega \cdot T_{\text{delay}}}{2}\right)\end{aligned}\quad (1)$$

der T_{delay} er bevegelsestiden gjennom forsinkelsessløyfen. $\phi_{\text{int}}(t)$ er således en funksjon av hydrofonmodulasjonen ϕ_h og produktet av den akustiske modulasjonsfrekvens, Ω , med sløyfeforsinkelsen T_{delay} . Dette skiller seg fra en Mach-Zehnder-interferometrisk

35

sensor der $\phi_{int}(t)$ er en funksjon bare av hydrofonmodulasjonen ϕ_h . Maksimum følsomhet blir oppnådd i Sagnac-sløyfeakustisk sensor når produktet av den akustiske frekvens, Ω , og tidsforsinkelsen T_{delay} er et ulikt multiplum av π (maksimumsverdi for det første sinusledd i ligning 1). Den akustiske frekvens som skaper dette produkt π er betegnet som den rette frekvens for sløyfen som er den laveste frekvens ved hvilken maksimal følsomhet blir oppnådd. De fleste former for undervannsmåling dreier seg om påvisning av akustiske frekvenser under 10 kHz. For at den rette sløyfefrekvens skal være mindre enn 10 kHz er det derfor nødvendig med en forsinkelsestid på minst 50 mikrosekunder og derfor med en lengde på forsinkelsessløyfen på minst 100 km. Dermed krever den akustiske Sagnac-sensor 100 en stor mengde fiber for påvisning av lave akustiske frekvenser (< 100 kHz).

Utførelse med felles bane som ligger i Sagnac-interferometeret har mange fordeler over Mach-Zehnder-interferometeret i tillegg til det stabile forspenningspunkt og eliminering av fasestøy som allerede er nevnt. Et Sagnac-interferometer muliggjør bruk av en kort koherenslengde, bredbåndskilde, som f.eks. superfluorescent fiberkilde (SFS), som er et eksempel på en forsterket spontan emisjonskilde (ASE). Slike kilder er billige og kan lett utføres med høy ytelse. Det er blitt vist at bruken av 3x3 kobleren passivt forspenner den akustiske Sagnac-sensor nær kvadratur. (Se f.eks. Sang K. Sheem, *Fiber-optic gyroscope with [3x3] directional coupler*, Applied Physics Letters, utgave 37, nr. 10, 15. november 1980, s. 868-871; og H. Poisel, m.fl., *Low-cost fibre-optic gyroscope*, Electronics Letters, utgave 26, nr. 1, 4. januar 1990, s. 69-70). Ved å subtrahere signalene fra de to påvisningsporter for 3x3 kobleren kan overskytende kildestøy som er den begrensende støykilde for SFS-kilder, kan subtraheres mens fasemodulasjoninduserte intensitetsvariasjoner på grunn av hydrofonen tilføyes. Dette lar et Sagnac-interferometer nærme seg støtstøybegrenset ytelse. (Se Kjell Kråkenes, m.fl., *Sagnac interferometer for underwater sound detection: noise properties*, OPTICS LETTERS, utgave 14, nr. 20, 15. oktober 1989, s. 1152-1145).

Tidligere arbeid med Sagnac-baserte akustiske sensorer har vært begrenset til en utførelse med enkel sensor. På grunn av de iboende fordeler ved Sagnac-interferometeret har søkerene fastslått at det er ønskelig å erstatte Mach-Zehnder-interferometriske sensorer i storskalaoppstillinger med Sagnac-baserte sensorer. Hver Sagnac-sensor 100 som er omhandlet ovenfor krever mange kilometre med fiber, noe som gjør anvendelse av flere slike sensorer upraktisk i storskalaoppstillinger. Forskning vedrørende bruk av resirkulerende forsinkelsessløyfer for å redusere kravet til fiberlengde har resultert i sensorer som benytter langt mindre fiber, men som lider av høy støy på grunn av innfø-

ringen av EDFA'er i den resirkulerende sløyfe. (Se f.eks. J.T. Kringlebotn, m.fl., *Sagnac Interferometer Including A Recirculating Ring With An Erbium-doped Fibre Amplifier*, OFS '92 Conference Proceedings, s. 6-9). En ny løsning for å redusere fiberbehovet er beskrevet nedenfor.

5

Ny sensoroppstilling basert på Sagnac-interferometeret

Som omhandlet nedenfor har søkerene kommet frem til et nytt system som reduserer den fibermengde som er nødvendig for en Sagnac-basert storskalaoppstilling ved multi-
 10 pleksing av et flertall sensorer på samme forsinkelsessløyfe, noe som resulterer i en praktisk Sagnac-sensoroppstilling (SSA). Som vist på figur 2, omfatter en Sagnac-sensoroppstilling 200 ifølge oppfinnelsen en oppstilling 210 av hydrofoner 212(i) i et stigemønster som er tilknyttet en enkel forsinkelsessløyfe 214. For eksempel viser figur 2 en Sagnac-sensoroppstilling 210 som har N-hydrofoner 212(1), 212(2)...212(N) i
 15 respektive trinn 216(1), 216(2)...216(N). Hvert trinn 216(i) i Sagnac-sensoroppstillingen 210 omfatter et enkelt fiber som er viklet rundt en tilhørende hydrofon 212(i). Hver bane fra en 3x3 kobler 220 gjennom forsinkelsessløyfen 214 og oppstillingen 210 tilbake til kobleren 220 omfatter et separat Sagnac-interferometer. For en oppstilling på N sensorer 212 finnes det derfor N separate Sagnac-interferometere der hver av disse
 20 opptrer som en enkeltsløyfe Sagnac-sensor 100 som vist på figur 1. Hvert Sagnac-interferometer måler det akustiske signal ved et eget separat punkt i rommet, dvs. på stedet der hydrofonen 212(i) befinner seg. For eksempel måler Sagnac-interferometeret som omfatter forsinkelsessløyfen 214 og trinn 216(1) det akustiske signal ved hydrofonen 212(1). I tillegg, tar også hvert Sagnac-interferometer opp akustiske signaler (f.eks.
 25 støy) andre steder i sløyfen og denne støy blir på en fordelaktig måte redusert slik det vil bli forklart nedenfor.

Sagnac-sensoroppstillingen 200 er lettest å forstå i en tidsdelt multiplekset (TDM) utførelse (utførelser som ikke er TDM blir senere omhandlet). En kilde 222 (som med fordel
 30 kan være en vanlig pulset kilde eller kan være en kilde til energi i urviserretningen med en ekstern modulator) frembringer en lyspuls som kommer inn i Sagnac-sløyfen via en tredje port i kobleren 220 og forplantes både i urviserretningen og mot urviserretningen som angitt på figur 2. Når den når oppstillingen 210, blir pulsen mot urviserretningen delt i et tog med N separate pulser. Ved dette punkt har inngangspulsen i urviserretningen
 35 ennå ikke nådd oppstillingen 210 og er fremdeles en enkel puls. Når pulsen i urviserretningen når oppstillingen 210, blir også den delt i et tog på N pulser. Hver puls i toget i urviserretningen returnerer til 3x3 kobleren 220 etter å ha beveget seg gjennom et til-

hørende trinn 216(i) og interfererer med pulsen i toget mot urviserretningen som har gjennomløpt det samme trinn 216(i) i motsatt retning. På denne måte blir N pulser påvist av en første detektor 230 og en andre detektor 232 og hver puls omfatter pulsene i urviserretningen og mot urviserretningen i en av de N Sagnac-sløyfer (dvs. de to pulser
 5 som har beveget seg i motsatte retninger gjennom det samme tilhørende trinn 216(i)). Fordi pulsene som har beveget seg gjennom forskjellige kombinasjoner av trinn ikke gjennomløper identiske optiske baner, faller slike pulser ikke sammen i tid ved kobleren 220 og interfererer derfor ikke med hverandre ved kobleren 220. Pulsbreddene bør være mindre enn forsinkelsesforskjellen mellom sammenstående sensorer, slik at pulsene fra
 10 sammenstående sensorer ikke overlapper hverandre.

Som vist på figur 3, er lavtytende erbiumdoped fiberforsterkere (EDFA'er) 240 på en fordelaktig måte tilføyet oppstillingsdelen 210 på samme måte som EDFA'er er blitt tilføyet Mach-Zehnder-interferometriske sensoroppstillinger. (Se f.eks. Craig W. Hodgson, m.fl., *Optimization of Large-Scale Fiber Sensor Arrays Incorporating Multiple Optical Amplifiers-Part I: Signal-to-Noise Ratio*, JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, utgave 16, nr. 2, februar 1998, s. 224-231; Jefferson L. Wagener, m.fl., *Novel Fiber Sensor Arrays Using Erbium-Doped Fiber Amplifiers*, JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, utgave 15, nr. 9, september 1997, s. 1681-1688;
 15 og C.W. Hodgson, m.fl., *Large-scale interferometric fiber sensor arrays with multiple optical amplifiers*, OPTIC LETTERS, utgave 22, nr. 21, 21. november 1997, s. 1651-1653). EDFA'ene 240 øker antallet av sensorer som kan drives med en enkel oppstilling 210 ved regenerering av den signaleffekt som går tapt på grunn av koblingstap og bortledning av energi. EDFA'ene blir med fordel pumpet av en eller flere pumpelaserkilder
 20 242 via en delende kobler 244 og via en første bølgelengdedelende multipleksende (WDM) kobler 246 og en andre WDM kobler 248.

Fordi den bruker Sagnac-arkitektur, har Sagnac-sensoroppstillingen 200 alle fordelene ved den enkelt sløyfe Sagnac-baserte sensor 100 som er omhandlet ovenfor. Utførelsen
 30 med felles bane eliminerer omformning av kildefasestøy til intensitetsstøy ved den interfererende kobler 220. Kilden 222 kan være en fiber ASE (forsterket spontant emitterende) kilde (dvs. den SFS som er omhandlet ovenfor) som gir høye effekter billig ved 1,55 μm . Passiv forspenning nær kvadratur kan oppnås for alle sensorer ved bruk av 3x3 kobleren 220. Dessuten utgjør 3x3 kobleren 220 et hensiktsmessig hjelpemiddel til
 35 påvisning av to interferometriske utganger ved detektoren 230, 232 og til å bruke utgangene fra de to detektorer for å subtrahere overskytende kildestøy. (Se f.eks. K. Kråkenes, m.fl., *Sagnac interferometer for underwater sound detection: noise properties*,

OPTICS LETTERS, utgave 14, 1989, s. 1152-1154, som viser bruken av to detektorer i kombinasjon med et enkelt Sagnac-interferometer).

Egenskapene ved denne nye Sagnac-sensoroppstillingen 200 vil bli omhandlet mer inngående nedenfor, fulgt av en mer detaljert gjennomgåelse av frekvensfølsomheten og det dynamiske området som er resultatet fra bruken av et Sagnac-interferometer. Deretter vil det bli beskrevet en beregning av verdien på det distribuerte opptak fra ikke-hydrofonfibersløyfeselementer sammen med teknikken for å redusere størrelsen på dette opptak. Polarisering vil også bli omhandlet nedenfor. Nye støykilder som blir innført med Sagnac-utførelsen blir så omhandlet. Sluttelig, gjengis det andre multipleksopplegg enn TDM for Sagnac-sensoroppstillingen.

Selv om foreliggende oppfinnelse ovenfor er beskrevet med en enkel sensor i hvert trinn 216(i) i oppstillingen 210, skulle det være klart at hvert trinn 216(i) med fordel kan omfatte en deloppstilling som har flere sensorer som f.eks. beskrevet i U.S. patent nr. 5,866,898 tilhørende Hodgson, m.fl., som ble utstedt 2. februar 1999. (Se også C.W. Hodgson, m.fl., *Large-scale interferometric fiber sensor arrays with multiple optical amplifiers*, Optics Letters, utgave 22, 1997, s. 1651-1653; J.L. Wagener, m.fl., *Novel fiber sensor arrays using erbium-doped fiber amplifiers*, Journal of Lightwave Technology, utgave 15, 1997, s. 1681-1688; C.W. Hodgson, m.fl., *Optimization of large-scale fiber sensor arrays incorporating multiple optical amplifiers, Part I: signal-to-noise ratio*, Journal of Lightwave Technology, utgave 16, 1998, s. 218-223; og C.W. Hodgson, m.fl., *Optimization of large-scale fiber sensor arrays incorporating multiple optical amplifiers, Part II: pump power*, Journal of Lightwave Technology, utgave 16, 1998, s. 224-231).

Frekvensfølsomhet

Som omhandlet ovenfor, har Sagnac-sensoren en frekvensavhengig følsomhet som er gitt med ligning 1. Ved frekvenser godt under den rette frekvens for sløyfen, definert som $1/(2 \cdot T_{\text{delay}})$ som er det minste påviselige akustiske signal skalert med det inverse av den akustiske frekvens. Denne reduserte akustiske følsomhet ved lave frekvenser har vært et hovedproblem for den akustiske Sagnac-sensor. Det er imidlertid blitt påpekt at denne nedsatte følsomhet ved lave frekvenser heldigvis blir oppveiet ved økende støy ved sjøbunnen. (Se f.eks. Sverre Knudsen, *Ambient and Optical Noise in Fiber-Optic Interferometric Acoustic Sensors*, Fiber-Optic Sensors Based on the Michelson and Sagnac-Interferometers: Responsitivity and Noise Properties, Thesis, kapittel 3, Norsk

Teknisk Naturvitenskapelig Universitet, 1996, s. 37-40). Ideelt sett vil det være ønskelig om minimum for det påviselige akustiske signal i en oppstilling ved en gitt frekvens vil ha en konstant verdi under sjøens laveste støy. Frekvensfølsomheten for Sagnac-sensoroppstillingen 200 ifølge oppfinnelsen gir i virkeligheten en god tilpasning mellom sjøens laveste støy og akustisk følsomhet. Dette er vist på figur 4, der det minste påviselige akustiske signal for en Sagnac-sensoroppstilling er tegnet som en kurve 250 under forutsetning av en laveste optisk støyverdi på $10 \mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$, en hydrofon fasefølsomhet på $3,2 \times 10^{-7} \text{ rad}/\mu\text{Pa}$ og en forsinkelsessløylengde på 20 km. (Den vertikale akse er i dB i forhold til en grunnlinje på $1 \mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$). På figur 4 er det også opptegnet bunnverdier for sjøstøy for tre dominerende sjøstøykilder ved disse frekvenser og en resulterende sum av støyen fra de tre kilder. En kurve 252 representerer støyen fra turbulens i sjøen, jordskjelv, vulkanutbrudd og lignende. En kurve 253 representerer lett støy fra skip. En kurve 254 representerer DSSO (fjern skip og storm) støy. En kurve 256 representerer summen av støyverdier fra de tre dominerende kilder (dvs. summen av kurvene 252, 253 og 254). (Se f.eks. Robert J. Urick, *The noise background of the sea: ambient noise level*, Principles of Underwater Sound, 3. utgave, kapittel 7, McGraw-Hill, 1983, s. 202-236). Det minste påviselige akustiske signal for Sagnac-sensoroppstillingen 200 øker på en slik måte at det oppstår en nesten konstant verdi for påviselige signaler under sjøens laveste signaler ved alle frekvenser under 10 kHz. På denne måte vil den frekvensavhengige følsomhet for Sagnac-sensoroppstillingen 200 ikke hindre akustisk påvisning av lave frekvenser. Mach-Zehnder-oppstillingen viser samme forhold som Sagnac-sensoroppstillingen, nemlig en reduksjon i følsomheten overfor lavere frekvenser, men i Mach-Zehnder-oppstillingen er den avtagende følsomhet mindre enn i den Sagnac-baserte sensor.

Selv om både Mach-Zehnder-interferometeret og Sagnac-sensoroppstillingen 200 har like frekvensavhengige følsomheter, er kilden til deres frekvensfølsomheter fundamentalt forskjellige. Det økende minimum påviselige signal i Mach-Zehnder-interferometerets sensoroppstilling skyldes en økende optisk bunnstøy. Årsaken til denne økende optiske bunnstøy er den fasestøy som innføres ved baneubalansen i Mach-Zehnder-interferometeret. Selv om bunnstøyen således er $10 \mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ ved 10 kHz, øker den mot de lave frekvenser. I Sagnac-sensoroppstillingen 200, skyldes det økende minimum påviselige akustiske signal $\sin(\Omega T_{\text{delay}}/2)$ leddet i ligning 1, og ikke en økende optisk bunnstøy. Den optiske bunnstøy holdes konstant på $10 \mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ over hele frekvensområdet.

Betydningen av denne forskjellen sees ved gjennomgåelse av det dynamiske området for Mach-Zehnder-interferometrisk sensoroppstilling og Sagnac-sensoroppstillingen 200 som er vist på figur 5. Det dynamiske området for sensoren er begrenset av minimum og maksimum påvisbare faseforskyvninger. For interferometriske sensorer, er den maksimale påvisbare faseforskyvning begrenset av den ikke-lineære reaksjon i interferometeret og den minimale påvisbare faseforskyvning av den optiske bunnstøy. Både Mach-Zehnder-interferometriske sensoroppstilling og Sagnac-sensoroppstillingen har maksimale påvisbare faseforskyvninger som er konstante over det akustiske frekvensområdet. Imidlertid har Sagnac-sensoroppstillingen 200 også en flat minimum påvisbare faseforskyvning fordi den har en flat optisk bunnstøy mens Mach-Zehnder-interferometrisk sensoroppstilling lider av en økende minimum påvisbar faseforskyvning på grunn av en økende optisk bunnstøy som skyldes fasestøyen som innføres av det ubalanserte interferometer. Sagnac-sensoroppstillingen 200 har således et konstant dynamisk område ved alle akustiske frekvenser, mens Mach-Zehnder-interferometriske sensoroppstilling har et avtagende dynamisk område ved lave akustiske frekvenser. Dette er vist på figur 5, der minimum og maksimum påvisbare akustiske signaler (i dB vilkårlige enheter) er opptegnet for Sagnac-sensoroppstillingen 200 og en Mach-Zehnder-interferometrisk sensoroppstilling. Som vist på figur 5, har begge oppstillinger et tilnærmet 100 dB dynamisk område over 1 kHz, der fasestøy ikke begrenser Mach-Zehnder-interferometriske sensoroppstillingen. Ved 10 Hz, dominerer fasestøyen Mach-Zehnder-interferometriske sensoroppstillingen og dens dynamiske område blir redusert til omtrent 74 dB. Samtidig, forblir det dynamiske området for Sagnac-sensoroppstillingen 200 på tilnærmet 100 dB.

Det er interessant å gjennomgå frekvensfølsomheten for Sagnac-sensoroppstillingen 200 ved frekvenser godt under den rette sløyfefrekvens som en funksjon av forsinkelsessløyfens lengde og hydrofonens følsomhet. Ved disse frekvenser, kan $\sin(\Omega T_{\text{delay}}/2)$ faktoren i ligning 1 tilnærmes som $\Omega T_{\text{delay}}/2$, noe som viser at følsomheten for Sagnac-sensoroppstillingen 200 er proporsjonal med produktet mellom ϕ_h og T_{delay} . ϕ_h er i seg selv proporsjonal med mengden av fiber i hver hydrofon 212(i) og T_{delay} er proporsjonal med mengden av fiber i forsinkelsessløyfen 214. Følsomheten ved frekvenser godt under sløyfens rette frekvens er således proporsjonal med produktet av hydrofonens fiberlengde og lengden av forsinkelsesfiberen. Figur 6 tegner opp det minimale påviselige akustiske signal for flere Sagnac-sensoroppstillinger, der produktet av lengden på fiberen i hver hydrofon 212(i) og lengden på fiberen i forsinkelsessløyfen 214 er konstant, men der den relative fordeling av fiberen mellom forsinkelsessløyfen 214 og hver hydrofon 212(i) forandrer seg. For eksempel, representerer en kurve 260 frekvensfølsom-

heten for en Sagnac-sensoroppstilling 200 med 45 km fiber i sin forsinkelsessløyfe 214 og 100 m av fiber i hver hydrofon 212(i); en kurve 262 representerer frekvensfølsomheten for en Sagnac-sensoroppstilling 200 med 30 km fiber i forsinkelsessløyfen 214 og 150 m fiber i hver hydrofon 212(i); og en kurve 264 representerer frekvensfølsomheten for en Sagnac-sensoroppstilling 200 som har 15 km fiber i sin forsinkelsessløyfe 214 og 300 m fiber i hver hydrofon 212(i). Som vist, har hver Sagnac-sensoroppstilling 200 den samme følsomhet ved lave frekvenser, men nærmer seg en maksimal følsomhet ved forskjellige frekvenser som blir gitt av deres respektive rette sløyfefrekvenser. For et gitt minimum påviselig akustisk signal ved lave frekvenser, finnes det fremdeles en viss frihet til valg av fiberlengder for forsinkelsessløyfen 214 og hydrofonene 212(i). Denne frihet kan benyttes for å bidra til at Sagnac-sensoroppstillingen 200 tilfredsstiller andre kriterier så som minimalisering av den samlede mengde fibere som er nødvendig eller minimalisering av forsinkelsessløyfens lengde.

15 Økning av det dynamiske området for Sagnac-sensoroppstillingen

Som omhandlet ovenfor, har Sagnac-sensoroppstillingen 200 et større dynamisk område ved lave akustiske frekvenser enn Mach-Zehnder-interferometriske sensoroppstillinger fordi den er immun mot fasestøy. Ideelt sett får en oppstilling 200 tilstrekkelig dynamisk område til å påvise de sterkeste og svakeste akustiske signaler som det er sannsynlig å støte på. Dette krav går ofte over i et nødvendig dynamisk område på tilnærmet 150 dB. For å oppnå et dynamisk område av denne størrelse i en Mach-Zehnder-interferometrisk sensoroppstilling er det nødvendig med to adskilte sensorer med forskjellig fasefølsomhet der hver påviser en brøkdel av det samlede 150 dB dynamiske område. Den klare ulempe ved dette er at det kreves to sensoroppstillinger (dvs. dobbelt så mange hydrofoner, trinn, kilder og detektorer). Egentlig kan en oppstilling som driver N hydrofoner påviser det akustiske signal ved bare $N/2$ punkter.

I Sagnac-sensoroppstillingen 200 er det mulig å oppnå et større dynamisk område uten å benytte ytterligere hydrofoner 212. Fordi fasefølsomheten i Sagnac-sensoroppstillingen er en funksjon av hydrofonfølsomheten og forsinkelsessløyfens lengde som vist i ligning 1, kan fasefølsomheten for hele oppstillingen av hydrofoner endres ved å modifisere forsinkelsessløyfens lengde. Ved samtidig bruk av to adskilte forsinkelsessløyfer 214(1) og 214(2) med lengde hhv. L_1 og L_2 , som vist i en modifisert sensoroppstilling 266 på figur 7, kan påvisningsområdet for oppstillingen 266 økes dramatisk. Oppstillingen 266 har nå $2N$ adskilte Sagnac-sløyfer. Hver hydrofon 212(i) returnerer et eget signal for hver av de to forsinkelsessløyfebaner og lengden på hver forsinkelsessløyfe

214(1), 214(2) bestemmer det akustiske påvisningsområde for dette signal. Det totale akustiske påvisningsområdet for hver hydrofon 212(i) er samlingen av påvisningsområdene for hver av de to Sagnac-sløyfesensorer som omslutter hydrofonen 212(i). Lengdene på L_1 og L_2 bestemmer det akustiske påvisningsområdet. Lenden L_1+L_2 er valgt for å la oppstillingen 266 påvise det minste akustiske signal som er av interesse. Lengden L_1 av forsinkelsessløyfen 214(1) blir så valgt for å legge påvisningsområdet for signaler som beveger seg bare denne korte forsinkelsessløyfe på toppen av påvisningsområdet for signaler som beveger seg i begge forsinkelsessløyfer 214(1) og 214(2). I et TDM-system, som et resultat av innføringen av en andre sløyfe, blir repetisjonsfrekvensen for kildepulsene halvert for å skaffe tid for $2N$ pulser å returnere og lengdene på forsinkelsessløyfene 214(1), 214(2) er valgt slik at det ikke oppstår pulsoverlapping. Fordi repetisjonsfrekvensen er halvert, blir det dynamiske området for hvert enkelt signal redusert med 3 dB. Denne reduksjon blir mer enn opphevet av økningen av det samlede totale dynamiske området som oppnås ved overlaging av det dynamiske området for to separate signaler. På figur 7, er den andre forsinkelsessløyfe 214(2) plassert slik at alt lys som passerer gjennom den andre forsinkelsessløyfe 214(2) passerer gjennom det første forsinkelsessløyfe 214(1). Det skal påpekes at som alternativ, kan de to forsinkelsessløyfer 214(1), 214(2) være i optisk parallell slik at det lys som passerer gjennom den andre forsinkelsessløyfe 214(2) ikke passerer gjennom den første forsinkelsessløyfe 214(1). I dette tilfellet, må fiberlengden for den andre forsinkelsessløyfe 214(2) være summen av den første lengde og den andre lengde (dvs. L_1+L_2). Men, siden L_1 er betydelig kortere enn L_2 , er denne justering ikke av viktighet. Utførelsen på figur 7 reduserer det samlede fiberkrav ved å tilføye lengden på den første forsinkelsessløyfe til den andre forsinkelsessløyfe.

25

Figur 8 viser det utvidede dynamiske området som er muliggjort ved bruk av de to forsinkelsessløyfer 214(1), 214(2) i oppstillingen 266, der det dynamiske området for hvert signal er 100 dB og forholdet L_1/L_2 ble satt til å være 5000. Som vist, er oppstillingen 266 nå i stand til å påvise over hele det dynamiske området av interesse (tilnærmet et 160 dB område) uten å øke hydrofontallet.

30

Fordelt måling

I Sagnac-sensoroppstillingen 266 kan enhver fasemodulasjon i interferometeret innføres i en intensitetsmodulasjon ved den interfererende 3x3 kobler 220. Denne fordelte måling over hele Sagnac-sløyfen er en ulempe for en akustisk sensoroppstilling. For å være praktisk, bør den akustiske sensoroppstilling utvalgsbehandle det akustiske signal ved et

35

antall diskrete punkter i rommet (dvs. ved hydrofonene) og returnere disse signaler uavhengig av hverandre. Mach-Zehnder-interferometriske sensoroppstillinger oppnår dette fordi interferometeret er omsluttet i et lite rom og dermed bare måler ved dette punkt. For at Sagnac-sensoroppstillingen 266 skal være praktisk, må den fordelte måling med
 5 Sagnac-sløyfen reduseres.

Hoveddelen av fiberen i interferometeret danner forsinkelsessløyfen 214 som kan stilles i to stillinger. Den første er ved kilden 222 og påvisningselektronikken (detektoren 230 og detektoren 232) i den tørre ende (dvs. ute av vannet), som vist på figur 9a. Her kan
 10 forsinkelsessløyfen 214 skjermes mot omgivelsene for å redusere eventuell ekstern modulasjon. Nedføringsfiberene 270, 272 som forbinder den våte ende med oppstillingsdelen 210, er imidlertid en del av interferometeret. Den andre mulighet er å anbringe forsinkelsessløyfen 214 i den våte ende (dvs. i vannet) med oppstillingen 210 som vist på figur 9b. Som sådan kan forsinkelsessløyfen 214 ikke være isolert i den samme utstrekning som den kunne hvis den var anbragt ved den tørre ende, men nedføringsfiberene
 15 270, 272, 274 ligger utenfor interferometeret og er dermed ufølsomme. Den relative verdi på opptaket som er fordelt i nedføringsledningen og forsinkelsessløyfen bestemmer hvilken utformning som er best egnet for en bestemt anvendelse. Det skal påpekes at hvis forsinkelsessløyfen 214 er plassert i den tørre ende (figur 9a), må nedføringsfibre-
 20 rene 270, 272 forbli stasjonære for å hindre fysisk bevegelse som f.eks. bøyning og vibrasjoner av disse fibre, noe som kan indusere overordentlig store fasemodulasjoner. Disse er fasemodulasjoner som er induert av fiberbevegelse i motsetning til fasemodulasjoner som er akustisk induert. (Slike fysiske bevegelser er problemer i oppstillinger som slepes, men behøver ikke være fremtredende problemer i stasjonære oppstillinger).
 25 Hvis således forsinkelsessløyfen 214 er plassert i den tørre ende (figur 9a), må hele den våte ende av Sagnac-sensoroppstillingen 210 være stasjonær. Med forsinkelsessløyfen 214 plassert i den våte ende (figur 9b), behøver imidlertid bare den del som ligger til høyre for 3x3 kobleren 220 på figur 9b forbli stasjonær, siden nedføringsfiberene 270, 272, 274 da ikke er en del av interferometeret. Med forsinkelsessløyfen 214 plassert i
 30 den våte ende (figur 9b), må forsinkelsessløyfens fiber være gjort ufølsom. Forsinkelsessløyfen 214 kan gjøres stasjonær ved å vikle forsinkelsessløyfefiberene rundt en sylinder som er gjort ufølsom (ikke vist), for dermed å eliminere fiberbevegelse og gjøre akustisk opptak til den dominerende kilde for fordelte opptakssignaler. Fordi det er enklere å gjøre fiber utfølsomt overfor akustisk induert fasemodulasjon, enn det er å gjøre
 35 fiber ufølsomt overfor bevegelsesindusert fasemodulasjon, er utformingen som plasserer forsinkelsessløyfen 214 i den våte ende (figur 9b) å foretrekke for anvendelser der oppstillingen slepes, slik det vil bli beskrevet mer i detalj i det følgende.

Beregning av akustisk opptaksstøy, induisert i forsinkelsessløyfen

I dette avsnitt utledes det overslag for verdien av den akustisk induserte fordelte opptaksstøy sammenlignet med den akustisk induserte hydrofonfasemodulasjon i Sagnac-sensoroppstillingen 210 på figur 9b. Intensitetsmodulasjonen som skyldes de fordelte fasemodulasjoner som er resultatet av opptak av akustiske signaler i forsinkelsessløyfen og bussfiberen (den fiber som kobler hver hydrofon til forsinkelsessløyfen og 3x3 kobleren) kan betraktes som en støykilde. For den følgende beskrivelse kan man betrakte en sløyfe i Sagnac-sensoroppstillingen som om den omfatter bare forsinkelsesfiber av lengde L_d , et bussfiber av lengde L_b , et hydrofonfiber av lengde L_h , og en samlet lengde L som vist på figur 10. Det antas også at L_d er meget større enn L_b og L_h . Fasefølsomheten for fiber overfor akustiske signaler er resultatet av en trykkavhengig forplantningskonstant β . I alminnelighet den trykkavhengige komponent av forplantningskonstanten ved en stilling l og tid t skrives som:

$$\beta(l, t) = \beta_0 R(l) P(l, t) \quad (2)$$

der β_0 er nulltrykkforplantningskonstant, $R(l)$ er den normale fasefølsomhet for fiberen, og $P(l, t)$ er trykket som en funksjon av rom og tid. Hvis det antas et sinusoidalt akustisk signal for frekvens Ω kan ligning 2 omskrives som:

$$\beta(l, t) = \beta_0 R(l) [P_0 + P_m \sin(\Omega t + \theta(t))] \quad (3)$$

der P_0 er det stabile trykk, P_m er amplituden for trykkmodulasjonen (antas å være uavhengig av l) og $\theta(l)$ inneholder den romlige fasevariasjon av den akustiske bølge. I alminnelighet skyldes den induserte faseforskjell mellom interfererende stråler i en Sagnac-sløyfe akustisk induisert fasemodulasjon fra $l=l_1$ til $l=l_2$ som er gitt med integralet:

$$\phi_{\text{int}}(t) = \int_{l_1}^{l_2} \left[\beta\left(l, t + \frac{(l-L)}{\nu}\right) - \beta\left(l, t - \frac{l}{\nu}\right) \right] dl \quad (4)$$

der ν er lysets hastighet i fiberen, og L er sløyfens lengde. Substituering av ligning 3 i ligning 4 gir:

$$\phi_{\text{int}}(t) = \beta_0 P_m \int_{l_1}^{l_2} R(l) \left[\sin\left(\Omega\left(t + \frac{(l-L)}{\nu}\right) + \theta(l)\right) - \sin\left(\Omega\left(t - \frac{l}{\nu}\right) + \theta(l)\right) \right] dl \quad (5)$$

Ligning 5 kan benyttes til å bestemme faseforskjellen mellom interfererende stråler på grunn av akustisk modulasjon av hydrofon-, buss- og forsinkelsesfibere.

- 5 For hydrofonfiberen, blir ligning 5 integrert fra $l_1=l_d+l_b/2$ til $l_2=l_d+l_b/2+l_h$. Det antas at $\theta(l)$ er konstant over dette området (dvs. at den akustiske bølgelengde er meget større enn dimensjonen på hydrofonen. Det antas også at den normaliserte fasefølsomhet for fiberen $R(l)$, er konstant og lik R_h i dette området. Ligning 5 gir så en faseforskjellamplitude mellom interfererende stråler på grunn av hydrofonfibermodulasjon:

10

$$\phi_{\text{int}}^h = 2\beta_0 R_h P_m L_h \sin\left(\frac{\Omega \cdot T_{\text{delay}}}{2}\right), \quad (6)$$

der det er forutsatt at $\Omega L_h/2 \ll 1$. Det skal fremheves at antagelsene om at $\theta(l)$ er konstant og amplituden for $\Omega L_h/2 \ll 1$ fører til økning av ϕ_{int}^b , noe som skaper det verste scena-

- 15 rio for bussfiberen.

Det skal påpekes at ligning 2 er i overensstemmelse med det uttrykk som er gitt i ligning 1.

- 20 For bussfiberen integreres ligning 5 først fra $l_1=0$ til $l_2=l_d$, og deretter fra $l_1=L \cdot l_b/2$ til å innbefatte både de øvre og nedre busslinjer. Det antas igjen at $R(l)$ er konstant og lik R_b for alle bussfibere, slik at $\theta(l)$ er konstant i integralet av ligning 5. Faseforskjellsamplituden mellom interfererende stråler på grunn av fibermodulasjon blir:

25
$$\phi_{\text{int}}^b = 2\beta_0 R_b P_m L_h \sin\left(\frac{\Omega \cdot T_{\text{delay}}}{2}\right), \quad (7)$$

der det antas at $\Omega L_h/2 \ll 1$. Det skal påpekes at antagelsene av konstant $\theta(l)$ og amplituden på $\Omega L_h/2 \ll 1$ fører til økning av ϕ_{int}^h , og således gir det verste scenario for bussfiberen.

30

- For forsinkelsesfiberen integreres ligning 5 fra $l_1=0$ til $l_2=l_d$, og som tidligere antas det at $\theta(l)$ er konstant over dette området (dvs. at forsinkelsessløyfens vikling er mye mindre enn den akustiske bølgelengde) og $R(l)$ er konstant og lik R_d over integralet. Ligning 5 gir da en faseforskjellsamplitude mellom interfererende stråler på grunn av forsinkelsesfibermodulasjon som er gitt med:
- 35

$$\phi_{\text{int}}^d = 2\beta_0 R_d P_m (L - L_d) \sin\left(\frac{\Omega T_{\text{delay}}}{2}\right) = 2\beta_0 R_d (L_b + L_h) \sin\left(\frac{\Omega T_{\text{delay}}}{2}\right), \quad (8)$$

der det er antatt at $\Omega(L_b + L_h)/2 \ll 1$.

5

Med ligningene 6-8, kan den relative størrelse på disse fasemodulasjonsamplituder beregnes. Først skal det påpekes at en standard plastbelagt fiber har en normalisert fasefølsomhet, R , på -328 dB for $1/\mu\text{Pa}$, som beskrevet f.eks. hos J.A. Bucaro, m.fl., *Optical fibre sensor coatings*, Optical Fiber Sensors, Proceedings of the NATO Advanced Study Institute, 1986, s. 321-338. På den annen side, som beskrevet f.eks. hos C.C. Wang, m.fl., *Very high responsivity fiber optic hydrophones for commercial applications*, Proceedings of the SPIE-The International Society for Optical Engineering, utgave 2360, 1994, s. 360-363, har en fiber som er lagt rundt aktuelle hydrofoner laget av luftbakkete kjerner en normalisert fasefølsomhet på -298 dB for $1/\mu\text{Pa}$, en økning på 30 dB over standard fiber. Hvis vi antar at forsinkelsessløyfen og bussfiberen har den normalisert fasefølsomhet som standard plastbelagt fiber, og at hydrofonfiberen er viklet rundt en luftbakkete kerne, er forholdet R_h til R_b eller R_d tilnærmet 30 dB. Under den forenklende antagelse som gjøres for å komme frem til ligningene 6-8, kan derfor finnes at:

$$\frac{\phi_{\text{int}}^h}{\phi_{\text{int}}^d} \approx \left(\frac{31}{1 + (L_b / L_h)} \right) \quad (9)$$

og

$$\frac{\phi_{\text{int}}^h}{\phi_{\text{int}}^b} \approx \left(\frac{31}{(L_b / L_h)} \right). \quad (10)$$

25

Forholdet L_b/L_h er en funksjon av hydrofonens posisjon. For den første hydrofon $L_b/L_h \approx 0$, noe som gjør $\phi_{\text{int}}^h/\phi_{\text{int}}^d = 31$ og $\phi_{\text{int}}^h/\phi_{\text{int}}^b$ overordentlig stort. For den siste hydrofon, blir det benyttet typiske verdier på 100 m og 1 km for L_h resp. L_b for å komme frem til $\phi_{\text{int}}^h/\phi_{\text{int}}^d \approx \phi_{\text{int}}^h/\phi_{\text{int}}^b \approx 3$. På tross av det faktum at hydrofonfiberen utgjør en forholdsvis liten del av den samlede Sagnac-sløyfe, blir således verdien for de akustisk innførte fasemodulasjoner i hydrofonfiberen større enn de akustisk induserte fasemodulasjoner i forsinkelsessløyfefiberen og i bussfiberen når det gjelder den fjerneste hydrofon. Det følgende avsnitt beskriver et middel for behandling av nivået på fordelt opptakstøy ved bruk av tomme trinn.

30

- For å vurdere integralet i ligning 5 når det gjelder forsinkelsessløyfefiberen, antas det at $R(l) = R_d$ for alle l som er mindre enn L_d . Det var dette konstante forhold for $R(l)$ som eliminerte et hvert bidrag til integralet i ligning 5 fra $l = (L \cdot L_d)$ til L_d (fordi integranden ble en odde funksjon rundt $L/2$). Imidlertid, vil vikling av en lang lengde fiber resultere i en viss avhengighet for $R(l)$ når det gjelder l (muligens fordi det indre lag av fiberen har en annen R enn det ytre lag). Disse variasjoner i $R(l)$ øker forsinkelsessløyfens opptak fra $l = L \cdot L_d$ til L_d . For å redusere dette opptak, skal det først påpekes at $R(l)$ bare behøver være en like funksjon rundt $L/2$ for å gjøre integranden i ligning 5 til en odde funksjon rundt $L/2$. $R(l)$ kan tvinges til å være mer symmetrisk om $L/2$ ved å vikle forsinkelsessløyfen på en slik måte at symmetripunktene for fibersløyfen blir plassert ved siden av hverandre som vist på figur 11. En slik vikling sikrer at symmetripunktene for forsinkelsessløyfen blir plassert i nærheten av hverandre, slik at en hver variasjon i $R(l)$ på grunn av plasseringen av fiberen på viklingen er så symmetrisk om $L/2$ som mulig, og derved bringer forsinkelsessløyfens opptak så nær til uttrykket i ligning 8 som mulig. Det skal påpekes at fordi hver Sagnac-sløyfe i Sagnac-sensoroppstillingen har et eget forskjellig $L/2$ -punkt, kan bare en sløyfe vikles nøyaktig som vist på figur 11 og dermed innføre en liten grad av odde tilstand i $R(l)$ til alle unntatt en av Sagnac-sløyfene.
- Det skal også nevnes at i tillegg til å forbedre den akustiske følsomhet for fibre i en hydrofon, er det mulig å redusere fiberfølsomheten ved å påføre et metallbelegg med en bestemt diameter (se f.eks. J.A. Bucaro, *Optical fibre sensor coatings*, som er angitt ovenfor). Målte normaliserte fasefølsomheter så lave som .366 dB for $1/\mu\text{Pa}$ er blitt rapportert. Hvis slike fibre benyttes i forsinkelses- eller busslinjer, vil forholdet R_h til R_b eller forholdet R_h til R_d nærme seg 68 dB (i stedet for 30 dB med plastbelagt forsinkelses- og bussfibre), noe som øker hydrofonens induerte signal over det forsinkelses- og bussinduserte signal med 38 dB.

Redusering av fordelt opptaksstøy ved bruk av tomme trinn

- For ytterligere å eliminere fordelt opptakssignal, kan den hydrofoninduserte akustiske modulasjon isoleres fra den fordelte opptaksmodulasjon ved å plassere tomme trinn 300 som ikke inneholder noen hydrofon i oppstillingen 200 som vist på figur 12. Hver trinn 216(i) som inneholder en hydrofon 212(i), og som kalles et måletrinn har foran seg et av de tomme trinn 300(i). Det faktum at det ikke-følsomme fiber i hver sløye som omslutter et tomt trinn 300(i) er neste identisk med det ikke-følsomme fiber i sløyfen som omslutter det tilsvarende målende trinn 211(i), betyr at det tomme trinn 300(i) og det tilsva-

- rende måletrinn 212(i) vil ha neste samme fordelte opptakssignal. Ved å behandle dette tomme trinn 300(i) som en annen sensor i oppstillingen 210 og ved riktig tidsstyring av tidspulsene (i TDM-opplegget) fra de tomme trinn 300(i) og det målende trinn 212(i), slik at de ikke overlapper, kan det fordelte opptakssignal som finnes på hvert måletrinn
- 5 212(i) måles. Etter påvisning kan dette signal subtraheres fra måletrinnets signal og bare etterlate seg intensitetsvariasjoner som frembringes med fasemodulasjoner i hydrofonfibre. Utførelse av et opplegg av denne type, krever $2N$ trinn for en N sensoroppstilling 210 og reduserer dermed tjenestesyklusen for individuelle signaler med en halvdel.
- 10 Hvis reduksjon av følsomheten i bussdelen av oppstillingen 210 ikke er nødvendig, kan et enkelt tomt trinn 300 anbringes i oppstillingen 210 for å måle det fordelte opptakssignal som er knyttet til forsinkelsessløyfen 214, slik at det bare blir behov for $N + 1$ trinn (N målende trinn 212(i) og et tomt trinn 300) for N sensorer. Hvis et tomt trinn 300 ikke måler det fordelte opptakssignal tilstrekkelig for hvert målende trinn 212(i),
- 15 kan flere tomme trinn 300 tilføyes med periodiske mellomrom langs oppstillingen inntil det fordelte opptakssignal som finnes på hvert målende trinn 212(i), kan måles tilstrekkelig med det nærmeste av disse tomme trinn 300. Bruk av færre tomme trinn resulterer i en høyere tjenestesyklus for individuelle signaler. Figur 12 viser den ekstreme tilstand, der et tomt trinn ble tilføyet for hvert målende trinn.

20

Polarisasjon

- For maksimal kontrast i en hvilken som helst interferometrisk sensor mål tilstanden av polarisasjonen (SOP) for de interfererende stråler være identiske når de kombineres på
- 25 nytt. Hvis de er ortogonale dannes det ingen interferens og dermed intet amplitudemodulert signal. Dette er betegnet som polarisasjonsindusert signalfading. Fordi hver sensor i Sagnac-sensoroppstillingen er en Sagnac-sløyfe, gjelder den forskning som er utført hittil på polarisasjonsindusert signalfading i Sagnac-gyroskopet også for Sagnac-sensoroppstillinger. En lovende løsning er å anbringe en depolarisator i Sagnac-sløyfen.
- 30 (Se f.eks. K. Böhm, m.fl., LOW-DRIFT FIBRE GYRO USING A SUPERLUMINESCENT DIODE, ELECTRONIC LETTERS, utgave 17, nr. 10, 14. mai 1981, s. 352-353). Depolarisatoren sikrer at minst halvparten av den optiske effekt returnerer til 3×3 kobleren med riktig polarisasjonstilstand til en hver tid. Denne generelle løsning frembringer en konstant siktbarhet uansett sløyfens dobbeltbrytning. (Se f.eks.
- 35 William K. Burnes, m.fl., *Fiber-Optic Gyroscopes with Depolarized Light*, JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, utgave 10, nr. 7, juli 1992, s. 992-999). Den enkleste konfigurasjon benytter en upolarisert kilde som f.eks. en fibersuperfluorescenskil-

de og en depolarisator i sløyfen. Som vist på figur 13, er en i Sagnac-sensoroppstillingen 200 en depolarisator 310 anbragt ved et punkt som er felles for alle Sagnac-sløyfene. Depolarisatoren 310 sikrer at hver sensor 212(i) har denne konstante siktbarhet uavhengig av dobbeltbrytning, så lenge sløyfens dobbeltbrytning forblir

5 konstant. Dette representerer en stor forenkling i håndteringen av polarisasjonsindusert signalfading sammenligning med de metoder som benyttes i Mach-Zehnder-interferometriske sensoroppstillinger.

Selv om langsomme forandringer i dobbeltbrytningen vil bli tilstrekkelig utlignet med

10 den resiproke natur for Sagnac-interferometeret, vil dobbeltbrytningsmodulasjoner ved frekvenser i det akustiske området som er av betydning frembringe polarisasjonsstøy. Den største dobbeltbrytningsmodulasjon ved disse frekvenser finner sted som et resultat av fysisk fiberbevegelse. Sagnac-sløyfen bør derfor forbli stasjonær for å redusere polarisasjonsstøyen (så vel som det fordelte opptakssignal).

15

Støykilder som innføres ved bruk av Sagnac-interferometeret

Termisk fasestøy

Fordi brytningsindekset for fiberen forandrer seg med temperaturen, vil termiske sving-

20 ninger i en fiber frembringe fasesvingninger i det lys som forplanter seg gjennom fiberen. Disse indeksvariasjoner er ukorrelerte over fiberens lengde og dermed er målestokken for de resulterende fasesvingninger kvadratroten av lengden. Fordi Mach-Zehnder-interferometerene som regel benytter mindre enn 100 m fiber i hver arm, er størrelsen på denne termiske fasestøy ubetydelig. Sagnac-interferometeret har en god

25 del mer fiber i interferometeret og som et resultat kan termisk fasestøy bli en begrensende støykilde. Størrelsen på denne termiske fasestøy i et Sagnac-interferometer er beskrevet teoretisk og bekreftet ved eksperimenter. (Se f.eks. Sverre Knudsen, m.fl., *Measurements of Fundamental Thermal Induced Phase Fluctuations in the Fiber of a Sagnac Interferometer*, IEEE Photonics Technology Letters, utgave 7, nr. 1, 1995, s. 90-

30 93; og Kjell Kråkenes, m.fl., *Comparison of Fiber-Optic Sagnac and Mach-Zehnder Interferometers with Respect to Thermal Processes in Fiber*, JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, utgave 13, nr. 4, april 1995, s. 682-686). For sløyfer som større enn 2 km, kan den termiske fasestøy overskride $1 \mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ i det frekvensområdet som er av interesse og som er av størrelsesordenen for den oppstillingsfølsomhet som er nødvendig.

Den termiske fasestøy kan betraktes som en kilde til fordelt opptaksstøy, svarende til en ekstern modulasjon i forsinkelsessløyfen, og kan som sådan reduseres ved bruk av tomme trinn som beskrevet ovenfor. Den termiske fasestøy kan også reduseres ved å forkorte sløyfens lengde. Som omhandlet ovenfor, kan sløyfens lengde forkortes uten at dette endrer den lavfrekvente følsomhet ved å øke hydrofonfiberens lengde med samme faktor som forsinkelsessløyfen ble redusert med. For eksempel, en 40 km forsinkelsessløyfe med 50 m hydrofonfiber har samme lavfrekvensfølsomhet som en 20 km forsinkelsessløyfe med 100 m fiber. Den sistnevnte kombinasjon vil imidlertid bli utsatt for mindre termisk fasestøy, fordi den samlede lengde på forsinkelsessløyfen er kortere med en faktor som er neste to.

Kerr-effekt induisert fasestøy

Kerr-induserte faseforskyvninger som kan frembringes i et Sagnac-interferometer har vakt en god del oppmerksomhet for det fiberoptiske gyroskop. (Se f.eks. R.A. Bergh, m.fl., *Source statistics and the Kerr effect in fiber-optic gyroscopes*, OPTICS LETTERS, utgave 7, nr. 11, november 1982, s. 563-565; R.A. Bergh, m.fl., *Compensation of the optical Kerr effect in fiber-optic gyroscopes*, OPTICS LETTERS, utgave 7, nr. 6, juni 1982, s. 282-284; og N.J. Frigo, m.fl., *Optical Kerr effect in fiber gyroscopes: effects of nonmonochromatic sources*, OPTICS LETTERS, utgave 8, nr. 2, februar 1983, s. 119-121). Kravene for gyroskopet og for den akustiske sensor er imidlertid forskjellige fordi gyroskopet måler likestrømnivåer. Små likestrømforskyvninger som fremkommer ved Kerr-induserte faseforskyvninger som ville begrense et fibergyroskop er uten interesse for en akustisk sensor. Den Kerr-induserte likestrømfaseforskyvning er ikke et problem så lenge den ikke forflytter forspenningspunktet for langt vekk fra kvadratur. Intensitetsstøyen på lyskilden kan frembringe en Kerr-indusert fasestøy ved utgangen. Imidlertid er størrelsen på denne Kerr-induserte vekselstrøm fasestøy liten, så lenge den Kerr-induserte likestrømfaseforskyvning forblir liten. Opprinnelsen til Kerr-induserte faseforskyvninger i Sagnac-sensoroppstillingen er forskjellig fra forholdet i fibergyroskopet. Usymmetrien for Sagnac-sensoroppstillingen inviterer en slik Kerr-faseforskyvning langt lettere enn det nominelle symmetriske gyroskop gjør. Usymmetrien skyldes oppstillingsdelen så vel som en hver plassering av erbium-doped fiberforsterkere (EDFA'er) som usymmetriske ved at en stråle blir forsterket før forplantning gjennom forsinkelsessløyfen og deretter blir dempet, mens den stråle som forplanter seg i motsatt retning blir dempet og deretter forsterket. Det er mulig å balansere disse usymmetrier og utligne den Kerr-induserte faseforskyvning ved å velge den rette plasse-

ring for EDFA'ene i forsinkelsessløyfen. Dette avhenger av den nøyaktige konfigurasjon av oppstillingen og det opplegg som benyttes for multipleksing.

Ulineær fasemodulasjon som skyldes EDFA'ene

5

De populasjonsinversjoner som skapes i EDFA'ene innfører en faseforskyvning i det signal som passerer gjennom disse. (Se f.eks. M.J.F. Dignonnet, m.fl., *Resonantly Enhanced Nonlinearity in Doped Fibers for Low-Power All-Optical Switching: A Review*, OPTICAL FIBER TECHNOLOGY, utgave 3, nr. 1, januar 1997, s. 44-64). Dette fenomen er blitt benyttet til frembringelse av heloptiske interferometriske vendere. I en Sagnac-sensoroppstilling skaper EDFA'ene i interferometeret en ulineær faseforskyvning via samme mekanisme. Variasjoner i populasjonsinversjonen på grunn av pumping eller signaleffektsvingninger vil frembringe fasemodulasjoner som blir omdannet til en intensitetsstøy.

15

for å anslå størrelsen på denne støykilde, må det først foretas en bestemmelse av hvorledes den inverterte populasjon reagerer på pumpe- og signaleffektsvingninger. Dette er forholdsvis rett frem ved å benytte taktlikningene for et erbiumsystem:

$$20 \quad N_1 + N_2 = N_0 \quad (11)$$

$$\frac{d}{dt} N_2 = \frac{I_p \sigma_p^a}{h \nu_p A_{eff}} N_1 + \frac{I_s \sigma_s^a}{h \nu_s A_{eff}} N_1 - \frac{I_p \sigma_p^e}{h \nu_p A_{eff}} N_2 - \frac{I_s \sigma_s^e}{h \nu_s A_{eff}} N_2 - \frac{N_2}{\tau_2}, \quad (12)$$

der N_1 og N_2 er populasjonsdensiteter for hhv. de lavere og eksiterte tilstander, N_0 er den totale populasjonsdensitet, I er intensiteten, σ er tverrsnittet, A_{eff} er det effektive modusområdet i fiberen og τ_2 er levetiden for nivå to. Indeksene p og s angir hhv. pumpe og signal, og indeksene a og e angir hhv. absorpsjon og emisjon.

Ved å dele N_1 , N_2 , I_p og I_s i deres komponent for stabilt tilstand og komponent som varierer med tid og å substituere disse i ligning 12 og ved å kombinere ligning 12 med ligning 11, er resultatet:

30

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} N_2(t) = & \left[\frac{N_o \sigma_p^a + N_2^{ss} (\sigma_p^e + \sigma_p^a)}{h \nu_p} \right] I_p(t) + \left[\frac{N_o \sigma_s^a + N_2^{ss} (\sigma_s^e + \sigma_s^a)}{h \nu_s} \right] I_s(t) + \\
& \left[\frac{I_p^{ss} (\sigma_p^e + \sigma_p^a)}{h \nu_p} + \frac{I_s^{ss} (\sigma_s^e + \sigma_s^a)}{h \nu_s} + \frac{1}{\tau_2} \right] N_2(t) - \left[\frac{(\sigma_p^e + \sigma_p^a)}{h \nu_p} \right] I_p(t) N_2(t) - \\
& \left[\frac{(\sigma_s^e + \sigma_s^a)}{h \nu_s} \right] I_s(t) N_2(t),
\end{aligned} \tag{1}$$

der indekset ss angir verdier for stabil tilstand, mens de tidsvarierende komponenter nå er skrevet som eksplisitte funksjoner av tid ($N_2 = N_2^{ss} + N_2(t)$). Hvis det antas at $N_2(t)$ er
 5 meget mindre enn N_2^{ss} kan de siste to ledd i ligning 13 utelates. Ved å skrive
 $I_p(t) = I_p^m \sin(f_p t)$ og $I_s(t) = I_s^m \sin(f_s t)$ (der I_p^m og I_s^m angir hhv. modulasjonsamplituder for
 $I_p(t)$ og $I_s(t)$, og f_p og f_s , hhv. angir pumpe- og signalmodulasjonsfrekvenser) og ved
 løsning av de resulterende differensialligninger, kan det finnes at:

$$\frac{|N_2(f_p)|}{N_2^{ss}} \approx \left(\frac{\sigma_s^a (\sigma_p^e + \sigma_p^a) - \sigma_p^a (\sigma_s^e + \sigma_s^a)}{(\sigma_p^e + \sigma_p^a)} \cdot \frac{\nu_p}{\nu_s} \right) \left(\frac{1}{\sqrt{1 + f_p^2 / f_o^2}} \right) \cdot \frac{I_s^{ss} I_p^m}{I_p^{ss^2}} \tag{14}$$

$$\frac{|N_2(f_s)|}{N_2^{ss}} \approx \left(\frac{\sigma_s^a}{\sigma_p^a} - \frac{(\sigma_s^e + \sigma_s^a)}{(\sigma_p^e + \sigma_p^a)} \right) \cdot \frac{\nu_p}{\nu_s} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{1 + f_p^2 / f_o^2}} \right) \cdot \frac{I_s^m}{I_p^{ss}} \tag{15}$$

der:

15

$$f_o = \frac{\sigma_p^e + \sigma_p^a}{h \nu_p} I_p^{ss} + \frac{\sigma_s^e + \sigma_s^a}{h \nu_s} I_s^{ss} + \frac{1}{\tau_2} \approx \frac{\sigma_p^e + \sigma_p^a}{h \nu_p} I_p^{ss} \quad \text{når } I_p^{ss} \gg I_s^{ss}. \tag{16}$$

Hvis det antas at $\lambda_p = 1480$ nm, $\lambda_s = 1550$ nm, og $I_p^{ss} = 1$ W, og hvis det forutsettes typiske erbiumsilikattverrsnitt forenkles ligningene 14 og 15 til:

20

$$\frac{|N_2(f_p)|}{N_2^{ss}} \approx \left(\frac{0.9}{\sqrt{1 + f_p^2 / 4.3 \text{ kHz}}} \right) \cdot \frac{I_s^{ss} I_p^m}{I_p^{ss^2}} \tag{17}$$

$$\frac{|N_2(f_s)|}{N_2^{ss}} \approx \left(\frac{1.2}{\sqrt{1 + f_s^2 / 4.3 \text{ kHz}}} \right) \cdot \frac{I_s^m}{I_p^{ss}}. \tag{18}$$

Svingningene i den pumpeinduserte populasjonsinversjon (ligning 17) vil først bli analysert. Hvis $I_s^{ss}=1$ mW, $I_p^{ss}=1$ W, og det antas at $I_p^m/I_p^{ss}=10^{-6} \sqrt{\text{Hz}}$ (120 dB/ $\sqrt{\text{Hz}}$ elektronisk signal/støyforhold), vil $|N_2(f_p)|/N_2^{ss}=9 \times 10^{-10} \sqrt{\text{Hz}^{-1}}$ ved frekvenser godt under 4,3 kHz. For å omforme denne verdi til fasemodulasjon kan det faktum at 10 mW pumpeeffekt som absorberes i en erbiumdopet fiber induserer tilnærmet 7 radianer med faseforskyvning ved 1550 nm benyttes. (Se f.eks. M.J.F. Digonnet, m.fl., *Resonantly Enhanced Nonlinearity in Doped Fibers for Low-Power All-Optical Switching: A Review*, OPTICAL FIBER TECHNOLOGY, utgave 3, nr. 1, januar 1997, s. 44-64). Ved å anvende simuleringer, oppnås det 10 mW av absorbert pumpekraft i en typisk erbiumdopet fiber omtrent 6 dB av et lite signal ved 1550 nm, som er nært til forøkelsen av hver forsterker i en oppstilling med distribuerte EDFA'er. (Se f.eks. Craig W. Hodgson, m.fl., *Optimization of Large-Scale Fiber Sensor Arrays Incorporating Multiple Arrays Incorporating Multiple Optical Amplifiers-Part 1: Signal-to-noise Ratio*; Craig W. Hodgson, m.fl., *Optimization of Large-Scale Fiber Sensor Arrays Incorporating Multiple Optical Amplifiers-Part II: Pump Power*; Jefferson L. Wagener; m.fl., *Novel Fiber Sensor Arrays Using Erbium-doped Fiber Amplifiers*; og C.W. Hodgson, m.fl., *Large-scale interferometric fiber sensor arrays with multiple optical amplifiers*, som omtalt ovenfor). Derfor frembringer hver forsterker tilnærmet 7 radianer av likestrøms faseforskyvning. Siden den ulineære faseforskyvning er proporsjonal med populasjonen i den øvre tilstand, N_2 , kan det skrives at $\Delta N_2/N_2^{ss}=\Delta\phi/\phi^{ss}$. Bruk av dette forhold og ligning 17 på nytt for $I_s^{ss}=1$ mW, $I_p^{ss}=1$ W, $I_p^m/I_p^{ss}=10^{-6}/\sqrt{\text{Hz}}$ og $f_s \ll 4,3$ kHz, er lavfrekvens fasestøy som innføres med hver EDFA (7 radianer) $\times (9 \times 10^{-10}) \sqrt{\text{Hz}^{-1}} = 6,3 \times 10^{-9}$ rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$. Hvis det antas at det finnes et samlet antall på 500 slike forsterkere og at fasemodulasjonen fra alle 500 forsterkere summeres koherent, kan den samlede pumpestøyinduserte faseforskyvning antas å være $3,2 \mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$. Den bunnfasestøy som er målet, er som regel satt til $1 \mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$, noe som indikerer at den ulineære fasestøy som innføres med EDFA'ene på grunn av pumpeeffektssvingninger ligger nær opp til, men er ikke betydelig større enn den nødvendige fasebunnstøy. I praksis, vil forsterkernes fasemodulasjon ikke summeres koherent, noe som vil redusere verdien $3,2 \mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$.

Beregninger av den induserte faseforskyvning på grunn av signaleffektssvingninger er mer komplisert fordi signaleffekten ikke bare har intensitetsstøy, men også er modulert ved multipleksing. Igjen betraktes TDM-eksemplet, der det mens en gitt puls beveger seg gjennom en bestemt EDFA, kan finnes men ikke behøver finnes, en motsatt forplantende puls som beveger seg gjennom EDFA samtidig. Ved å betrakte det verste tilfellet der det alltid finnes en motsatt forplantende puls, I_s^m , har denne det dobbelte av intensitetsstøyen for hver enkelt puls. For forsterkerne er I_s^m som regel 1,5 til 2 ganger intensi-

tetsstøyen for hver enkelt puls. Ved å anta at signallyset har et elektronisk signal støyforhold på $120 \text{ dB}/\sqrt{\text{Hz}}$ ved akustiske frekvenser (dvs. $I_s^m/I_s^{ss}=10^{-6}/\sqrt{\text{Hz}}$), og ved å innsette denne verdi i ligning 18 sammen med $I_p^{ss}=1 \text{ W}$ og $I_s^m=2 \text{ mW}$, kan det beregnes at $|N_2(f_s)|/N_2^{ss}$ er tilnærmet $2,4 \times 10^{-9} \sqrt{\text{Hz}^{-1}}$ ved frekvenser som er meget lavere enn 4,3 kHz og at fasestøyen som induseres av signalintensitetsstøy i hver EDFA dermed er $1,68 \times 10^{-8} \text{ rad}/\sqrt{\text{Hz}}$. Det antas igjen 500 forsterkere og koherent summering av all EDFA-indusert fasemodulasjon, noe som vil gi den samlede EDFA-induserte fasestøy på hver puls til $8,4 \mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$, et nivå som igjen ville begrense ytelsen for Sagnac-sensoroppstillingen. Imidlertid, tar en mer detaljert gjennomgang hensyn til at multipleksopplegget og nøyaktig tidsstyring for oppstillingen er nødvendig for en mer nøyaktig beregning.

Multipleksopplegg i en Sagnac-oppstilling

15 Tidsdelt multipleksing

Det er hittil antatt at Sagnac-sensoroppstillingen arbeider i et TDM-mønster. Det skal påpekes at i Sagnac-sensoroppstillingen er kildebehovene for et TDM-system av denne art ikke så krevende som for en Mach-Zehnder-interferometrisk sensoroppstilling i en TDM-konfigurasjon. Årsaken til dette er bruken av bredbåndskilden i Sagnac-sensoroppstillingen. I Mach-Zehnder-interferometrisk sensoroppstilling er lyset fra sammenstående trinn koherent på grunn av den smale linjebreddekilde, og dermed kreves det meget høye sletteforhold for inngangspulsen for å hindre koherent flerbaneinterferens. Disse krav til høye sletteforhold, oppnås ved å anbringe flere modulatorer i serie, noe som resulterer i en komplisert og kostbar kilde med høyt tap. I Sagnac-sensoroppstillingen, behøver kravet til sletteforhold ikke være så høyt, fordi bredbåndskilden eliminerer enhver mulighet til koherent flerbaneinterferens. I tillegg hindrer de smale linjebredder som kreves ved Mach-Zehnder-interferometrisk sensoroppstilling bruk av en pulset laserkilde, i stedet for en laserkilde med kontinuerlig bølge som moduleres eksternt med litium niobat intensitetsmodulatorer. I Sagnac-sensoroppstillingen er enten en eksternt modulert kontinuerlig bølge ASE-kilde, en pulset ASE-kilde eller en kombinasjon av disse benyttet til å bygge opp kilden. Årsaken til dette er at Sagnac-sensoren igjen ikke krever noen kilde med smal linjebredde. Selv om foreliggende oppfinnelsen ikke krever en kilde med smal linjebredde, skal det påpekes at Sagnac-sensoren ifølge foreliggende oppfinnelsen kan benyttes med en kilde som har smal linjebredde som f.eks. en laser.

Frekvensdelt multipleksing

Bruken av bredbåndskilden gjør det også mulig å drive Sagnac-sensoroppstillingen i konfigurasjoner som ikke er TDM, uten å forandre utførelsen eller uten at det kreves ekstra kilder. Frekvensdelt multipleksing (FDM) er vanlig benyttet ved Mach-Zehnder-interferometriske sensoroppstillinger som benytter fasegenererte bærer (PGC) opplegg, men kan også anvendes sammen med Sagnac-sensoroppstillingen. Figur 14 viser prinsipielt en Sagnac-sensoroppstilling 400 som benytter et FDM-opplegg. En superfluorescent fiberkilde (SFS) 402 (eller annen bredbåndskilde, som f.eks. en LED) frembringer inngangsllys. En varierende intensitetsmodulasjon påtrykkes inngangslýset via en intensitetsmodulator 404 som styres av en variabel frekvensgenerator 406. Det modulerte lys kommer inn i en sensoroppstilling 410 via en 3x3 kobler 412. Lyset passerer gjennom en forsinkelsessløyfe 414 og flere måletrinn 416(i) som har tilhørende sensorer 418(i). Tomme trinn (ikke vist) kan også være tatt med om det ønskes. Etter å ha passert gjennom forsinkelsessløyfen 414 og trinnene 416(i), kommer lyset ut fra sensoroppstillingen 410 gjennom koblere 412 og blir påvist av en detektor 420 som frembringer et elektrisk utgangssignal som svar på det påviste lys. Det elektriske utgangssignal fra detektoren 420 blir blandet i en blander 422 med den samme varierende frekvens som er blitt tidsforsinke med en forsinkelse 424 som forsinker den varierende frekvens med en tid Δt . I den oppstilling som er vist på figur 14, blir utgangen fra blanderen 422 tilført en spektrumanalysator 426. I en arbeidende utførelse, blir utgangen fra blanderen 422 tilført et signalbehandlende delsystem (ikke vist) som analyserer utgangen fra blanderen 422 for å reprodusere det akustiske signal som treffer inn på oppstillingen 410.

Signalene som kommer tilbake fra sensorene 418(i) i de forskjellige trinn 416(i) blir ytterligere forsinket i forhold til den forsinkede varierende frekvens. Dette er illustrert med grafene på figur 15 med den opprinnelige varierende frekvens 450, den forsinkede varierende frekvens 452, fra forsinkelsen 424, det varierende retursignal 460 fra det første trinn, det varierende retursignal 262 fra det andre trinn og det varierende retursignal 464 fra det tredje trinn. I blanderen 422, blir de separate svevefrekvenser f_{b1} 470, f_{b2} 472, resp. f_{b3} 474, (vist på figur 14) dannet mellom blandingen av den varierende frekvens 452 og hvert av signalene som kommer tilbake fra de forskjellige trinn i Sagnac-sensoroppstillingen 410. (Se f.eks. S.F. Collins, m.fl., *A Multiplexing Scheme for Optical Fibre Interferometric Sensors Using an FMCW Generated Carrier*, OFS '92 Conference Proceedings, s. 209-211). Selv om bare tre varierende retursignaler 460, 462, 464 er vist på figur 15, er det tatt sikte på at opp til N retursignaler kan bli frembrakt, der N er antallet av trinn i oppstillingen 410. De varierende retursignaler fra det N'te trinn, skaper en svevefrekvens f_{bN} i blanderen 422.

Som vist med en billedmessig gjengivelse av en spektral utgang på figur 14, vil den akustiske modulasjon av signalene fremkomme som øvre sidebånd 480, 481, 482 og nedre sidebånd 484, 485, 486 for svevefrekvensene. En fordel ved dette FDM-opplegg
5 er at behovene for tidsstyring av oppstillingen i høy grad blir avslappet, sammenlignet med de som kreves i et TDM-system. Et TDM-system krever en bestemt forsinkelse mellom sammenstående trinn for å hindre pulser i å overlappe og dette kan skape et krevende teknisk problem. I FDM, forskyver variasjoner i fiberlengder svevefrekvensene, men de innfører ingen overlapping mellom signalene så lenge disse svevefrekvenser
10 er adskilt med det dobbelte av det akustiske påvisningsområde. Det sistnevnte fremkommer ved valg av den rette variasjonstakt. I motsetning til i et TDM-system, returnerer alle baner lys til alle tider, noe som kan resultere i en fasestøy mellom forskjellige ukohærente signaler. Bredbånds ASE lyskilde reduserer størrelsen på denne fasestøy. (Se f.eks. Moslehi, *Analysis of Optical Phase Noise in Fiber-Optic Systems Employing a Laser Source with Arbitrary Coherence Time*, Journal of Lightwave Technology, utgave LT-4, nr. 9. september 1986, s. 1334-1351).
15

Kodedelt multipleksing

Kodedelt multipleksing (CDM) har fått økende oppmerksomhet i den senere tid, til bruk i sensoroppstillinger. (Se f.eks. A.D. Kersey, m.fl., *Code-division Multiplexed Interferometric Array With Phase Noise Reduction And Low Crosstalk*, OFS '92 Conference Proceedings, s. 266-269; og H.S. Al-Raweshidy, m.fl., *Spread spectrum technique for passive multiplexing of interferometric optical fibre sensors*, SPIE, utgave 1314 Fibre Optics '90, s. 342-347). Som vist for en Sagnac-sensoroppstilling 600 på figur 16, i CDM, blir inngangslýset fra en fiberfluorescent kilde 602 (eller annen bredbåndskilde, som f.eks. en LED) modulert i en intensitetsmodulator 604 ifølge en pseudotilfeldig kode som frembringes av en kodegenerator 606. Det modulerte lys tilføres en interferometrisk sløyfe 608 via en 3x3 kobler 610 og forplanter seg gjennom en forsinkelses-sløyfe 614 og et flertall trinn 616(i) i en oppstilling 612. I den viste utførelse, omfatter hvert trinn 616(i) en tilhørende sensor 618(i). Tomme trinn (ikke vist) kan også være tatt med om det ønskes. Lyset kommer tilbake fra sløyfen via 3x3 kobleren 610 og blir påvist av en detektor 620. Den elektriske utgang fra detektoren 620 tilføres en korrelerer 622 sammen med utgangen fra kodegeneratoren 606, hvilken utgang er forsinket med en varighet τ_{cor} ved hjelp av en forsinker 624. Bitvarigheten for den pseudotilfeldige kode er kortere enn forplantningsforsinkelsen mellom sammenstående trinn i oppstillingen 612. Når τ_{cor} er lik en av sløyfebevegelsestidene τ_i , gjennom et respektivt trinn 616(i), blir det signal som kommer tilbake fra denne sensor i trinn 616(i) korrelert med den forsinkede pseudotilfeldige kode. De andre signaler som har forsinkelser τ_j der $|\tau_j - \tau_i| > \tau_{bit}$ korrelert til null. Korreleringsprosessen innebærer f.eks. multiplisering av det påviste signal med en eller -1 (eller portstyring av signalet i en elektronisk port 630 til de ikke-inverterende og inverterende innganger i en differensialforsterker 632) avhengig av om korreleringskoden er på eller av. Utgangen fra differensialforsterkeren på en linje 634 er den korrelerte utgang. Signalet blir så tidsutjevnet over en periode t_{avg} som er lik varigheten av koden. De ukorrelerte signaler tidsutjevnes til null for derved å isolere signalet fra 618(i). τ_{cor} blir avsøkt for sekvensielt å hente ut signalene fra alle sensorene.

En fordel ved CDM over TDM er at forsinkelsen mellom sensorene ikke behøver styres nøyaktig. Hvilke som helst sløyfeforsinkelser $|\tau_j - \tau_{j+1}| > \tau_{bit}$ kan godtas (der τ_{bit} er varigheten av en puls i koden). Korrelering krever en kjennskap til τ_j 'ene som er lette å måle. På samme måte som med FDM drar en bredbåndskilde fordeler av reduksjonen i fasestøy som er resultatene fra summeringen av alle signalene.

- I det foregående er det beskrevet en ny utforming for en akustisk sensoroppstilling basert på Sagnac-interferometeret. Hovedfordelene ved denne utførelse er bruken av interferometere med felles baner. Dette opphever omformningen av kildestøy til intensitetsstøy, noe som er fremtredende i Mach-Zehnder-interferometriske sensorer og muliggjør
- 5 bruk av en billig høyeffekts ASE-kilde eller annen bredbåndskilde. Reaksjonen fra Sagnac-sensoroppstillingen som en funksjon av akustisk frekvens har vist seg å svare til sjøens bunnstøy. Utførelsen gjør det også mulig å øke det dynamiske området dramatisk uten å tilføye hydrofoner, ved bruk av en ekstra meget kort forsinkelsessløyfe. En teknikk for å eliminere polarisasjonsindusert signalfading ble omhandlet ovenfor. Sagnac-
- 10 sensoroppstillingen muliggjør også bruk av flere multipleksopplegg i en enklere form enn det som kan oppnås med en standard Mach-Zehnder-oppstilling. På grunn av disse trekk byr Sagnac-sensoroppstillingen på et meget lovende alternativt til Mach-Zehnder-interferometerbaserte sensoroppstillinger.
- 15 Selv om det ovenfor er beskrevet særlige utførelser av foreliggende oppfinnelse, skulle det være klart at beskrivelsene av utførelsene bare er illustrasjoner på oppfinnelsen og ikke på noen måte begrensende.

P a t e n t k r a v

1.

Måleanordning som benytter et Sagnac-interferometer til måling av en parameter, hvil-

5 ken anordning er k a r a k t e r i s e r t v e d :

en kobler (220) som mottar lys fra en optisk kilde (222) og kobler første og andre deler av lyset til første og andre koblerporter;

en optisk sløyfe som er koblet mellom de første og andre koblerporter for å forplante lys fra den første koblerport til den andre koblerport gjennom sløyfen i en første retning og
10 for å forplante lys fra den andre koblerport til den første koblerport i en andre retning, hvilket lys som forplanter seg i de første og andre retninger blir kombinert i kobleren (220);

en sensoroppstilling (210) anbragt i den optiske sløyfe, hvilken sensoroppstilling omfatter minst første og andre sensorer (212(1), 212(2)) som måler parameteren, hvilket førs-
15 te og andre sensorer (212(1), 212(2)) har respektive første og andre optiske baner, hvilken første optiske bane gjennom den første sensor (212(1)) er optisk kortere enn den andre optiske bane gjennom den andre sensor (212(2)); og

en optisk forsinkelsesdel (214) i den nevnte sløyfe, hvilken forsinkelsesdel (214) er plassert i sløyfen mellom sensoroppstillingen (210) og den første koblerport for å bringe
20 lys som forplanter seg fra den første koblerport i den første retning til å bli forsinket av den optiske forsinkelsesdel (214) før det når frem til sensoroppstillingen (210) og for å bringe lys som forplanter seg fra den andre koblerport i den andre retning til å bli forsinket av den optiske forsinkelsesdel (214) etter å ha passert gjennom sensoroppstilling (210).

25

2.

Måleanordning som angitt i krav 1, k a r a k t e r i s e r t v e d

at den optiske forsinkelsesdel (214) er en første optisk forsinkelsesdel (214(1)), hvilken måleanordning videre omfatter en andre optisk forsinkelsesdel (214(2)), hvilken andre

30 optiske forsinkelsesdel (214(2)) er koblet til den første optiske forsinkelsesdel (214(1)) slik at bare en del av lyset forplanter seg gjennom den andre optiske forsinkelsesdel (214(2)), hvilken andre optiske forsinkelsesdel bringer hver av de første og andre sensorer til å forplante lys forsinket med bare den første optiske forsinkelsesdel (214(1)) og til også å forplante lys som er forsinket både med den første optiske forsinkelsesdel
35 (214(1)) og den andre optiske forsinkelsesdel (214(2)).

3.

Måleanordning som angitt i krav 1, k a r a k t e r i s e r t v e d
at den videre omfatter et flertall forsterkere som er innskutt nær ved de første og andre
sensorer (212(1), 212(2)) for å kompensere for tap som skyldes deling av lyset mellom
5 de første og andre sensorer (212(1), 212(2)).

4.

Måleanordning som angitt i krav 1, k a r a k t e r i s e r t v e d
at lyset fra den optiske kilden (222) er pulset og at lyset modulert av den første sensoren
10 (212(1)) er separert fra lyset modulert av den andre sensoren (212(2)) ved hjelp av tids-
deltmultipleksing.

5.

Måleanordning som angitt i krav 1, k a r a k t e r i s e r t v e d
15 at den videre omfatter:
en detektor (420) som mottar lysutgang fra den optiske sløyfe via kobleren (220) og
som frembringer et detektorutgangssignal;
en generator (406) som frembringer en varierende frekvens;
en intensitetsmodulator (404) som modulerer lyset fra den optiske kilde (222, 402) med
20 den varierende frekvens;
en elektronisk forsinket (424) som mottar den varierende frekvens og frembringer en
forsinket varierende frekvens; og
en blander (422) som blander detektorens utgangssignal og den forsinkede varierende
frekvens for å frembringe en respektiv svevefrekvens svarende til hver av de første og
25 andre sensorer (212(1), 212(2); 418(1), 418(2)), der hver svevefrekvens har respektive
sidebånd svarende til den respektive parameter som blir påvist av de respektive første
og andre sensorer (212(1), 212(2); 418(1), 418(2)).

6.

30 Måleanordning som angitt i krav 1, k a r a k t e r i s e r t v e d
at den videre omfatter:
en detektor (620) som mottar lysutgang fra den optiske sløyfe via kobleren (220, 610)
og som frembringer et detektorutgangssignal;
en kodegenerator (606) som frembringer en digital kode;
35 en intensitetsmodulator (604) som modulerer lyset fra lyskilden (222, 602) med den
digitale kode;

en elektronisk forsinker (624) som innfører en valgt forsinkelse i signalkoden for å frembringe en forsinket digital kode; og
 en korrelator (622) som korrelerer detektorens utgangssignal og den digitale kode for å frembringe et demultiplekset signal svarende til den parameter som er målt med en ut-
 5 valgt av de første og andre sensorer (212(1), 212(2); 618(1), 618(2)), der den utvalgte av de første og andre sensorer (212(1), 212(2); 618(1), 618(2)) er valgt inn med den valgte forsinkelse.

7.

10 Måleanordning som angitt i krav 1, k a r a k t e r i s e r t v e d at den videre omfatter en depolarisator (310) i den optiske sløyfe.

8.

Måleanordning som angitt i krav 1, k a r a k t e r i s e r t v e d
 15 at den videre omfatter en tredje optisk bane (300(1)) i oppstillingen, hvilken tredje bane (300(1)) forplanter lys, hvilken tredje optiske bane (300(1)) har en annen optisk lengde enn den første optiske bane og den andre optiske bane og den tredje optiske bane (300(1)) er følsomme overfor fordelt opptaksstøy som er vanlig for idet minste den førs-
 te optiske bane, hvilken tredje optiske bane (300(1)) frembringer et signal som er svar
 20 på den fordelte opptaksstøy som blir trukket fra det signal som frembringes av den førs-
 te optiske bane for å fjerne virkningen av den fordelte opptaksstøy fra det signal som frembringes med den første optiske bane.

9.

25 Måleanordning som angitt i krav 1, k a r a k t e r i s e r t v e d at den videre omfatter tredje og fjerde optiske baner (300(1), 300(2)) i oppstillingen, hvilke tredje og fjerde optiske baner (300(1), 300(2)) forplanter lys der den tredje optis-
 ke bane (300(1)) har en annen optiske lengde enn den første optiske bane og den andre optiske bane, hvilken fjerde optiske bane (300(2)) har en annen optisk lengde enn den
 30 første, andre og tredje optiske bane, hvilken tredje optiske bane (300(1)) er følsomme for fordelt opptaksstøy som er vanlig for den første optiske bane, hvilken tredje optiske bane (300(1)) frembringer et signal som svar på den fordelte opptaksstøy som blir truk-
 ket fra et signal som frembringes av den første optiske bane, for å fjerne virkningen av fordelt opptaksstøy fra det signal som frembringes av den første optiske bane, hvilken
 35 fjerde optiske bane (300(2)) er følsom overfor fordelt opptaksstøy som er vanlig for den andre optiske bane, hvilken fjerde optiske bane (300(2)) frembringer et signal som svar på den fordelte opptaksstøy som blir trukket fra et signal som frembringes av den andre

optiske bane for å fjerne virkningen av fordelt opptaksstøy fra signalet som frembringes av den andre optiske bane.

10.

5 Måleanordning som angitt i krav 1, k a r a k t e r i s e r t v e d at den videre omfatter første og andre detektor (230, 232) som er koblet for å motta lys fra kobleren (220) etter at lyset har forplantet seg i sløyfen, hvilke detektorer (230, 232) frembringer hhv. første og andre detektorutgangssignaler som blir behandlet for å subtrahere overskytende kildestøy.

10

11.

Måleanordning som angitt i krav 1, k a r a k t e r i s e r t v e d at kobleren (220) er en 3x3 kobler.

15 12.

Måleanordning som angitt i krav 1, k a r a k t e r i s e r t v e d at den optiske kilde (222) er en bredbåndskilde.

13.

20 Måleanordning som angitt i krav 12, k a r a k t e r i s e r t v e d at bredbåndskilden er en superfluorescent fiberkilde.

14.

25 Måleanordning som angitt i krav 1, k a r a k t e r i s e r t v e d at lys som er modulert med den første sensor (212(1)) blir adskilt fra lys som blir modulert med den andre sensor (212(2)) ved tidsdelt multipleksing.

15.

30 Måleanordning som angitt i krav 1, k a r a k t e r i s e r t v e d at :

den optiske kilde (222), kobleren (220), den første optiske bane, den første sensor (212(1)), den optiske forsinkelsesdel (214) og detektoren (230, 232) danner et første Sagnac-interferometer; og

35 at den optiske kilde (222), kobleren (220), den andre optiske bane, den andre sensor (212(2)), den optiske forsinkelsesdel og detektoren (230, 232) danner et andre Sagnac-interferometer.

16.

Måleanordning som angitt i krav 15, k a r a k t e r i s e r t v e d at den optiske forsinkelsesdel (214) er en første optisk forsinkelsesdel (214(1)), at måleanordningen videre omfatter en andre optiske forsinkelsesdel (214(2)), hvilken andre
 5 optiske forsinkelsesdel (214(2)) er koblet til den første optiske forsinkelsesdel (214(1)), slik at bare en del av lyset forplanter seg gjennom den andre optiske forsinkelsesdel (214(2)), hvilken andre optiske forsinkelsesdel (214(2)) får hver av de første og andre sensorer (212(1), 212(2)) til å forplante lys som er forsinket bare med den første optiske forsinkelsesdel (214(1)) og til å forplante lys som er forsinket med både den første op-
 10 tiske forsinkelsesdel (214(1)) og den andre optiske forsinkelsesdel (214(2)), hvilken detektor (230, 232) dermed mottar minst to par interfererende signaler fra hver av de første og andre sensorer (212(1), 212(2)).

17.

15 Måleanordning som angitt i krav 1, k a r a k t e r i s e r t v e d at parameteren er et akustisk signal.

18.

Fremgangsmåte som benytter et Sagnac-interferometer til å måle en parameter der
 20 fremgangsmåten er k a r a k t e r i s e r t v e d :
 forplantning av lys fra en lyskilde (222) gjennom en sløyfe slik at respektive deler av lyset forplanter seg mot hverandre i første og andre retninger i sløyfen;
 ledning av lys som forplanter seg i sløyfen gjennom første og andre sensorer (212(1), 212(2)), som reagerer på den parameter som skal måles for å modulere lyset som beve-
 25 ger seg gjennom dem, der de første og andre sensorer (212(1), 212(2)) har forskjellige optiske banelengder slik at lys som forplanter seg gjennom den andre sensor (212(2)) blir forsinket i forhold til lys som forplanter seg gjennom den første sensor (212(1));
 forsinkelse av lys som forplanter seg i sløyfen i den første retning før lyset som forplan-
 ter seg i den første retning passerer gjennom de første og andre sensorer (212(1),
 30 212(2));
 forsinkelse av det lys som forplanter seg i sløyfen i den nevnte andre retning etter at dette lys som forplanter seg i den andre retning passerer gjennom de første og andre sensorer (212(1), 212(2)); og
 interferering av lyset som forplanter seg i de første og andre retninger for å frembringe
 35 et første utgangssignal som svar på lys som passerer gjennom den første sensor (212(1)) i de første og andre retninger, og for å frembringe et andre utgangssignal som svar på

lys som passerer gjennom den andre sensor (212(2)) i de første og andre retninger, hvilket andre utgangssignal er forsinket i forhold til det første utgangssignal.

19.

- 5 Fremgangsmåte som angitt i krav 18, k a r a k t e r i s e r t
v e d at forsinkelsestrinnene frembringer en første tidsforsinkelse for en første del
av lyset, hvilken fremgangsmåte videre omfatter trinnet med forsinkelse av en andre del
av lyset med en andre tidsforsinkelse.

10 20.

Fremgangsmåte som angitt i krav 18, k a r a k t e r i s e r t
v e d at den videre omfatter forsterkning av lys som forplanter seg gjennom de første
te og andre sensorer (212(1), 212(2)) for å kompensere for tap som skyldes deling av
lyset mellom de første andre sensorer (212(1), 212(2)).

15

21.

Fremgangsmåte som angitt i krav 18, k a r a k t e r i s e r t
v e d at lyset fra lyskilden (222) blir pulset, og at lys som moduleres av den første
sensor (212(1)) skilles fra det lys som moduleres av den andre sensor (212(2)) ved tids-
20 delt multipleksing.

22.

Fremgangsmåte som angitt i krav 18, k a r a k t e r i s e r t
v e d at den videre omfatter:

- 25 påvisning av de første og andre utgangssignaler;
frembringelse av en varierende frekvens;
modulering av lyset fra lyskilden (222) med den varierende frekvens;
forsinkelse av den varierende frekvens for å frembringe en forsinket varierende fre-
kvens; og
30 blanding av detektorens utgangssignal og den forsinkende varierende frekvens for å
frembringe en respektiv svevefrekvens svarende til hver av de første og andre sensorer
(212(1), 212(2)), hver svevefrekvens har respektive sidebånd svarende til den respektive
parameter som er påvist med de første og andre sensorer (212(1), 212(2)).

35 23.

Fremgangsmåte som angitt i krav 18, k a r a k t e r i s e r t
v e d at den videre omfatter:

påvisning av de første og andre utgangssignaler;

frembringelse av en digital kode;

intensitetsmodulering av lyset fra lyskilden med den digitale kode;

innføring av en valgt forsinkelse for den digitale kode for å frembringe en forsinket di-

5 gital kode; og

korrelering av detektorutgangssignalet og den digitale kode for å frembringe et demul-
tiplekset signal svarende til den parameter som er målt av en utvalgt av de første og and-
re sensorer (212(1), 212(2)), hvilken utvalgte av de første og andre sensorer (212(1),
212(2)) er valgt inn med den valgte forsinkelse.

10

24.

Fremgangsmåte som angitt i krav 18, k a r a k t e r i s e r t

v e d at den videre omfatter depolarisering av det lys som forplanter seg i sløyfen.

15 25.

Fremgangsmåte som angitt i krav 18, k a r a k t e r i s e r t

v e d at parameteren er et akustisk signal.

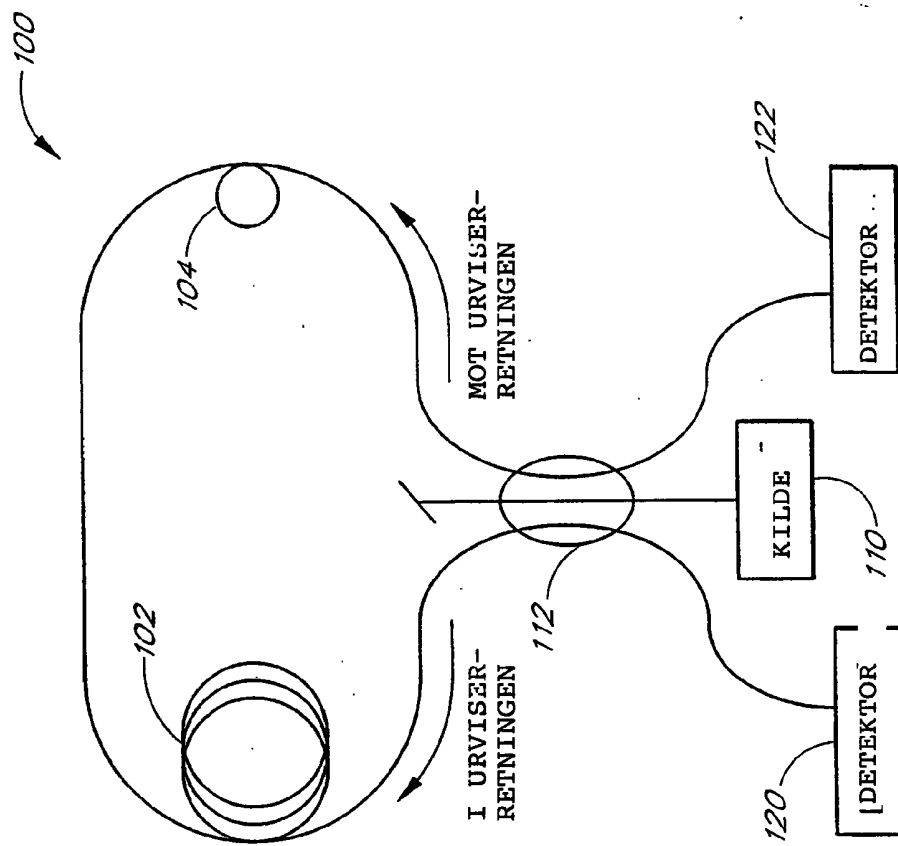


FIG. 1

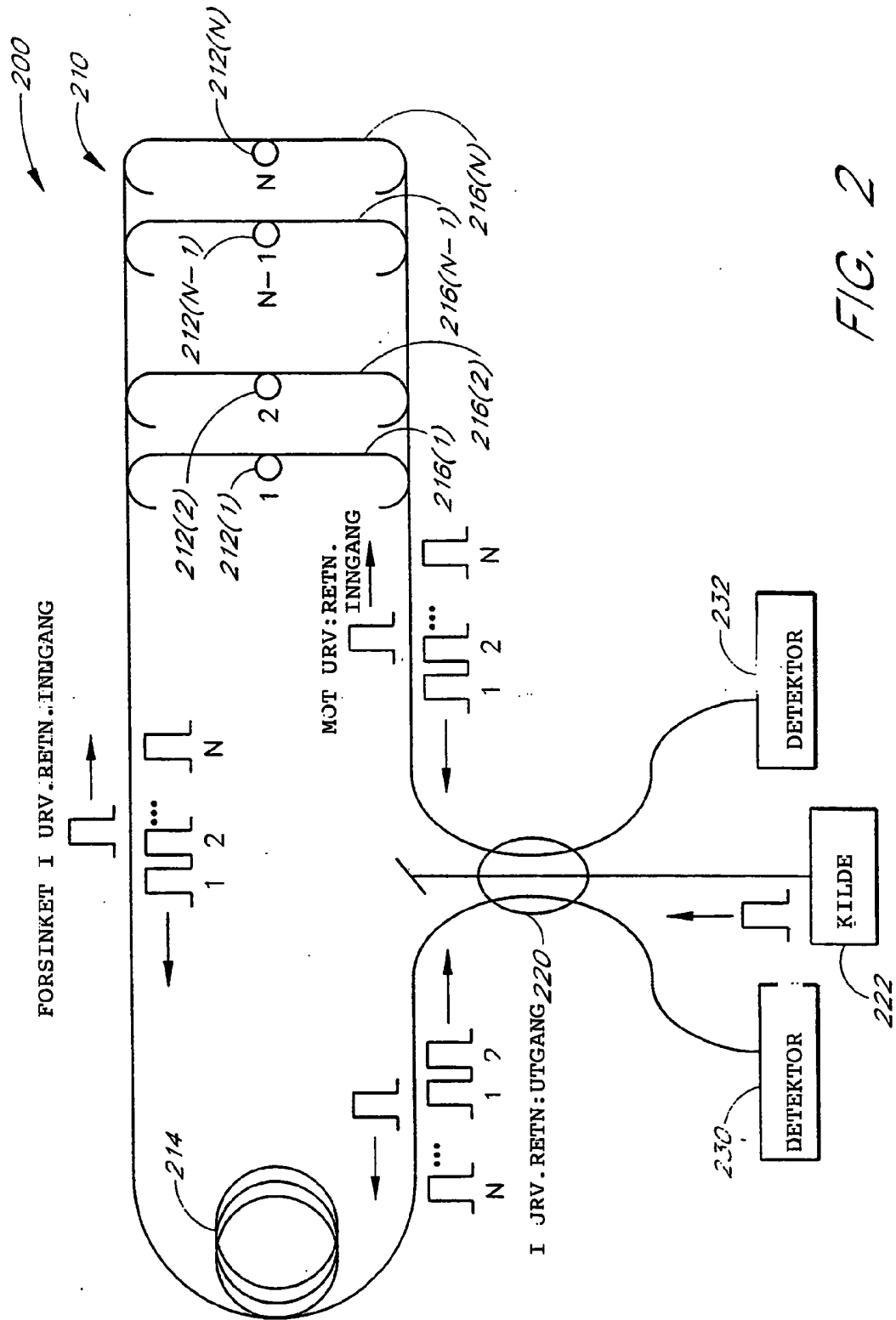
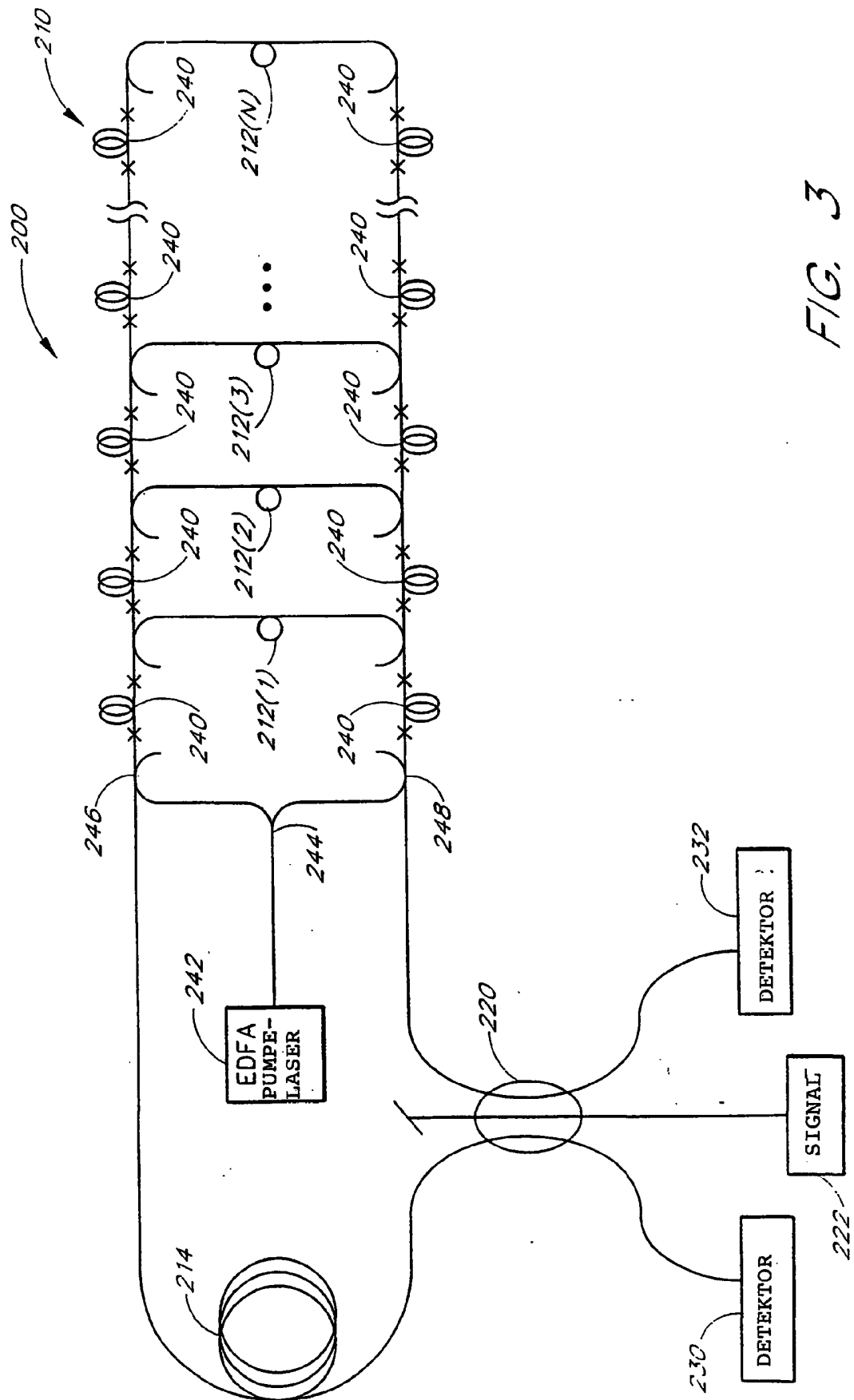


FIG. 2



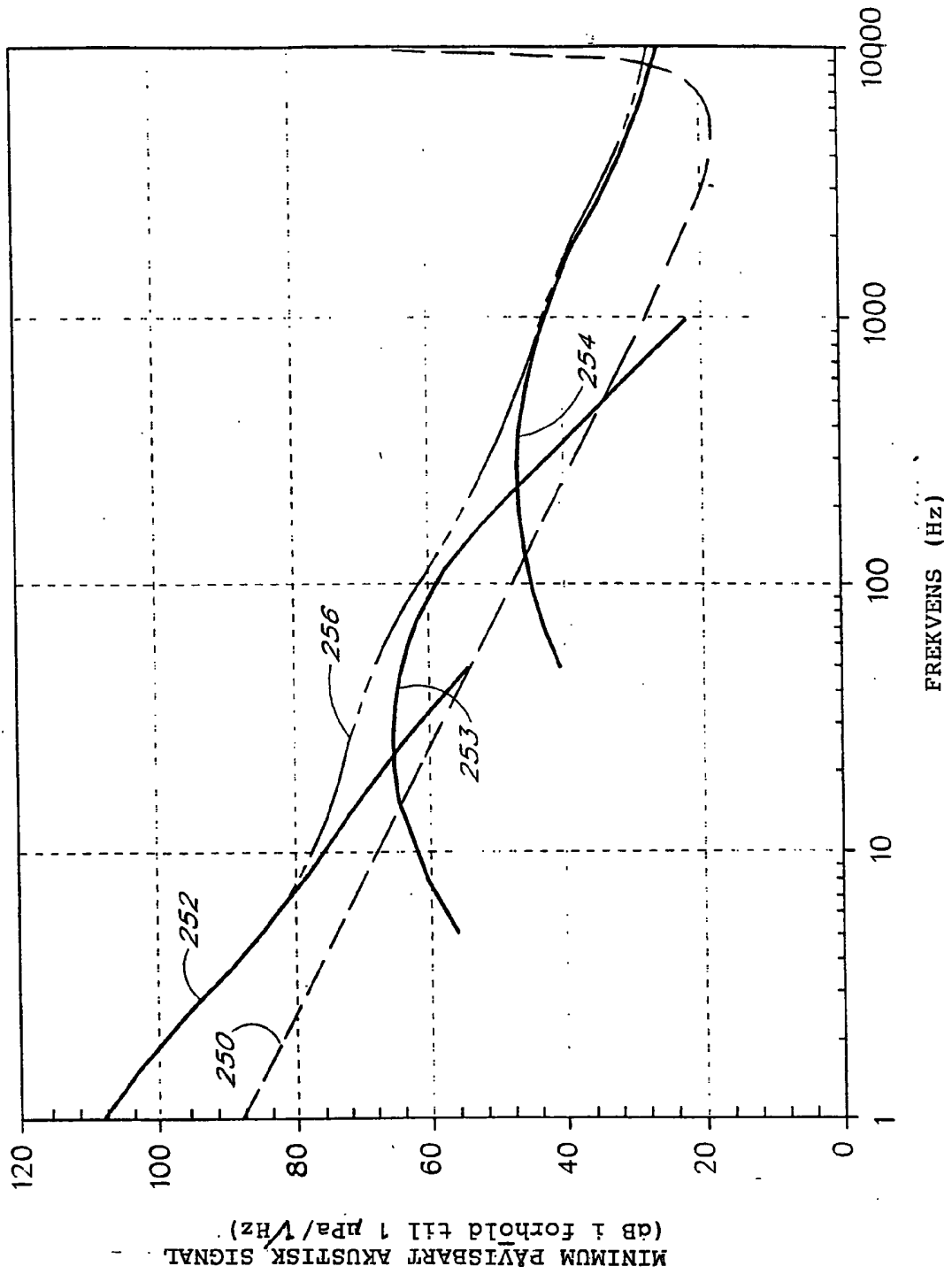


FIG. 4

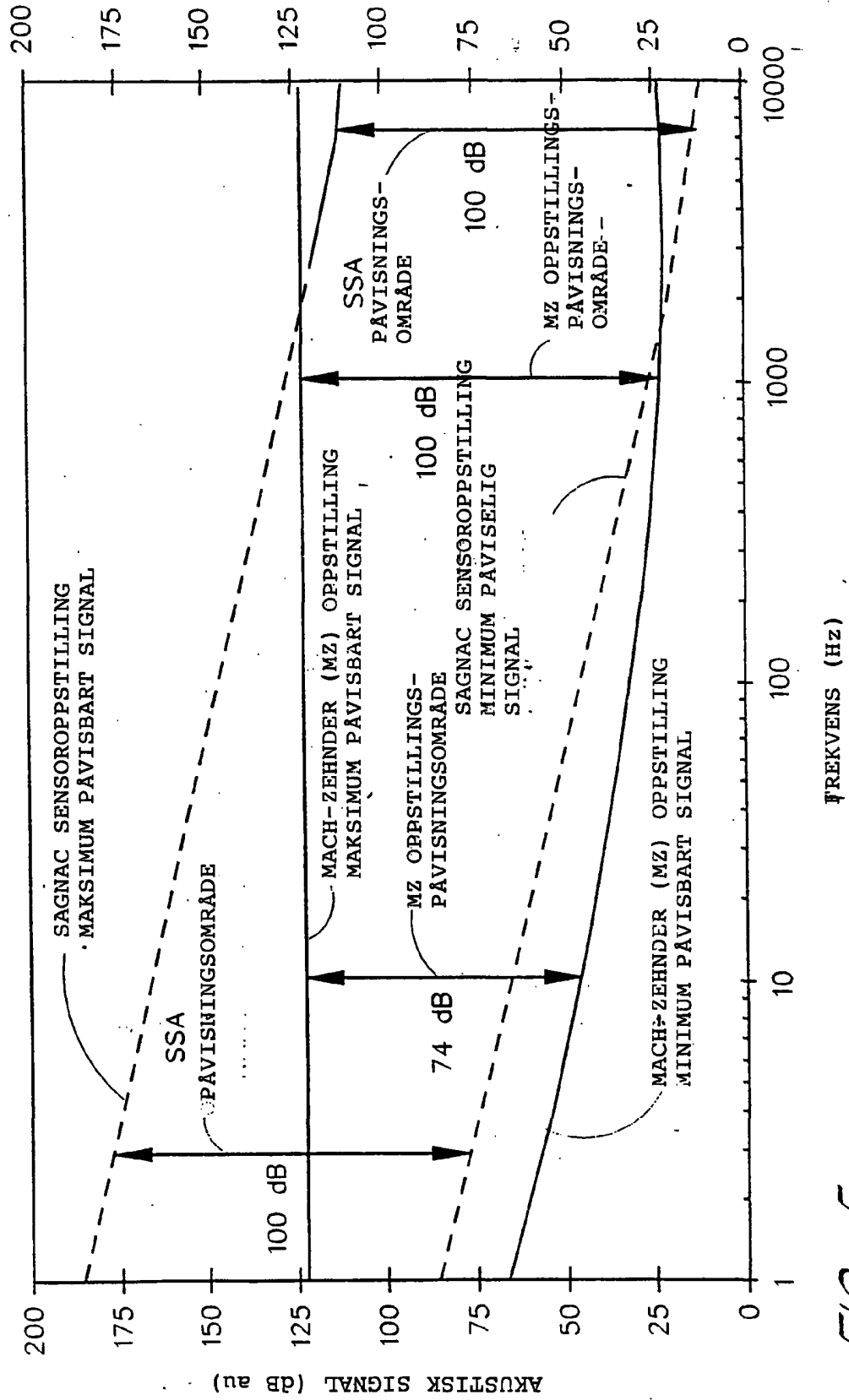


FIG. 5

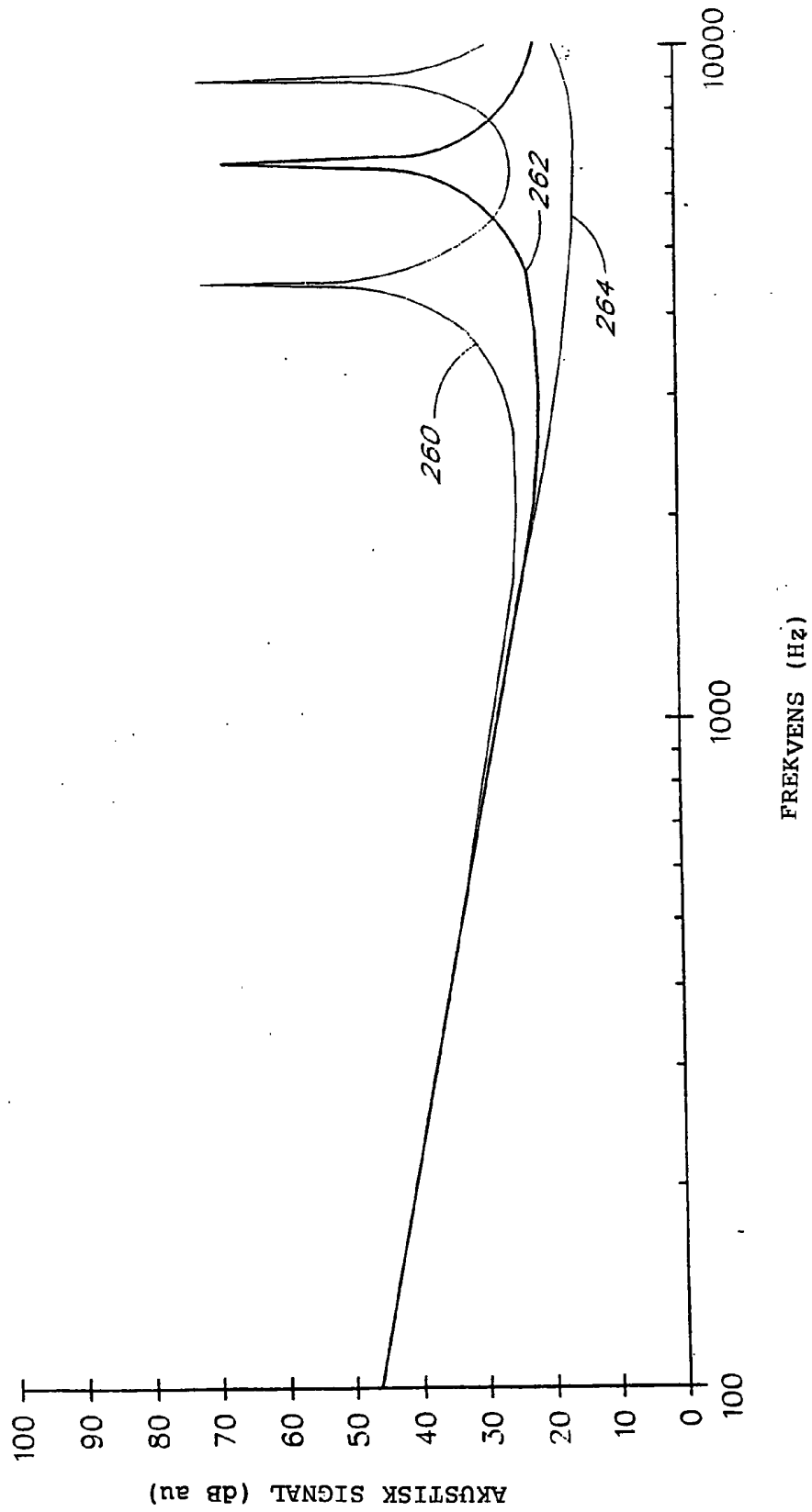


FIG. 6

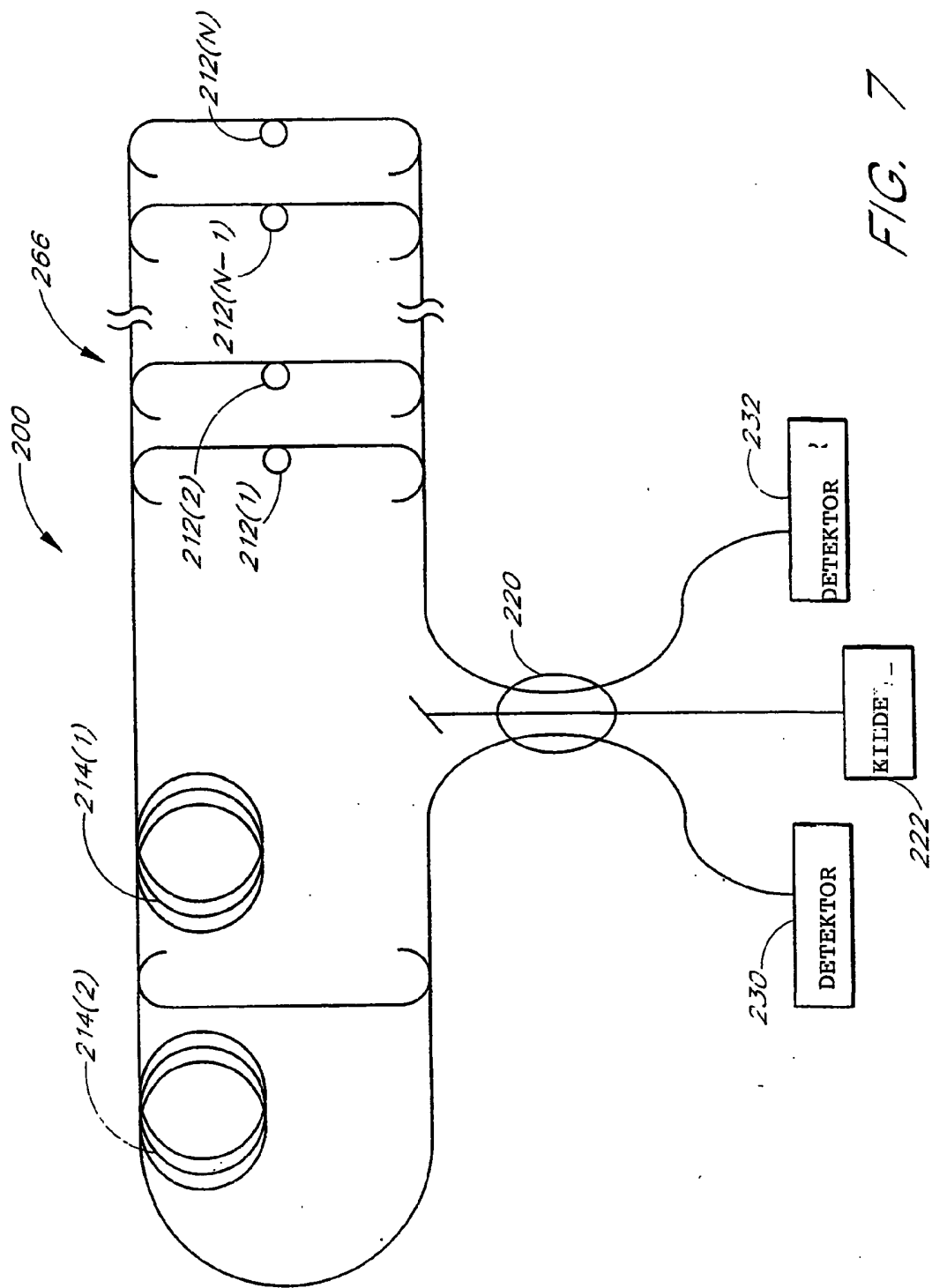


FIG. 7

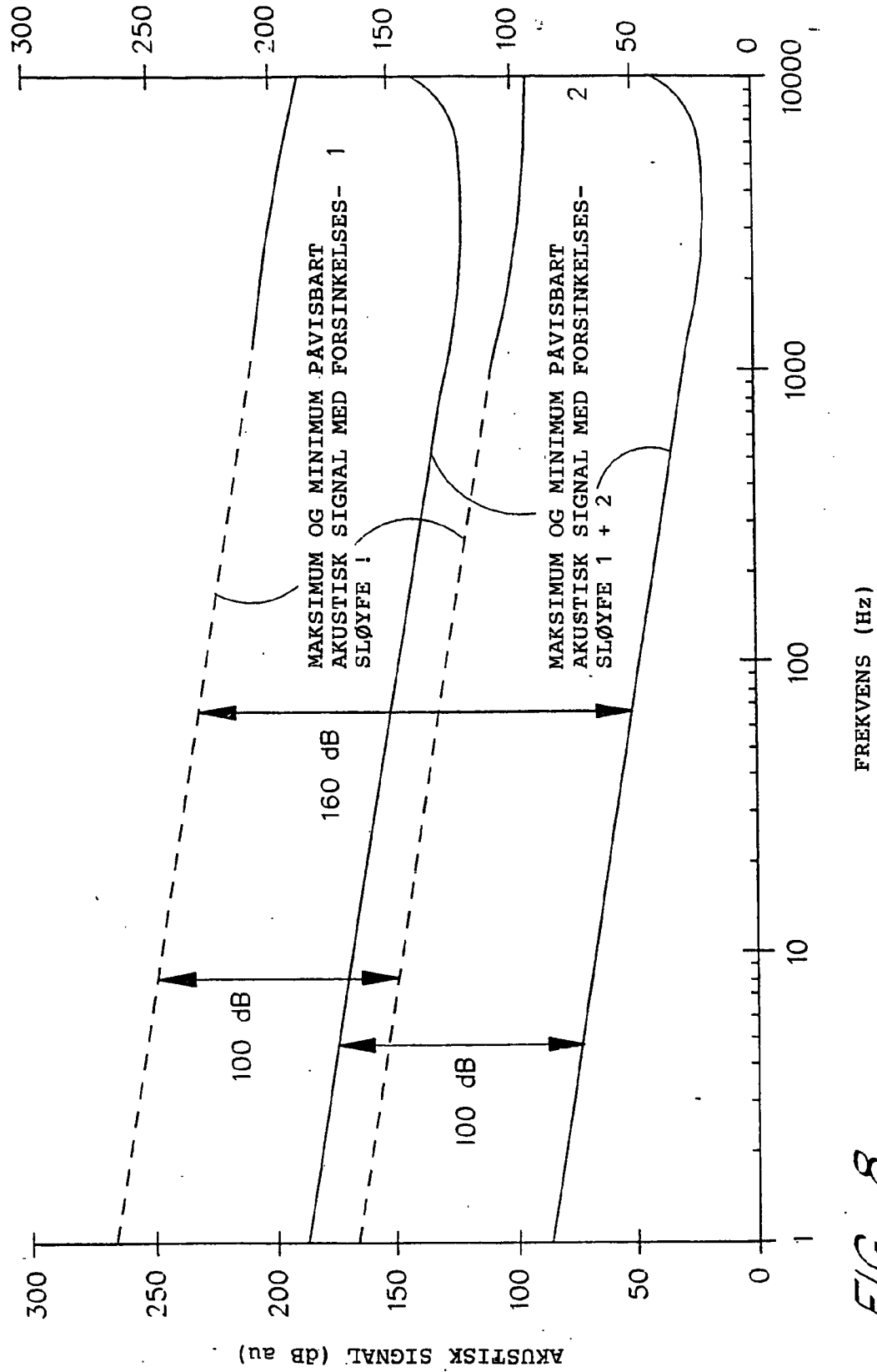
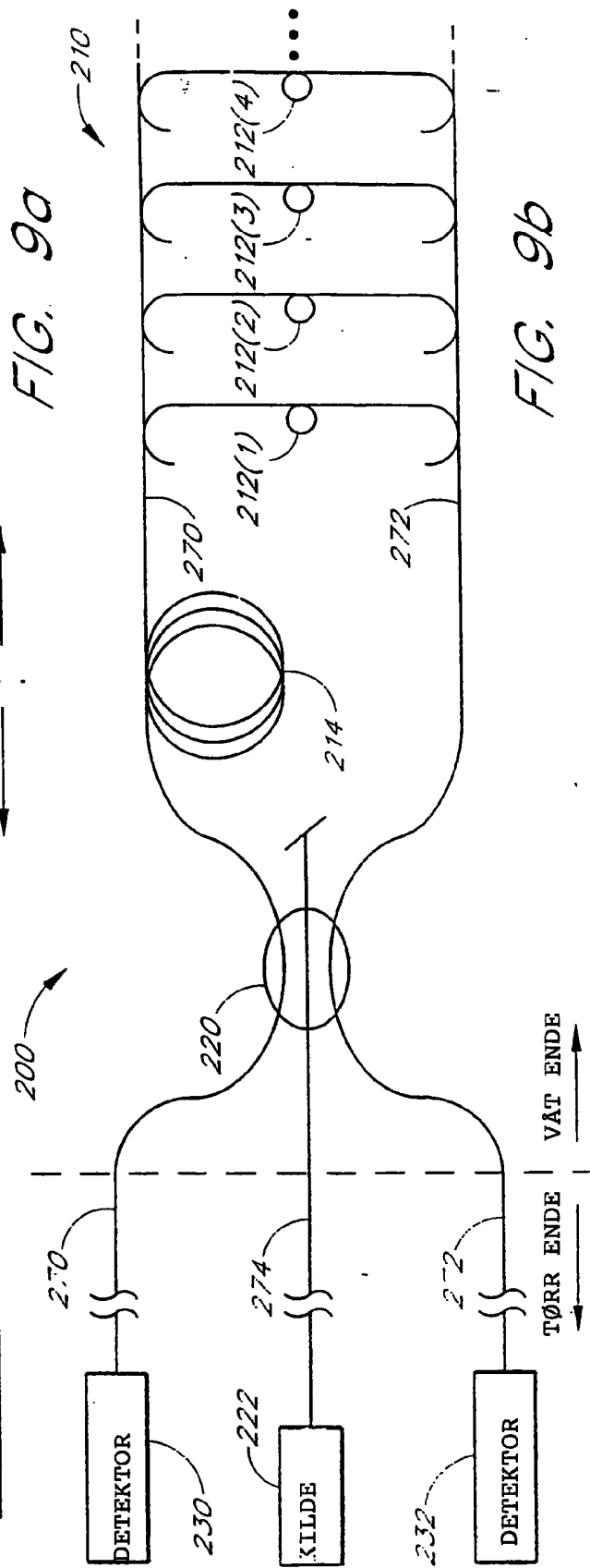
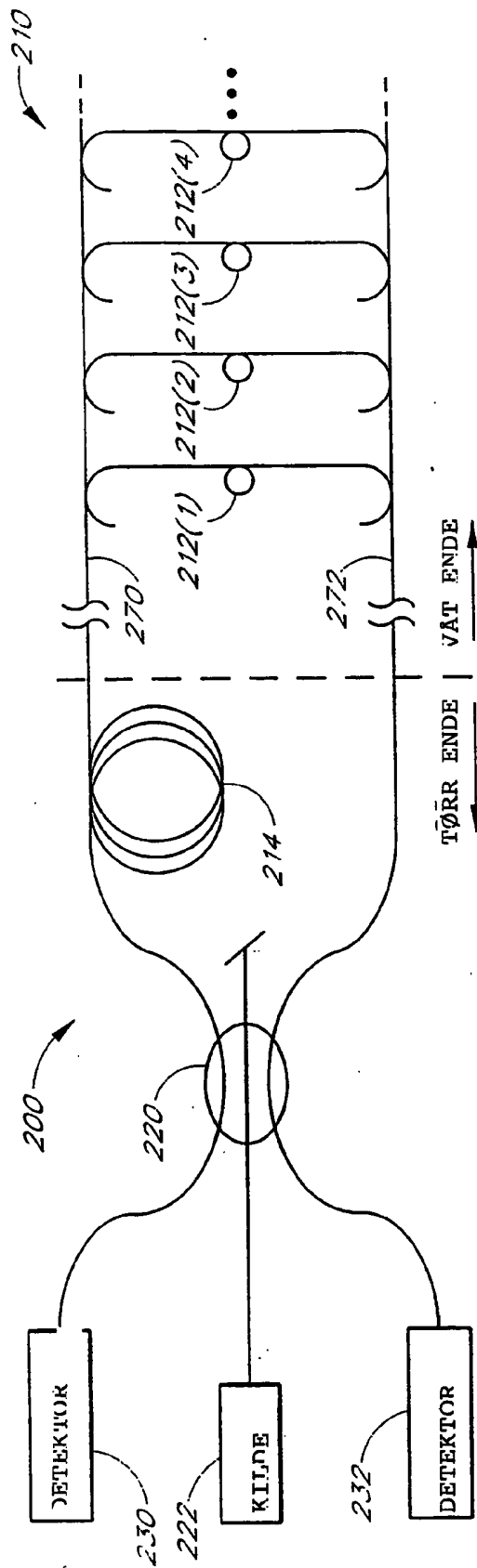


FIG. 8



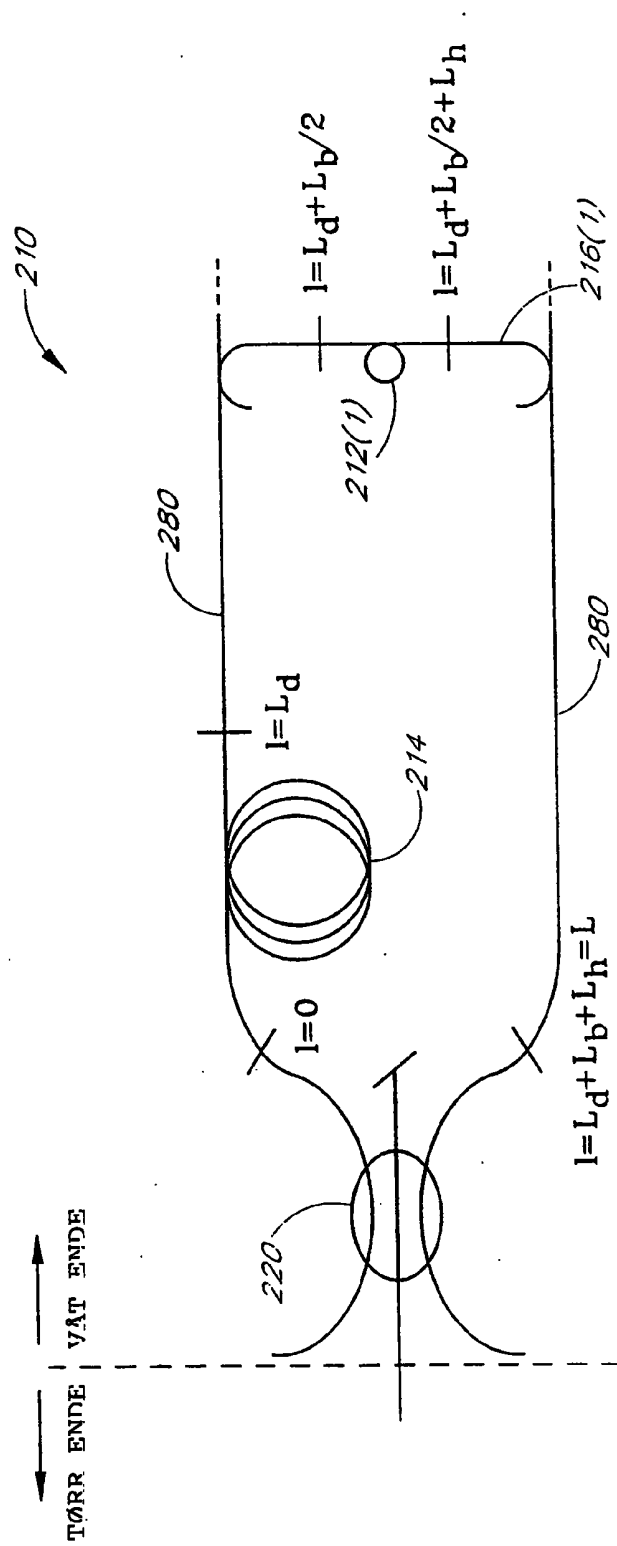


FIG. 10

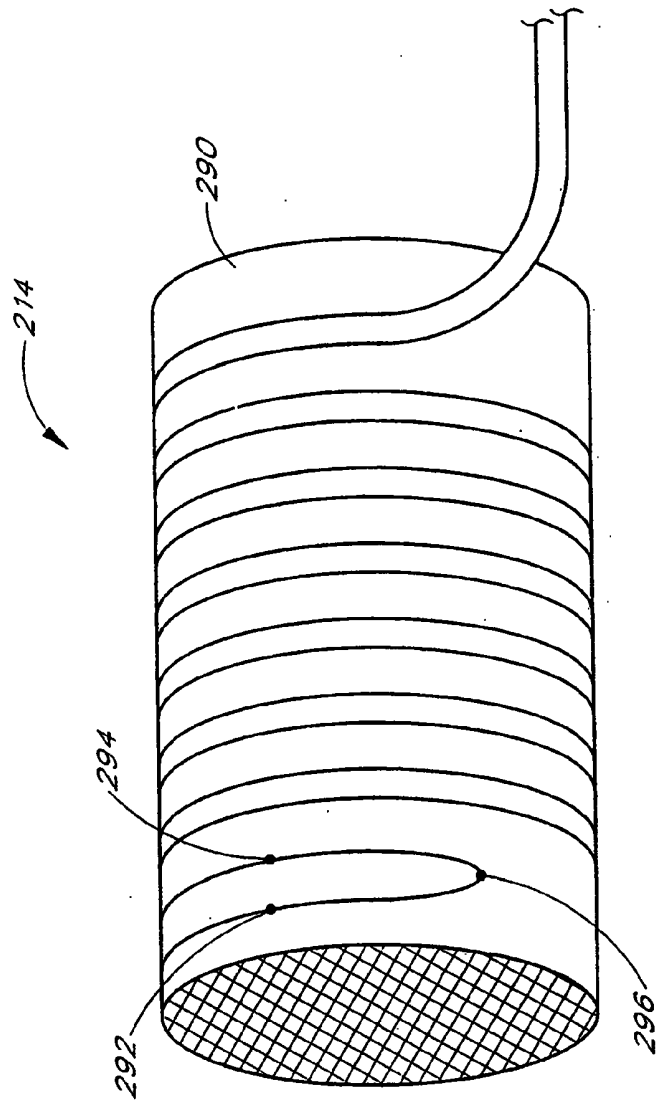


FIG. 11

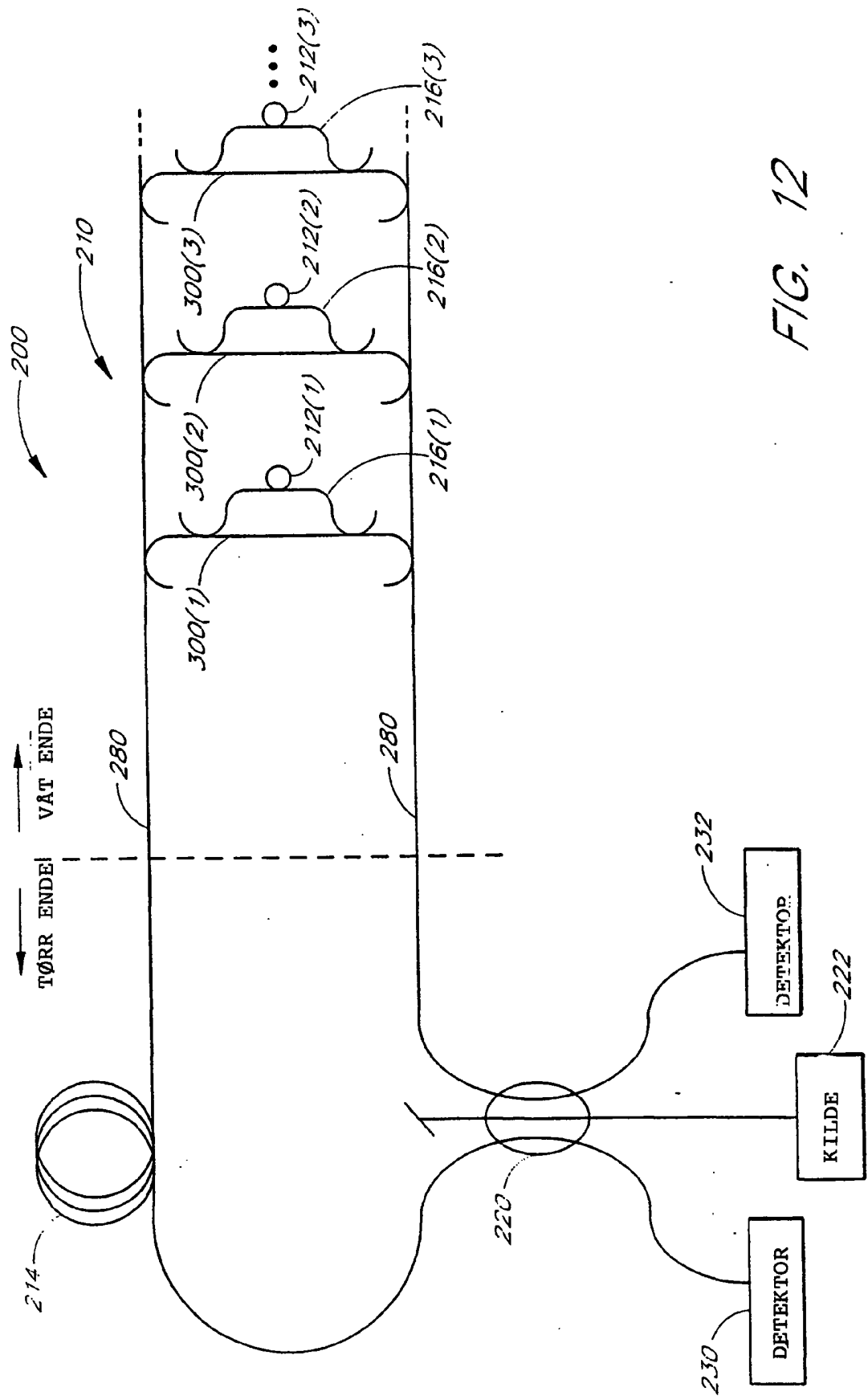


FIG. 12

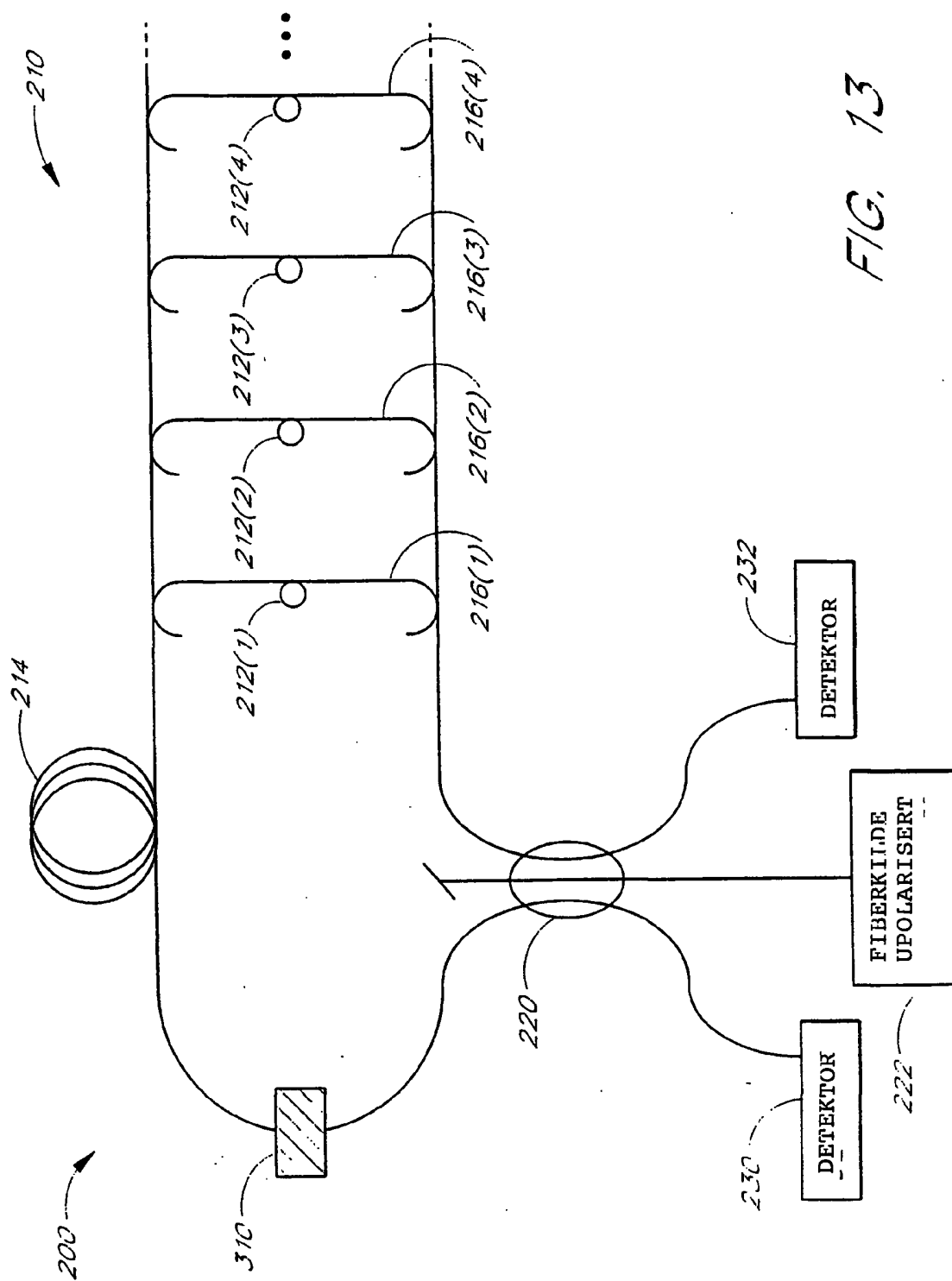


FIG. 13

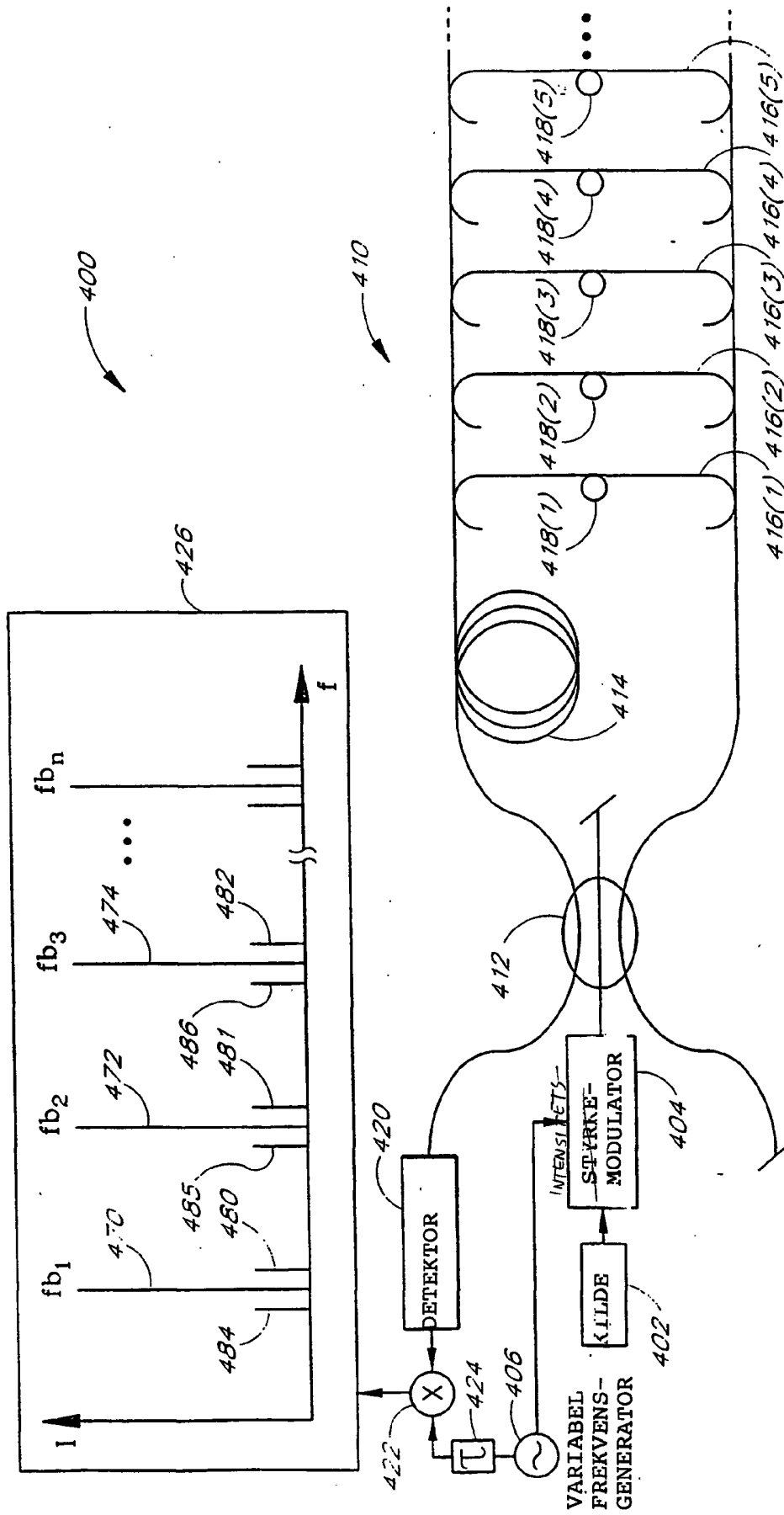


FIG. 14

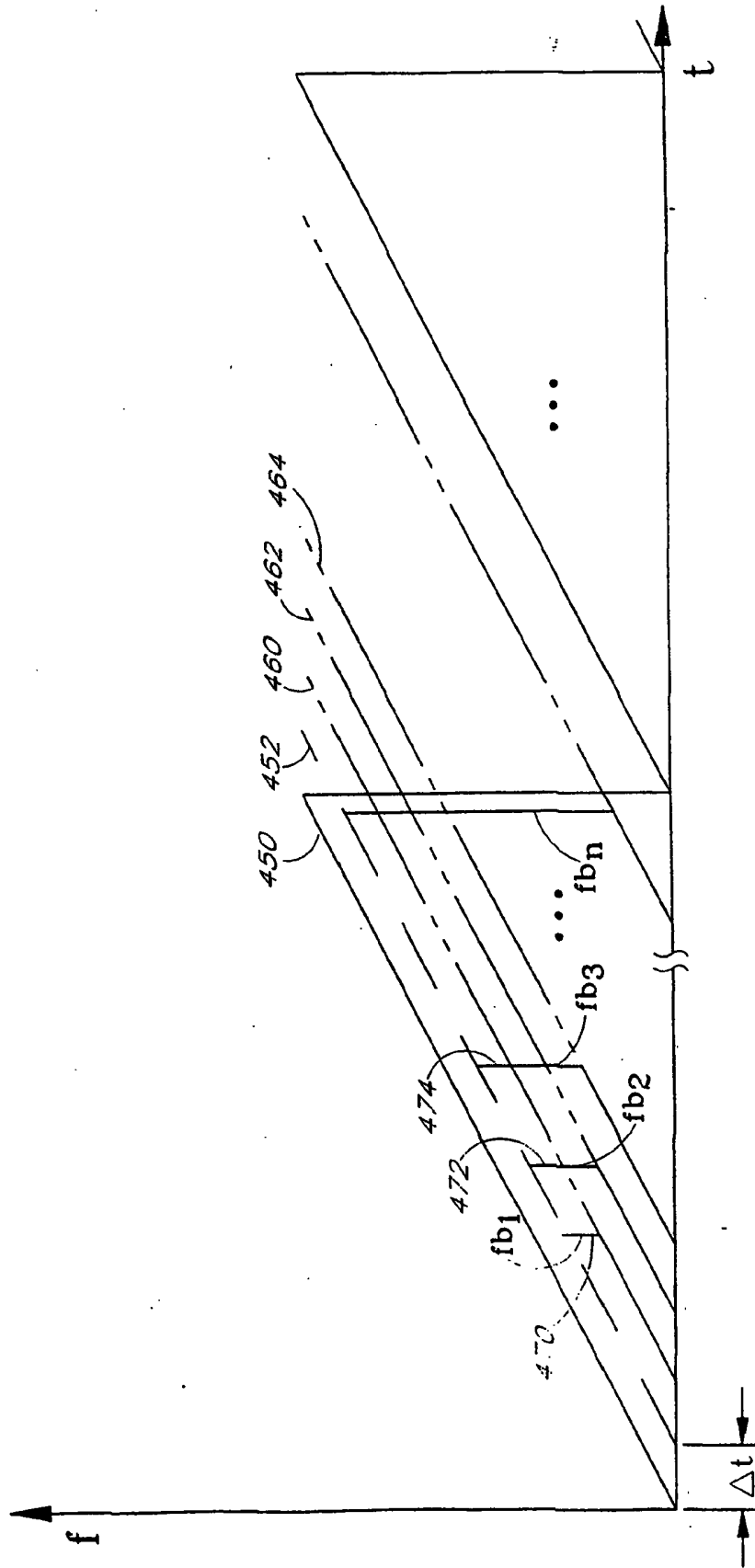


FIG. 15

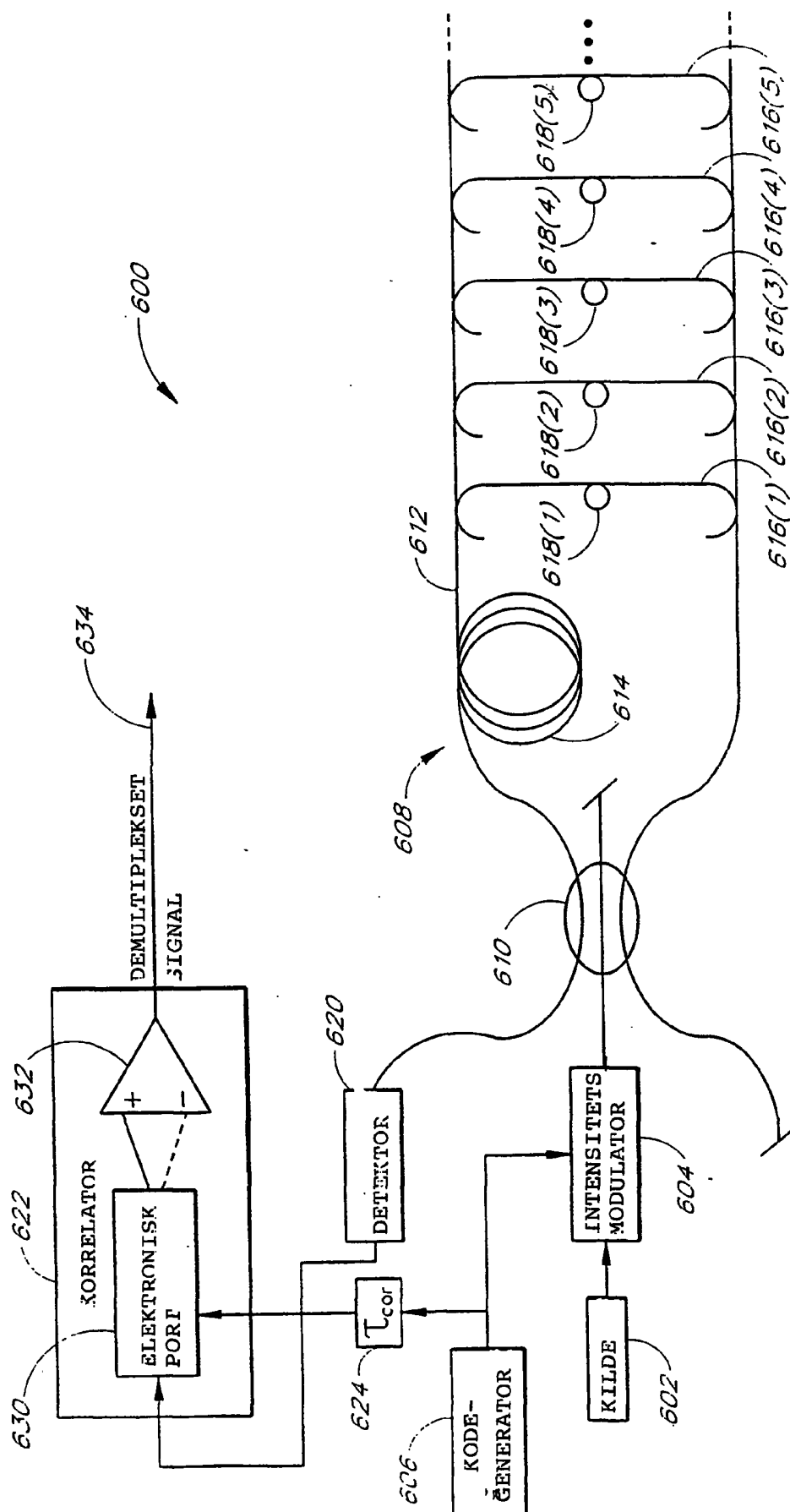


FIG. 16