



(12) PATENT

(19) NO

(11) 334239

(13) B1

NORGE

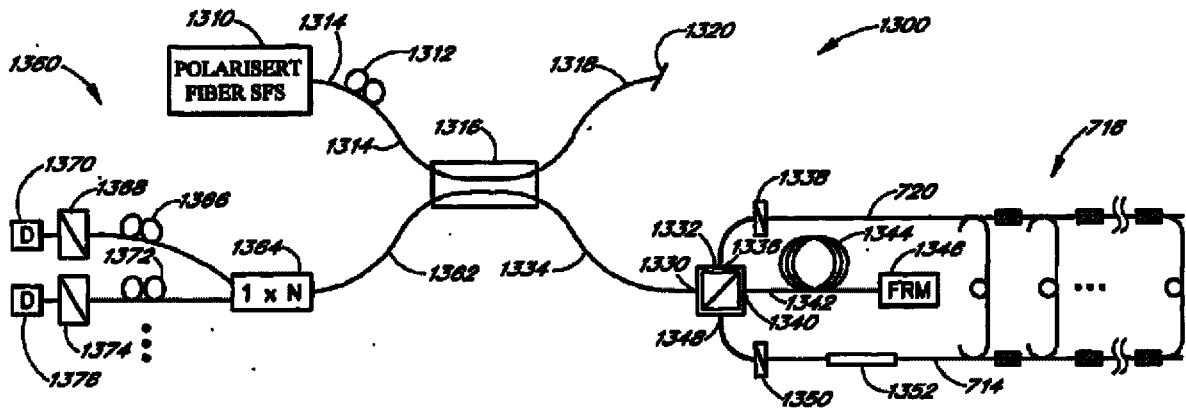
(51) Int Cl.
G01H 9/00 (2006.01)

Patentstyret

(21)	Søknadsnr	20024211	(86)	Int.inng.dag og søknadsnr	2001.03.02 PCT/US2001/06945
(22)	Inng.dag	2002.09.04	(85)	Videreføringsdag	2002.09.04
(24)	Løpedag	2001.03.02	(30)	Prioritet	2000.03.06, US, 520277
(41)	Alm.tilgj	2002.10.24			
(45)	Meddelt	2014.01.20			
(73)	Innehaver	The Board of Trustees of the Leland Stanford Junior University, Stanford University, Stanford, CA 94305, USA			
(72)	Oppfinner	Benjamin A Vakoc, 1740 B Marina Court, San Mateo, CA, USA			
(74)	Fullmektig	Zacco Norway AS, Postboks 2003 Vika, 0125 OSLO, Norge			

(54)	Benevnelse	Foldet Sagnac sensorgruppe
(56)	Anførte publikasjoner	WO 9952323 A1 US 4529312 A
(57)	Sammendrag	

En foldet, akustisk fiberoptisk Sagnac sensorgruppe (1200) arbeider på en tilsvarende måte som et Sagnac interferometer, men bruker en felles forsinkelseslinje for å redusere fordelt opphenting i nedføringsfibere. Den fiberoptiske akustiske sensoren (716) blir anvendt for påvisning av akustiske bølger i vann. Ved å forspenne den foldete Sagnac sensorgruppen på driftsprinsippene tilsvarende Sagnac interferometeret, snarere enn å forspenne gruppen på et Mach-Zehnder interferometer, har sensorgruppen et stabilt forspenningspunkt, redusert fasestøy, og tillater bruk av en bredbåndssignalkilde snarere enn at det kreves en mer kostbar smallinjelaser. Et stort antall akustiske sensorer (718(N)), kan multiplekseres i arkitekturen til den foldete, akustiske Sagnac fiberoptiske gruppe.



Den foreliggende oppfinnelse omfatter området akustiske fiberoptiske sensorgrupper, der lys blir forplantet i gruppene og virkningene av akustiske signaler på lyset som returnerer fra gruppene, blir analysert for å bestemme karakteristikene til de akustiske signalene.

Fiberoptisk basert akustiske sensorer er lovende alternativer til konvensjonelle elektroniske sensorer. Blant deres fordeler innbefattes høy sensitivitet, stort dynamisk område, liten vekt og kompakt størrelse. Evnen til lett å multiplekse et stort antall fiberoptiske sensorer på felles busser, gjør også fiberoptiske sensorer attraktive for storskalagrupper. Den nylig vellykkede innlemmelsen av multiple erbiumdopede fiberforsterkere med liten forsterkning (EDFA) i en fiberoptisk sensorgruppe for å øke antall sensorer som kan støttes av et enkelt fiberpar, har gjort storskala fiberoptiske sensorgrupper enda mer konkurransedyktige.

For akustisk påvisning har den valgte fiberoptiske sensoren vært den Mach-Zehnder interferometriske sensoren. I en hvilken som helst interferometrisk sensor blir fasemodulasjonen mappet i en intensitetsmodulasjon via en hevet cosinusfunksjon. Pga. denne ikkelineære overføringsfunksjonen, vil en sinusfasemodulasjon generere høyere ordens harmoniske. Et kvadratutforspent interferometer (interfereringsstråle $\pi/2$ ute av fase) har maksimal respons ved det første ordens harmoniske og en minimal respons ved den andre ordens harmoniske. Av denne grunn er kvadraturen det foretrukne forspenningspunktet. Ettersom forspenningspunktet driver bort fra kvadraturen (for eksempel pga. eksterne temperaturendringer), avtar responsen ved den første ordens harmoniske og responsen ved den andre ordens harmoniske øker. Når interferometeret er forspent ved 0 eller π ut av fase, forsvinner den første ordens harmoniske fullstendig. Denne avtagende responsen ved den første ordens harmoniske (som er resultatet av forspenningspunktene bort fra kvadraturen) refereres til som signalfading.

Fordi Mach-Zehnder interferometriske sensorer har et ustabilt forspenningspunkt, er de spesielt utsatt for det nettopp nevnte signalfadingsproblemet. For å kunne overkomme signalfading er det nødvendig med en demodulasjon av det returnerte signalet. Den typiske demodulasjonsteknikken er den fasegenererte bærebølgeteknikken (PGC), som krever en baneforskjøvet Mach-Zehnder interferometriske sensor. (Se for eksempel Anthony Dandridge, et al., *Multiplexing of Interferometric Sensors Using Phase Carrier Techniques*, Journal of Lightwave Technology, bind LT-5, nr. 7, juli 1987, s. 947-952.) Denne baneubalansen bringer også omformingen av laserfasestøy til intensitetsstøy, som begrenser ytelsen til Mach-Zehnder interferometriske sensorgruppene ved lave frekvenser, og gir stringente krav til

kildens linjebredde. Dette smale linjebreddekravet har bremset utviklingen av forsterkede Mach-Zehnder interferometriske sensorgrupper ved 1,55 μm .

Sagnac interferometeret har funnet bred anvendelse i de fiberoptiske gyroskopene. (Se for eksempel B. Culshaw et al., *Fibre optic Gyroscopes*, Journal of Physics E (Scientific Instruments), bind, 16, nr. 1, 1983, s. 5-15).

Det er blitt foreslått å bruke Sagnac interferometeret for å påvise akustiske bølger. (Se for eksempel E. Udd, *Fiber-optic Acoustic sensor based on the Sagnac interferometer*, Proceedings of the SPIE-The International Society for Optical Engineering, bind 425, 1983, s. 90-91; Kjell Kråkenes et al., *Sagnac interferometer for underwater sound detection; noise properties*, OPTICS LETTER, bind 14, nr. 20, 15. oktober 1989, s. 1152-1154; og Sverre Knudsen et al., *An Ultrasonic Fiber-Optic Hydrophone Incorporating a Push-Pull Transducer in a Sagnac Interferometer*, JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, bind 12, nr. 9, september 1994, s. 1696-1700). På grunn av dets fellesbane utførelse er Sagnac interferometeret resiprokt og har derfor et stabilt forspenningspunkt, som eliminerer signalfading og forhindrer omforming av kildefasestøy til intensitetsstøy. Sagnac interferometeret er derfor ufølsomt overfor fasestøyen som begrenser de interferometriske Mach-Zehnder sensorer ved lave frekvenser.

Internasjonal søknad WO99/52323 beskriver en foldet Sagnac fiberoptisk sakustisk sensorgruppe 700 som opererer på en måte lik et Sagnac interferometer, men som bruker en felles forsinkelsesbane for å redusere fordelt opphentet signal i nedføringsfibre som kan brukes for å detektere akustiske bølger i vann. Ved å basere den foldede Sagnac sensorgruppen på operasjonsprinsipper lik Sagnac Interferometeret heller enn å basere gruppen på en Mach-Zehnder interferometer har sensorgruppen et stabilt forspenningspunkt, et redusert fasestøy, og tillater en bredbåndssignalkilde å bli brukt heller enn å kreve en dyrere smallinjelas.

I henhold til et aspekt av gjeldende oppfinnelse er det tilveiebrakt en akustisk sensor som beskrevet i krav 1. I henhold til et andre aspekt av gjeldende oppfinnelse er det tilveiebrakt en fremgangsmåte for å detektere akustiske signaler som beskrevet i krav 13.

Et aspekt ved den foreliggende oppfinnelsen er en akustisk sensor som omfatter en kilde av lyspulser, en første kopler, en polarisasjonsavhengig andre kopler, en optisk forsinkelseslinje og minst en detektor. Den første kopleren kobler lyspulsene til en første optisk bane eller linje som har en første optisk lengde og til en gruppe av

sensorer. Gruppen av sensorer omfatter minst en første sensor. Den første sensoren er i en andre optisk bane eller linje som har en andre optisk lengde som er forskjellig fra den første optiske lengden. Den polarisasjonsavhengige andre koplere kobler lyspulser mottatt fra den første optiske linjen i en første polarisasjon til den optiske

5 forsinkelseslinjen og kobler lyspulser mottatt fra den første optiske linjen i en første polarisasjon til den optiske forsinkelseslinjen og kobler lyspulser mottatt fra gruppen i en andre polarisasjon til den optiske forsinkelseslinjen. Lyspulsene koblet til den optiske forsinkelseslinjen i den første polarisasjonen returnerer fra den optiske forsinkelseslinjen til den andre koplere i den andre polarisasjonen. Lyspulsene koblet

10 til den optiske forsinkelseslinjen i den andre polarisasjonen returnerer fra den optiske forsinkelseslinjen til den andre koplere i den første polarisasjonen. Den andre koplere kobler lyspulsene som returnerer til den andre koplere fra den optiske forsinkelseslinjen i den første polarisasjonen til den første optiske linjen for å forplante seg i denne til den første koplere. Den andre koplere kobler lyspulser som returnerer

15 til den andre koplere fra den optiske forsinkelseslinjen i den andre polarisasjonen til gruppen for å forplante seg i denne til den første koplere. Den første koplere kombinerer lyspulsene fra den første optiske linjen og lyspulsene fra gruppen for å bringe lyspulsene som forplanter seg i like avstander gjennom den første optiske linje og i gruppen for å interferere og generere et påvisbart utgangssignal. Det detekterbare

20 utgangssignalet varierer som respons på akustisk energi som støter mot den første sensoren. Detektoren påviser de påvisbare utgangssignalene for å generere et detektorutgangssignal som reagerer på variasjoner i det påvisbare utgangssignalet fra den første koplere. Gruppen innbefatter fortrinnsvis en andre sensor. Den andre sensoren er i en tredje optisk linje som har en tredje optisk lengde, forskjellig fra den

25 første optiske lengden og den andre optiske lengden. Den polarisasjonsavhengige andre koplere omfatter også fortrinnsvis en polarisasjons-strålesplitter. I foretrukne utførelser omfatter den optiske forsinkelseslinjen en lengde av optisk bølgeleder og en polarisasjonsroterende reflektor. Reflektoren bringer lys som faller inn på reflektoren i den første polarisasjonen til å reflekteres som lys i den andre polarisasjonen, og bringer

30 lys som faller inn på reflektoren i den andre polarisasjonen til å reflekteres som lys i den første polarisasjonen. Reflektoren omfatter på fordelaktig måte et Faraday-speil. I spesielt foretrukne utførelser innbefatter en første optisk linje en ikke-resiprok faseskifter som bringer lys som forplanter seg gjennom den første optiske linje i en første retning, og lys som forplanter seg gjennom den første optiske linje i en andre

35 retning til å bli utsatt for relative faseforskyvninger slik at lys kombinert i den første koplere har en faseforspenning. I slike utførelser er fortrinnsvis en tredje optisk linje anordnet parallelt med den første optiske linje. En av den første optiske linjen og den

tredje optiske linjen innbefatter en optisk forsinkelse som bringer den første optiske linjen til å ha en optisk linje forskjellig fra den optiske linjelengden til den tredje optiske linje, slik at lys som forplanter seg gjennom den første optiske linje har en forplantningstid som er forskjellig fra en forplantningstid til lys som forplanter seg gjennom den andre optiske linjen, for derved å tidsmultiplekse lypulsene. Den ikke-resiproke faseskifteren eller -forskyveren omfatter fortrinnsvis en første Faraday-rotator eller rotasjonsinnretning, en kvartbølgeplate og en andre Faraday-rotator, den første Faradayrotatoren. Kvartbølgeplaten og den andre Faradayrotatoren er anordnet slik at lys som forplanter seg i den første retningen passerer gjennom den første Faradayrotatoren, deretter gjennom kvartbølgeplaten og så gjennom den andre Faradayrotatoren, og slik at lys som forplanter seg i den andre retningen passerer gjennom den andre Faradayrotatoren, så gjennom kvartbølgeplaten, og så gjennom den første Faradayrotatoren. Alternativt omfatter den ikke-resiproke faseskifteren en første kvartbølgeplate, en Faraday-rotator og en andre kvartbølgeplate. Den første kvartbølgeplaten, Faradayrotatoren og den andre kvartbølgeplaten er anordnet slik at lys som forplanter seg i den første retningen, passerer gjennom den første kvartbølgeplaten, deretter gjennom Faradayrotatoren og så gjennom den andre kvartbølgeplaten, og slik at lys som forplanter seg i den andre retningen passerer gjennom den andre kvartbølgeplaten, så gjennom Faradayrotatoren og så gjennom den første kvartbølgeplaten.

Et annet aspekt ved den foreliggende oppfinnelsen er en akustisk sensor som omfatter en kilde av innmatingslyspulser, en gruppe optiske sensorer; en optisk forsinkelseslinje, et optisk detektorsystem; og et innmatings/utmatings system. Innmatings/utmatingsystemet mottar innmatingslyspulsene og retter en første del av hver lypuls som har en første polarisering gjennom gruppen av optiske sensorer i en første retning, deretter gjennom den optiske forsinkelseslinjen, og så til det optiske detektorsystemet. Innmatings/utmatingsystemet retter en andre del av hver lypuls i en andre polarisasjon ortogonalt på den første polarisasjonen gjennom den optiske forsinkelseslinjen, så gjennom den optiske sensorgruppen i en andre retning, og så til det optiske detektorsystemet. Det optiske detektorsystemet mottar lypulsene i den første og den andre polariseringen og påviser endringer i lypulsene forårsaket av forstyrrelser eller perturbasjoner i de optiske sensorene.

Et annet aspekt ved foreliggende oppfinnelse er en fremgangsmåte for å påvise akustiske signaler. Fremgangsmåten omfatter å generere et innmatingslyssignal og koble det innmatede lyssignalet til minst første og andre forplantningslinjer for å forplante seg i respektive første retninger i disse. De første og andre forplantningslinjene har respektive første og andre optiske lengder. De første og andre

forplantningslinjene sender ut respektive første og andre utgangssignaldeler. Den første og andre utgangssignaldelen blir matet ut fra den første og andre forplantningslinjen ved forskjellige tider i samsvar med forskjeller i den første og andre optiske linjelengde. Den andre utgangssignaldelen er modulert av et akustisk signal som støter an mot den andre forplantningslinjen. Den første lysdelen er koblet til en forsinkelseslinje i en første polarisering, og den andre lysdelen er koblet til forsinkelseslinjen i en andre polarisering. Forsinkelseslinjen sender ut en første forsinket lysdel som korresponderer med den første utsendte lysdelen. Den første forsinkede lysdelen har den andre polariseringen. Forsinkelseslinjen sender ut en andre forsinket lysdel som korresponderer med den andre utsendte lysdelen. Den andre forsinkede lysdelen har den første polariseringen. Den første og den andre forsinkede lysdelen blir koblet til den første og andre forplantningslinjen for å forplante seg i disse i respektive andre retninger motsatt til de respektive første retningene. Den første forplantningslinjen sender ut et første sett av returlysdeler. Det første settet av returlysdeler omfatter en respektiv returlysdel for hver av den første og andre forsinkede lysdelen. Den andre forplantningslinjen sender ut et andre sett av returlysdeler. Det andre settet av returlysdeler omfatter en respektiv returlysdel for hver av den første og andre forsinkede lysdelen. Det første og andre settet av returlysdeler er koblet til minst en detektor. Returlysdelene i det første og andre settet av returlysdeler som er resultatet av utsendte lysdeler og forsinkede lysdeler som forplanter seg med identiske, optiske linjelengder og interfererer for å generere påvisbare utgangssignaler. Fremgangsmåten påviser selektivt de påvisbare utgangssignalene for å påvise bare utgangssignaler som er resultatet av interferens av lysdelen som forplanter seg i den første forplantningslinjen i enten den første retningen eller den andre retningen. De påvisbare utgangssignalene varierer som respons på det akustiske signalet som støter an mot den andre forplantningslinjen.

Et annet aspekt ved den foreliggende oppfinnelsen er en sensor som omfatter en kilde av lys og en første kopler som kobler lys til en felles bane eller linje og til en avfølingsgruppe for å forplante seg i respektive første retninger i disse.

Avfølingsgruppen omfatter et mangfold avfølingslinjer. En polarisasjonsavhengig andre kopler kobler lys fra den felles linjen og fra avfølingsgruppen til en forsinkelseslinje. Den andre kopleren kobler bare lys i en første polarisering fra den felles linjen til forsinkelseslinjen. Den andre kopleren kobler bare lys i en andre polarisering fra avfølingsgruppen til forsinkelseslinjen. Forsinkelseslinjen roterer lys i den første polariseringen til den andre polariseringen og roterer lys i den andre polariseringen til den første polariseringen. Den andre kopleren kobler videre lys fra forsinkelseslinjen i den første polariseringen til den felles linjen og kobler lys fra forsinkelseslinjen i den

andre polariseringen til avfølingsgruppen for å forplante seg i respektive andre retninger i denne til den første koplere. Den første koplere tilveiebringer utgangsllys som reagerer på lyset som forplanter seg i de respektive andre retningene. En detektor mottar utgangsllyset fra den første koplere og genererer et utgangssignal som reagerer på

5 interferens av lys i den første koplere. Forsinkelseslinjen omfatter fortrinnsvis en lengde av optisk fiber og en polarisasjonsroterende reflektor. Lengden av optisk fiber er valgt for å tilveiebringe en optisk forsinkelsestid. Lyset forplanter seg gjennom den optiske fiberen fra den andre koplere til reflektoren. Reflektoren reflekterer lys inn i den optiske fiberen for å forplante seg gjennom den optiske fiberen til den andre

10 koplere. Reflektoren roterer videre lys som faller inn i den første polariseringen til den andre polariseringen og roterer lys som faller inn i den andre polariseringen til den første polariseringen. Reflektoren omfatter fortrinnsvis et Faradayspeil. Den polarisasjonsavhengige andre koplere omfatter også fortrinnsvis en polarisasjonsstrålesplitter anordnet slik at forsinkelseslinjen mottar lyset fra en port av

15 polarisasjonsstrålesplitteren og returnerer lys til porten av polarisasjonsstrålesplitteren.

Oppfinnelsen skal nå beskrives under henvisning til tegningene, der:

Figur 1 illustrerer et eksempel på et Sagnac interferometer som har en enkelt

20 avfølingsløyfe;

Figur 2 illustrerer en Sagnac sensorgruppe i samsvar med den foreliggende oppfinnelse hvor hvert trinn av en sensorgruppe danner et ytterligere Sagnac interferometer;

Figur 3 illustrerer en Sagnac sensorgruppe som innbefatter erbiumdopede

25 fiberforsterkere for å regenerere signaleffekt tapt på grunn av kobling og spredningstap eller liknende;

Figur 4 illustrerer en kurve over frekvensresponsen til et Sagnac interferometer i samsvar med den foreliggende oppfinnelse, sammenliknet med de tre dominerende havbunns støyer;

Figur 5 illustrerer kurver over det maksimale og minimale akustiske signalet som kan påvises av et Mach-Zehnder interferometer, og som påvises av et Sagnac interferometer i samsvar med den foreliggende oppfinnelsen, og viser det relativt konstante dynamiske området til et Sagnac interferometer over et bredt område av frekvenser;

Figur 6 illustrerer kurver over det minimalt påvisbare akustiske signalet som funksjon av frekvensen for tre Sagnac interferometer konfigurasjoner som har forskjellige fiberlengder i hydrofonen og forsinkelsessløyfen;

35

Figur 7 illustrerer et Sagnac interferometer i samsvar med den foreliggende oppfinnelsen som innbefatter en ytterligere forsinkelsessløyfe for å øke det dynamiske området til interferometeret;

Figur 8 illustrerer en kurve over det dynamiske området tilveiebrakt av interferometeret på figur 7;

Figur 9A illustrerer plasseringen av forsinkelsessløyfen til interferometeret i den tørre enden av et sensorgruppesystem;

Figur 9B illustrerer plasseringen av forsinkelsessløyfen til interferometeret i den våte enden av et sensorgruppesystem;

Figur 10 illustrerer Sagnac interferometeret på figur 9B med annotasjoner som viser lengdene som brukes i beregninger av virkningene av fasemodulasjon;

Figur 11 illustrerer en teknikk for å vikle forsinkelsessløyfen for å redusere virkningene av den akustiske bølgen på forsinkelsessløyfen;

Figur 12 illustrerer et Sagnac interferometer i samsvar med den foreliggende oppfinnelsen som innbefatter tomme trinn som påviser fordelt opphentet støy som kan subtraheres fra signalene generert av sensorene;

Figur 13 illustrerer et Sagnac interferometer i samsvar med den foreliggende oppfinnelsen som innbefatter en depolarisator for å redusere virkningene av polarisasjonsreduert fading;

Figur 14 illustrerer et Sagnac interferometer som anvender frekvensdivisjonmultipleksing;

Figur 15 illustrerer en kurve som viser genereringen av beatsignalene mellom det forsinkede modulasjonssignalet og de returnerende sensorsignalene i interferometeret på figur 14;

Figur 16 illustrerer et Sagnac interferometer som anvender kodedivisjonmultipleksing;

Figur 17 illustrerer arkitekturen til en foldet Sagnac akustisk fibersensorgruppe;

Figur 18 illustrerer en kurve over antall returnerte pulser pr. tidsintervall, og viser separeringen i tid av signalpulser og støypulser;

Figur 19 illustrerer en foldet, akustisk Sagnac fibersensorgruppe som har en andre forsinkelsessløyfe for å tilveiebringe utvidet dynamisk område;

Figur 20 illustrerer en foldet, akustisk Sagnac fibersensorgruppe som har en fasemodulator og nullstillingskretser i stedet for reflektoren på figur 17;

Figur 21 illustrerer en ytterligere alternativ utførelse av figur 19 der de to forsinkelsessløyfe er tilkoblet forskjellige porter av koplere;

Figur 22 illustrerer en alternativ utførelse av et fiberoptisk, akustisk sensorgruppesystem som anvender et Faradayspeil;

Figurene 23A, 23B og 23C illustrerer ytterligere alternative utførelser av en fiberoptisk, akustisk sensorgruppe som anvender en upolarisert lyskilde i kombinasjon med en depolarisator, en polarisasjonsstrålesplitter og et Faradayspeil;

Figur 24 illustrerer en alternativ utførelse av en foldet fiberoptisk, akustisk sensorgruppe som anvender en upolarisert lyskilde i kombinasjon med en optisk sirkulator, en 2x2 kopler, og en ikke-resiprok faseskifter;

Figur 25 illustrerer en alternativ utførelse av en foldet, fiberoptisk, akustisk sensorgruppe tilsvarende figur 24, der depolarisatoren befinner seg i den andre gruppeinnmatings/utmatingsfiberen;

Figur 26 illustrerer en første foretrukket utførelse av den ikke-resiproke $\pi/2$ -faseskifteren på figurene 24 og 25, og illustrerer effekten av polariseringen av lyset som forplanter seg i den første retning gjennom faseskifteren;

Figur 27 illustrerer virkningen på polariseringen av lyset som forplanter seg i en andre (motsatt) retning gjennom faseskifteren på figur 26;

Figur 28 illustrerer en alternativ foretrukket utførelse av den ikke-resiproke $\pi/2$ -faseskifteren på figur 24 og 25, og illustrerer virkningen på polarisasjonen av lyset som forplanter seg i en første retning gjennom faseskifteren;

Figur 29 illustrerer virkningen på polarisasjonen av lyset som forplanter seg i en andre (motsatt) retning gjennom faseskifteren på figur 28;

Figur 30 illustrerer en ytterligere alternativ utførelse av en foldet fiberoptisk, akustisk sensorgruppe, som anvender polarisert forspenning for multiple detektorer, der hver detektor har et forspenningspunkt som kan innstilles uavhengig av forspenningspunktene til de andre detektorene;

Figur 31 illustrerer en alternativ utførelse av en foldet fiberoptisk, akustisk sensorgruppe tilsvarende figur 30, hvori en depolarisator befinner seg i den andre gruppens innmatings/utmatingsfiber;

Figur 32 illustrerer en alternativ utførelse av en foldet fiberoptisk, akustisk sensorgruppe tilsvarende figur 30, hvor en optisk sirkulator erstatter 2x2-kopleren;

Figur 33 illustrerer en alternativ utførelse av en foldet fiberoptisk, akustisk sensorgruppe tilsvarende figur 32, hvor depolarisatoren befinner seg i den andre gruppens innmatings/utmatingsfiber;

Figur 34 illustrerer en ytterligere alternativ utførelse av en foldet Sagnac sensorgruppe, som innbefatter et kombinert innmatings-/utmatingsystem;

Figur 35 illustrerer en alternativ utførelse av en foldet, fiberoptisk, akustisk sensorgruppe tilsvarende figur 34 hvor depolarisatoren befinner seg i den andre gruppens innmatings/utmatingsfiber; og

Figur 36 illustrerer en ytterligere alternativ utførelse av en foldet, fiberoptisk, akustisk sensorgruppe tilsvarende figurene 34 og 35 hvor detektorene er koblet til innmatings-/utmatings subsystemet av optiske fibere for å tillate detektorene å være anordnet på avstand.

5

Den foreliggende oppfinnelsen er beskrevet i tilknytning til en gruppe av akustiske sensorer (for eksempel hydrofoner) i en Sagnacsløyfe. Før de foretrukne utførelsene skal beskrives, skal det gis en kort oppsummering av virkemåten til en enkelssløyfe akustisk Sagnacsensor.

10

Enkelssløyfe akustisk Sagnacsensor

En enkel Sagnacbasert akustisk sensor 100 er vist i figur 1. Sagnacsløyfen er delt i to deler eller partier, en forsinkelsessløyfe 102 og en hydrofon 104.

Forsinkelsessløyfen 102 er ganske enkelt en stor fiberlengde, typisk lenger enn 1 kilometer. Hydrofonen 104 er en del av en fiber hvori en akustisk bølge blir omformet i en fasemodulasjon av et optisk signal som forplanter seg gjennom fiberen. En høy reaksjon på akustiske bølger blir typisk oppnådd ved å velge optimaliserte belegg i seksjonen av fiberen i hydrofonen 104, og vikling av fiberen rundt en dor av egnet sammensetning. (Se for eksempel J. A. Bucaro et al., *Optical fibre sensor coating*, Optical Fiber Sensors, Proceedings of the NATO Advanced Study Institute, 1986, s. 321-338). Fiberlengden viklet rundt hydrofonen 104 er typisk 10 meter til 100 meter. Lys fra en kilde 110, slik som for eksempel en superfluorescerende fiberkilde (SFS), blir delt i stråler med klokken (CW) og mot klokken (CCW) av en 3x3-kopler 112. Virkemåten til 3x3-kopleren 112 er velkjent og er beskrevet i for eksempel Sang K. Sheem, *Fiber-optic gyroscope with [3x3] directional coupler*, Applied Physics Letters, bind 37, nr. 10, 15. november 1980, s. 869-871.

Selv om det her er beskrevet brukt en 3x3-kopler 112, kan andre koplere (for eksempel en 2x2-kopler, en 4x4-kopler, etc.) brukes med alternative utførelser av den foreliggende oppfinnelse. For å bruke en 2x2-kopler, blir for eksempel begge portene av en side brukt til å danne Sagnac interferometeret. En port på den andre siden er en detekteringsport. Den gjenværende porten blir brukt til å sende lys inn i gruppen og kan også brukes som en påvisningsport dersom en kopler eller sirkulator blir brukt (på en tilsvarende måte som gjøres med fiberoptiske gyroskop). Generelt kan en hvilken som helst (n x m)-kopler brukes ved å anvende to porter på en side av kopleren for å danne Sagnac interferometeret, og bruke portene på den andre siden av kopleren som detekteringsporter, utsendelsesporter eller begge deler.

35

Etter deling forplanter CW-strålen seg først gjennom forsinkelsessløyfen 102, og deretter gjennom hydrofonden 104, mens CCW-strålen forplanter seg først gjennom hydrofonden 104, og deretter gjennom forsinkelsessløyfen 102. Under en tidsforsinkelse T_{delay} mellom et tidspunkt når CW-strålen forplanter seg gjennom hydrofonden 104 og et tidspunkt når CCW-strålen forplanter seg gjennom hydrofonden 104, endrer det akustiske signalet og likeledes den akustiske induerte fasemodulasjonen i hydrofonden 104 seg. Denne endringen i fasemodulasjon blir kartlagt i en faseforskjell mellom de motforplantende strålene, som blir omformet til en intensitetsmodulasjon når strålene recombines i 3x3-kopleren 112. Denne intensitetsmodulasjonen blir så påvist av en førstedetektor 120 og en andre detektor 122 eller av bare en av de to detektorene.

Mer eksplisitt, dersom et akustisk signal induerer en fasemodulasjon $\phi_h \cos(\Omega t)$ i hydrofonfibren 104, er den resulterende fasemodulasjonen mellom de interfererende strålene i hydrofonden 104, $\phi_{\text{int}}(t)$, gitt av:

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

der T_{delay} er forplantningstiden gjennom forsinkelsessløyfen. $\phi_{\text{int}}(t)$ er således en funksjon av hydrofonmodulasjonen ϕ_h og produktet av den akustiske modulasjonsfrekvensen, Ω , med sløyfeforsinkelsen T_{delay} . Dette skiller seg fra en Mach-Zehnder interferometrisk sensor hvor $\phi_{\text{int}}(t)$ er en funksjon av bare hydrofonmodulasjonen ϕ_h . Maksimal sensitivitet oppnås i den akustiske Sagnac-sløyfesensoren når produktet av den akustiske frekvensen, Ω , og tidsforsinkelsen, T_{delay} , er et odd multiplum av π (maksimalverdi av det første sinusuttrykket i likning 1). Den akustiske frekvensen som utgjør dette produktet π blir kalt den riktige frekvensen for sløyfen, som er den laveste frekvensen hvorved maksimal sensitivitet oppnås. De fleste undervannsavfølingsapplikasjoner gjelder påvisningen av akustiske frekvenser under 10 kHz. For at den riktige sløyfefrekvensen skal mindre enn 10 kHz er det nødvendig med en forsinkelsestid på minst 50 mikrosekunder og derved en forsinkelsessløyfelengde på minst 10 km. Den akustiske Sagnac-sensoren 100 krever derfor stor fibermengde for påvisningen av lave akustiske frekvenser (<10 kHz).

Felleslinjen eller banedesignen som er iboende i Sagnac interferometeret har mange fordeler sammenliknet med et Mach-Zehnder interferometer i tillegg til det stabile forspenningspunktet og eliminering av fasestøy, som allerede er nevnt. Et Sagnac interferometer tillater bruk av en kort koherenslengde, bredbåndskilde, slik som

en superfluorescerende fiberstruktur (SFS), et eksempel på en forsterket spontan emisjonskilde (ASE). Slike kilder er rimelige og kan lett bli høy effekt. Det er vist at bruken av 3x3-kopleren forspenner passivt til den akustiske Sagnac sensoren nær kvadraturen. (Se Sang K. Sheem, *Fiber-optic gyroscope with [3x3] directional coupler*, Applied Physics Letters, bind 37, nr. 10, 15. november 1980, s. 869-871; og H. Poisel et al., *Low-cost fibre-optic gyroscope*, Electronics Letters, bind 26, nr. 1, 4. januar 1990, s. 69-70). Ved å subtrahere signalene fra de to detekteringsportene til 3x3-kopleren, kan kildeoverskuddsstøy, som er den begrensende støykilden til SFS-kilder, subtraheres, mens fasemodulasjon induisert intensitetsvariasjoner pga. hydrofonen blir tilføyd. Dette muliggjør at et Sagnac interferometer kan nærme seg nær skuddstøybegrenset ytelse. (Se Kjell Kråkenes et al., *Sagnac interferometer for underwater sound detection; noise properties*, OPTICS LETTERS, bind 14, nr. 20, 15. oktober 1989, s. 1152-1145).

Tidligere arbeid på Sagnac-baserte akustiske sensorer har vært begrenset til en enkelt sensorkonfigurasjon. Pga. de iboende fordelene til Sagnac interferometeret, har søkerne fastslått at det er ønskelig å erstatte Mach-Zehnder interferometriske sensorer i en storskalagruppe med Sagnac-baserte sensorer. Hver Sagnac-sensor 100 beskrevet ovenfor krever mange kilometer fiber, hvilket gjør innføringen av mange slike sensorer i en storskalagruppe upraktisk. Forskning og bruk av resirkulerende forsinkelsessløyfer for å redusere fiberlengdekravet har frembrakt sensorer som benytter betydelig mindre fiber, men lider av høy støy pga. innlemmelsen av EDFA i resirkuleringsløyfen. (Se for eksempel J. T. Kringelbotn et al., *Sagnac Interferometer Including A Recirculating Ring With An Erbium-doped Fibre Amplifier*, OFS '92 Conference Proceedings, s. 6-9). En ny fremgangsmåte for å minske fiberkravet er beskrevet nedenfor.

25 Ny sensorgruppe basert på Sagnac interferometeret

Som angitt nedenfor, har søkerne oppdaget et nytt system som reduserer fibermengden som er nødvendig for en Sagnac-basert storskalagruppe ved å multiplekse multiple sensorer på den samme forsinkelsessløyfen, og frembrakt en praktisk Sagnac-sensorgruppe (SSA). Som illustrert i figur 2 innbefatter en Sagnac sensorgruppe 200 i samsvar med den foreliggende oppfinnelse en gruppe 210 av hydrofoner 212(i) en stigeikonfigurasjon som er festet til en enkelt forsinkelsessløyfe 214. For eksempel viser figur 2 en Sagnac-sensorgruppe 210 som har N hydrofoner 212(1), 212(2)...212(N) i respektive trinn 216(1), 216(2)...216(N). Hvert trinn 216(i) i Sagnac-sensorgruppen 210 omfatter en enkelt fiber viklet rundt en respektiv hydrofon 212(i). Hver linje fra en 3x3-kopler 220 gjennom forsinkelsessløyfen 214 og gruppen 210 og tilbake til kopleren 220 omfatter et separat Sagnac interferometer. For en gruppe med N sensorer 212 er det derfor N separate Sagnac interferometere, som hvert oppfører seg slik som enkeltsløyfe-

Sagnac-sensoren 100, vist i figur 1. Hvert Sagnac interferometer måler det akustiske signalet i et separat punkt i rommet, dvs. stedet til hydrofonen 212(i). For eksempel måler Sagnac interferometeret, omfattende forsinkelsessløyfen 214 og trinnet 216(1) det akustiske signalet ved hydrofonen 212(1). I tillegg henter hvert Sagnac interferometer
 5 også opp akustiske signaler (for eksempel støy) andre steder i sløyfen, hvilken støy med fordel reduseres, hvilket skal beskrives nedenfor.

Sagnac sensorgruppen 200 forstås lettest i en tidsdivisjon multiplekset (TDM) konfigurasjon (ikke -TDM konfigurasjoner er beskrevet senere). En kilde 222 (som med fordel kan omfatte en konvensjonell pulset kilde eller kan omfatte en CX-kilde med en
 10 ekstern modulator) genererer en lyspuls som entrer Sagnac-sløyfen via en tredje port på koplere 220 og forplanter seg i både CW- og CCW-retningene som indikert på figur 2. Når den når gruppen 210, blir CCW-pulsen splittet i tog av N separate pulser. Ved dette punktet har CW-innmatingspulsene ikke ennå nådd gruppen 210 og er fremdeles en enkelt puls. Når CW-pulsen når gruppen 210, blir den også splittet i et tog av N pulser.
 15 Hver puls i CW-toget returnerer til 3x3-koplere 220 etter å ha forplantet seg gjennom et respektivt trinn 216(i) og interfererer med pulsen i CCW-toget som har forplantet seg i det samme trinnet 216(i) i den motsatte retningen. N pulser blir således påvist av den første detektoren 230 og en andre detektor 232, og hver puls omfatter CW- og CCW-pulsene til en av de N Sagnac-sløyfene (dvs. de pulsene som har forplantet seg i
 20 motsatte retninger gjennom det samme respektive trinnet (216(i))). Siden pulsene som forplanter seg gjennom forskjellige kombinasjoner av trinn, ikke forplanter seg identiske, optiske linjer eller baner, faller ikke slike pulser sammen i tid i koplere 220, og de interfererer derfor ikke med hverandre i koplere 220. Pulsbreddene må være mindre enn forsinkelsesforskjellen mellom tilstøtende sensorer, slik at pulsene fra
 25 tilstøtende sensorer ikke overlapper hverandre.

Som illustrert i figur 3, er med fordel erbiumdopede fiberforsterkere (EDFA) 240 med liten forsterkning tilføyd gruppepartiet 210, slik som EDFA tilføyd Mach-Zehnder interferometriske sensorgrupper. (Se for eksempel Craig W. Hodgson et al.,
 30 *Optimization of Large-Scale Fiber Sensor Arrays Incorporating Multiple Optical Amplifiers-Part I: Signal-to-Noise Ratio*, JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, bind 16, nr. 2, februar 1998, s. 218-223; Craig W. Hodgson et al., *Optimization of Large-Scale Fiber Sensor Arrays Incorporating Multiple Optical Amplifiers-Part II: Pump Power*, JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, bind 16, nr. 2, februar 1998, s. 224-231; Jefferson L. Wagener et al., *Novel Fiber Sensor Arrays Using Erbium-Doped Fiber Amplifiers*, JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, bind 15, nr. 9, september 1997, s. 1681-1688; og C. W. Hodgson et al., *Large-scale interferometric fiber sensor arrays with multiple optical amplifiers*,

OPTICS LETTERS, bind 22, nr. 21, 21. November 1997, s. 1651-1653). EDFA 240 øker antallet sensorer som kan støttes av en enkelt gruppe 210 ved å regenerere signalstyrken som tapes pga. kobling og spredningstap. EDFA blir med fordel pumpet av en eller flere pumpelaserkilder 242 via en splitter-kopler 244, og via en første

5 bølgelengdedivisjonmultipleksingskopler 246(WDM) og en andre WDM-kopler 248.

Siden den benytter Sagnac arkitekturen, har Sagnac sensorgruppen 200 alle fordelene til den enkeltsløyfe Sagnac-baserte sensoren 100 beskrevet ovenfor. Den felles bane eller linjedesign eliminerer omformingen av kildefasestøy til intensitetsstøy i interferenskopleren 220. Kilden 222 kan være en fiber ASE (forsterket spontan emisjon)

10 kilde (dvs. SFS beskrevet ovenfor), som tilveiebringer høy effekt på rimelig måte ved 1,55 μm . Passiv forspenning nær kvadratur kan oppnås for alle sensorene ved å benytte 3x3-kopleren 220. 3x3-kopleren 220 tilveiebringer også en hensiktsmessig innretning for å påvise to interferometriske utgangssignaler på detektorene 230, 232, og bruke utgangssignalene til de to detektorene til å subtrahere kildeoverskuddsstøy. (Se for

15 eksempel K. Kråkenes et al., *Sagnac interferometer for underwater sound detection; noise properties*, OPTICS LETTER, bind 14, nr. 20, 15. oktober 1989, s. 1152-1154, som viser bruken av to detektoren i kombinasjon med et enkelt Sagnac interferometer).

Egenskapene til denne nye Sagnac sensorgruppen 200 skal beskrives mer spesielt nedenfor fulgt av en mer detaljert beskrivelse av frekvensresponsen og

20 dynamisk område som er resultatet av bruk av et Sagnac interferometer. Deretter vil det bli beskrevet en beregning av størrelsen til den fordelte opphenting fra ikke-hydrofonfibersløyfeselementene, sammen med en teknikk for å redusere denne opphenningsstørrelsen. Polarisering vil også bli adressert nedenfor. Nye støykilder som introduseres ved Sagnac-designen blir så beskrevet. Til slutt presenteres andre

25 multipleksingsfremgangsmåter enn TDM for Sagnac sensorgruppen.

Selv om oppfinnelsen er beskrevet ovenfor med hensyn til en enkelt sensor i hvert trinn 216(i) av gruppen 210, må det forstås at hvert trinn 216(i) med fordel kan omfatte en subgruppe som har multiple sensorer, slik som er beskrevet for eksempel i den godtatte U.S. patentsøknad nr. 08/814 548, inngitt 11. mars 1997, som er innlemmet

30 som referanse her. (Se også C. W. Hodgson et al., *Large-Scale interferometric fiber sensor arrays with multiple optical amplifiers*, Optics Letters, bind 22, 1997, s. 1651-1653; J. L. Wagener et al., *Novel Fiber Sensor Arrays Using Erbium-Doped Fiber Amplifiers*, Journal of Lightwave Technology, bind 15, 1997, s. 1681-1688; C. W. Hodgson et al., *Optimization of large-scale fiber sensor arrays incorporating multiple*

35 *optical amplifiers, Part II: pump power*, Journal of Lightwave Technology, bind 16, 1998, s. 224-231).

Frekvensrespons

Som angitt ovenfor har Sagnac sensoren en frekvensavhengig respons gitt av likning 1. Ved frekvenser godt under den riktige frekvensen til sløyfen, definert som $1/(2 \cdot T_{\text{delay}})$, skaleres det minimale påvisbare akustiske signal med den inverse verdien av den akustiske frekvensen. Denne minskede akustiske sensitiviteten ved lave frekvenser har vært en hovedbekymring for den akustiske Sagnac sensoren. Det har imidlertid vært påpekt at denne minskede sensitiviteten ved lave frekvenser, med fordel tilpasses ved et økende havstøygulv (Se for eksempel Sverre Knudsen, *Ambient and Optical Noise in Fiber-Optic Interferometric Acoustic Sensors*, Fiber-Optic Sensors Based on the

10 Michelson and Sagnac Interferometers: Responsivity and Noise Properties, Thesis, kapittel 3, Norwegian University of Science and Technology, 1996, s. 37-40). Ideelt ville det være ønskelig dersom det minimale påvisbare akustiske signalet til en gruppe ved en gitt frekvens var konstant under havstøygulvet ved denne frekvensen. Det minimale påvisbare akustiske signalet ville således også øke ved lavere frekvenser for å tilpasse seg det økende havstøygulvet. Frekvensresponsen til Sagnac sensorgruppen 200 i henhold til den foreliggende oppfinnelsen tilveiebringer i virkeligheten en god tilpasning mellom havstøygulvet og den akustiske sensitiviteten. Dette er illustrert i figur 4 hvor det minimale påvisbare akustiske signal for en Sagnac sensorgruppe er opptegnet som en kurve 250 under antakelsen av et optisk støygulv på $10 \mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$, en hydrofonfaseresponsivitet på $3,2 \times 10^{-7} \text{ rad}/\mu\text{Pa}$ og en forsinkelsessløyfelengde på 20 km. (Den vertikale akse er i dB relativt til en grunnlinje på $1 \mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$). I figur 4 er det også opptegnet havstøygulv for de tre dominerende havstøykildene ved disse frekvensene og en resulterende sum av støyen fra de tre kildene. En kurve 252 representerer støyen fra havturbulens, jordskjelv, vulkanske utbrudd og liknende. En kurve 253 representerer lett skipsstøy. En kurve 254 representerer DSSO støy (fjerne skip og stormer). En kurve 256 representerer summen av støygulvene fra de tre dominante kildene (dvs. summen av kurvene 252, 253 og 254). (Se for eksempel Robert J. Urick, *The noise background of the sea: ambient noise level*, Principles of Underwater Sound, 3. utg. kap. 7, McGraw-Hill, 1983, s. 202-236). Det minimale påvisbare akustiske signalet til Sagnac sensorgruppen 200 øker på en slik måte at det tilveiebringes en nærmest konstant mengde av påvisbart signal under havstøygulvet ved alle frekvenser under 10 kHz. Den frekvensavhengige responsen til Sagnac sensorgruppen 200 forhindrer således ikke lavfrekvens akustisk påvisning. Mach-Zehnder gruppe viser den samme tendensen som Sagnac sensorgruppen, nemlig en avtakende sensitivitet mot lavere frekvenser, men i Mach-Zehnder gruppen er det den avtakende sensitiviteten mindre enn i den Sagnac-baserte sensor.

Selv om både Mach-Zehnder interferometeret og Sagnac sensorgruppen 200 har tilsvarende frekvensavhengige responser, er kilden for deres frekvensresponser fundamentalt forskjellige. Det økende minimale påvisbare signalet i Mach-Zehnder interferometriske sensorgruppe skyldes et økende optisk støygulv. Årsaken til dette økende, optiske støygulvet er fasestøyen innført ved det linjeubalanserte Mach-Zehnder interferometeret. Selv om støygulvet er $10 \mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ ved 10 kHz vil det således øke mot lavere frekvenser. I Sagnac sensorgruppen 200 skyldes det økende minimalt påvisbare akustiske signalet $\sin(\Omega T_{\text{delay}}/2)$ uttrykt i likning 1, og ikke en økning av det optiske støygulvet. Det optiske støygulvet forblir konstant $10 \mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ over hele frekvensområdet.

Tydeligheten av denne forskjellen sees ved å undersøke det dynamiske området til Mach-Zehnder interferometriske sensorgruppe og Sagnac sensorgruppe 200, illustrert i figur 5. Det dynamiske området til en sensor er begrenset av den minimale og maksimale påvisbare faseforskyvning. For interferometriske sensorer er den maksimale påvisbare faseforskyvningen begrenset av den ikke-lineære responsen til interferometeret og den minimale påvisbare faseforskyvning av det optiske støygulvet. Både den Mach-Zehnder interferometriske sensorgruppen og Sagnac sensorgruppen har maksimale påvisbare faseforskyvninger som er konstante over det akustiske frekvensområdet. Sagnac sensorgruppen 200 har imidlertid også en flat minimal påvisbar faseforskyvning siden den har et flatt optisk støygulv, mens den Mach-Zehnder interferometriske sensorgruppen lider av en økende minimal påvisbar faseforskyvning pga. av et økende optisk støygulv forårsaket av fasestøyen innført av det linjeubalanserte interferometeret. Sagnac sensorgruppen 200 har således et konstant dynamisk område ved alle akustiske frekvenser, mens den interferometriske Mach-Zehnder sensorgruppen har et økende dynamisk område ved lave akustiske frekvenser. Dette er illustrert i figur 5 hvor det minimale og maksimale påvisbare akustiske signal (i dB tilfeldige enheter) er opptegnet for Sagnac sensorgruppen 200 og en Mach-Zehnder interferometriske sensorgruppe. Som vist i figur 5, har begge grupper et omtrent 100 dB dynamisk område over 1 kHz, hvor fasestøy ikke begrenser den interferometriske Mach-Zehnder sensorgruppe. Ved 10 Hz dominerer fasestøy den interferometriske Mach-Zehnder sensorgruppen, og dens dynamiske områder reduseres til omtrent 74 dB. Samtidig forblir det dynamiske området til Sagnac sensorgruppen 200 ved omtrent 100 dB.

Det er interessant å undersøke frekvensresponsen til Sagnac sensorgruppen 200 ved frekvenser godt under den riktige sløyfefrekvensen som en funksjon av forsinkelsessløyfelenngden og hydrofonens responsegenskaper. Ved disse frekvensene kan $\sin(\Omega T_{\text{delay}}/2)$ faktoren i likning 1 approksimeres som $\Omega T_{\text{delay}}/2$, og viser at

responseegenskapene til Sagnac sensorgruppen 200 er proporsjonal med produktet av ϕ_h og T_{delay} . Selve ϕ_h er proporsjonal med mengden fiber i hver hydrofon 212(i), og T_{delay} er proporsjonal med mengden fiber i forsinkelsessløyfen 214. Responseegenskapene ved frekvenser godt under sløyfens riktige frekvens er således proporsjonal med produktet av hydrofonfiberlengden og forsinkelsesfiberlengden. Figur 6 viser det minimalt påvisbare akustiske signalet for flere Sagnac sensorgruppekonfigurasjoner, hvor produktet av lengden til fiberen i hver hydrofon 212(i) og fiberens lengde i forsinkelsessløyfen 214 er konstant, men den relative fordelingen av fiber mellom forsinkelsessløyfen 214 og hver hydrofon 212(i) endrer seg. For eksempel representerer en kurve 260 frekvensresponsen til en Sagnac sensorgruppe 200 som har 45 km fiber i dens forsinkelsessløyfen 214 og 100 meter fiber i hver hydrofon 212(i); en kurve 262 representerer frekvensresponsen til en Sagnac sensorgruppe 200 som har 30 km i dens forsinkelsessløyfen 214 og 150 meter fiber i hver hydrofon 212(i); og en kurve 264 representerer frekvensresponsen til en Sagnac sensorgruppe 200 som har 15 km fiber i dens forsinkelsessløyfen 214 og 300 meter fiber i hver hydrofon 212(i). Som illustrert har vær Sagnac sensorgruppe 200 den samme sensitiviteten ved lave frekvenser, men nærmer seg en maksimal sensitivitet ved forskjellige frekvenser gitt ved deres respektive riktige sløyfefrekvenser. For et gitt minimalt påvisbart, akustisk signal ved lave frekvenser, er det således fremdeles en viss frihetsgrad ved valg av fiberlengdene til forsinkelsessløyfen 214 og hydrofonene 212(i). Denne frihetsgraden kan anvendes til hjelpe Sagnac sensorgruppen 200 til å tilfredsstille andre kriterier, slik som minimalisering av den totale mengde fiber som er nødvendig, eller å minimalisere forsinkelsessløyfelengden.

25 Økning av det dynamiske område til Sagnac sensorgruppen

Som beskrevet ovenfor har Sagnac sensorgruppen 200 et større dynamisk område ved lave akustiske frekvenser enn den Mach-Zehnder interferometriske sensorgruppen siden den er immun overfor fasestøy. Ideelt tilveiebringer en gruppe 200 et tilstrekkelig dynamisk område til å påvise det sterkeste og svakeste akustiske signal som kan forventes. Dette kravet oversettes ofte til et nødvendig dynamisk område på omtrent 150 dB. For å oppnå et slikt stort, dynamisk område i en Mach-Zehnder interferometrisk sensorgruppe er det nødvendig med to separate sensorer med forskjellige faseresponser, der hver påviser en fraksjon av det totale 150 dB dynamiske området. Den åpenbare ulempen med dette oppsettet er at det krever to sensorgrupper (dvs. dobbelt så mange hydrofoner, trinn, kilder og detektorer). En gruppe som kan støtte N hydrofoner kan effektivt påvise det akustiske signal ved bare N/2 punkter.

I Sagnac sensorgruppen 200 er det mulig å oppnå et stort dynamisk område uten å bruke ytterligere hydrofoner 212. Siden faseresponseegenskapene i Sagnac sensorgruppen er en funksjon av hydrofonresponseegenskapene og forsinkelsessløyfelengden, som vist i likning 1, kan faseresponseegenskapene til hele hydrofongruppen endres ved å modifisere forsinkelsessløyfelengden. Ved samtidig å bruke to separate forsinkelsessløyfer 214(1) og 214(2) med lengde henholdsvis L_1 og L_2 som vist i en modifisert sensorgruppe 266 i figur 7, kan detekteringsområdet til gruppen 266 økes dramatisk. Gruppen 266 har nå 2N separate Sagnac-sløyfer. Hver hydrofon 212(i) returnerer et separat signal for hver av de to forsinkelsessløyfelinjene, og lengden til hver forsinkelsessløyfe 214(1), 214(2) bestemmer det akustiske påvisningsområdet til dette signalet. Det totale akustiske påvisningsområdet til hver hydrofon 212(i) er samlingen av påvisningsområdene til hver av de Sagnac sløyfesensorene som innelukker hydrofon 212(i). Lengdene av L_1 og L_2 innstiller det akustiske påvisningsområdet. Lengden L_1 og L_2 er valgt slik at gruppen 266 kan påvise det minste akustiske signalet av interesse. Lengden L_1 til forsinkelsessløyfen 214(i) blir så valgt til å plassere påvisningsområdet til signalene som forplanter seg bare i denne kortere forsinkelsessløyfen på toppen av påvisningsområdet av signalene som forplanter seg i begge forsinkelsessløyferne 214(1), 214(2). I et TDM-system vil som et resultat av innføringen av en andre sløyfe repetisjonsfrekvensen til kildepulsene være halvert for å tillate returtid for 2N pulser, og lengdene til forsinkelsessløyferne 214(1), 214(2) er valgt slik at det ikke er noen pulsoverlapping. Siden repetisjonsfrekvensen er halvert, avtar det dynamiske området til hvert individuelt signal med 3 dB. Denne reduksjonen er mer enn forskjøvet av økningen av det totale, dynamiske område som oppnås ved å transportere det dynamiske området til to separate signaler. I figur 7 blir den andre forsinkelsessløyfen 214(2) anordnet slik at alt lys som passerer gjennom den andre forsinkelsessløyfen 214(2) passerer gjennom den første forsinkelsessløyfen 212(1). Det må få forstås at alternativt kan de to forsinkelsessløyferne 214(1), 214(2) være optisk parallelle slik at lyset som passerer gjennom den andre forsinkelsessløyfen 214(2) ikke passerer gjennom den første forsinkelsessløyfen 214(1). I et slikt tilfelle må fiberlengden til den andre forsinkelsessløyfen 214(2) være summen av den første lengden og den andre lengden (dvs. L_1 og L_2). Men siden L_1 er vesentlig kortere enn L_2 , er denne justeringen ikke essensiell. Utførelsen i figur 7 reduserer de totale fiberkravene ved å tilføye lengden av den første forsinkelsessløyfen til den andre forsinkelsessløyfen.

Figur 8 illustrerer det utvidete, dynamiske området som er gjort mulig ved å anvende de to forsinkelsessløyferne 214(1), 214(2) i gruppen 266 hvori det dynamiske området til hvert signal er 100 dB og forholdet L_1/L_2 var innstilt til å være 5000. Som

vist er gruppen 266 nå i stand til å påvise over hele det dynamiske området av interesse (omtrent et 160-dB område) uten å øke hydrofonantallet.

Fordelt avføling

5 I Sagnac sensorgruppen 266 kan enhver fasemodulasjon i interferometeret overføres til en intensitetsmodulasjon i den interfererende 3x3-kopleren 220. Den fordelte avfølingen over hele Sagnac-sløyfen er ufordelaktig for en akustisk sensorgruppe. For å kunne være praktisk bør den akustiske sensorgruppen sample det akustiske signalet i et antall diskrete punkter i rommet (dvs. ved hydrofonene) og
10 returnere disse signalene uavhengig. Mach-Zehnder interferometriske sensorgrupper oppnår dette siden interferometeret er avgrenset innenfor et lite rom, og således bare avføler ved dette punktet. For at Sagnac sensorgruppen 266 skal være praktisk, må den fordelte avfølingen til Sagnac-sløyfen reduseres.

Fibermassen i interferometeret utgjør forsinkelsessløyfen 214, som kan befinne
15 seg i to posisjoner. Den første er med kilden 222 og påvisningselektronikken (dvs. detektoren 230 og detektoren 232) i den tørre enden (dvs. ut av vannet), som vist i figur 9A. Her kan forsinkelsessløyfen 214 være miljømessig skjermet for å minimalisere enhver ekstern modulasjon. Nedføringsfibren 270, 272 som forbinder den våte ende til gruppepartiet 210 er imidlertid en del av interferometeret. Den andre muligheten er å
20 anordne forsinkelsessløyfen 214 i den våte enden (dvs. i vannet) ved gruppen 210 som vist i figur 9B. Som sådan kan forsinkelsessløyfen 214 ikke være isolert til i samme utstrekning som om den befant seg i den tørre enden, men nedføringsfibrene 270, 272, 274 ligger utenfor interferometeret og er således ikke-avfølende. Den relative størrelsen av nedføringen og forsinkelsessløyfefordelt opphenting bestemmer hvilken
25 konfigurasjon som er best egnet for en bestemt applikasjon. Det bør bemerkes at dersom forsinkelsessløyfen 214 befinner seg i den tørre enden (figur 9A), må nedføringsfibrene 270, 272 forbli stasjonære for å forhindre fysisk bevegelse, slik som bøyning og vibrasjoner av disse fibrene, hvilket kan indusere ekstremt store fasemodulasjoner. Disse er fiberbevegelse induserte fasemodulasjoner i motsetning til akustisk induserte
30 fasemodulasjoner. (Slike fysiske bevegelser er problemer ved tauete grupper, men behøver ikke å være betydelige problemer i stasjonære grupper). Dersom forsinkelsessløyfen 214 befinner seg i den tørre enden (figur 9A), må således hele den våte enden av Sagnac sensorgruppen 210 være stasjonær. Ved forsinkelsessløyfen 214 anordnet i den våte enden (figur 9B) må imidlertid bare delen til høyre av 3x3-kopleren
35 220 i figur 9 forbli stasjonær siden nedføringsfibrene 270, 272, 274 ikke da er del av interferometeret. Når forsinkelsessløyfen 214 befinner seg i den våte enden (figur 9B), må forsinkelsessløyfen være gjort mindre følsom. Forsinkelsessløyfen 214 kan utføres

tilfredsstillende ved å vikle forsinkelsessløyfefibrene rundt en sylinder (ikke vist) som er gjort mindre følsom, og derved eliminerer fiberbevegelse, og foreta akustisk opphenting av den dominerende kilden av fordelt opphentingssignal. Siden det er lettere å gjøre fiberen mindre sensitiv for akustisk induisert fasemodulasjon enn det er å gjøre fiberen mindre følsom for bevegelsesindusert fasemodulasjon, foretrekkes konfigurasjonen hvor forsinkelsessløyfen 214 er anordnet i den våte enden (figur 9B) for tauete gruppeapplikasjoner, og dette skal beskrives mer detaljert i det etterfølgende.

Beregning av den akustiske opphentingstøyen induisert i forsinkelsessløyfen

I denne seksjonen blir det avledet estimater for størrelsen til den akustisk induerte fordelte opphentingstøyen, sammenliknet med den akustisk induerte hydrofonfasemodulasjonen i Sagnac sensorgruppen 210 i figur 9B. Intensitetsmodulasjonen pga. de fordelte fasemodulasjonene som er resultatet av opphenting av akustiske signaler i forsinkelsessløyfen og bussfiberen (fiberen som forbinder hver hydrofon med forsinkelsessløyfen og 3x3-kopleren), kan ansees å være en støykilde. For den påfølgende beskrivelsen, anta at en sløyfe av Sagnac sensorgruppen bare omfatter forsinkelsesfiber med lengde L_d , en bussfiber med lengde L_b , en hydrofonfiberlengde L_h og en total lengde L , som vist i figur 10. Anta også at L_d er mye større enn L_b og L_h . Faseresponseegenskapene for fiber til akustiske signaler er resultatet av en trykkavhengig forplantningskonstant, β . Generelt kan den trykkavhengige komponenten til forplantningskonstanten i en posisjon l og tid t skrives som:

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

der β_0 er nulltrykk forplantningskonstant, $R(l)$ er den normaliserte faseresponseegenskap til fiberen, $P(l,t)$ er trykket som en funksjon av rom og tid. Dersom det antas et sinusformet akustisk signal med frekvensen ζ kan likning 2 gjenskrives som:

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

der P_0 er fasttilstandstrykket, P_m er amplituden til trykkmodulasjonen (anta at den er uavhengig av l), og $v(l)$ inneholder den rommelige fasevariasjonen til den akustiske bølge. Generelt er den induerte faseforskjellen mellom differerende stråler i en Sagnac-sløyfe pga. akustisk induert fasemodulasjon fra $l=l_1$ til $l=l_2$ gitt ved integralet:

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

der v er lysets hastighet i fiberen, og L er sløyfelengden. Ved å sette likning 3 inn i likning 4 oppnås:

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

Likning 5 kan anvendes for bestemmelse av faseforskjellen mellom interfererende stråler som skyldes akustisk modulasjon av hydrofonen, buss og forsinkelsesfibere.

For hydrofonfiberen blir likning 5 integrert fra $l_1 = l_d + l_b/2$ til $l_2 = l_d + l_b/2 + l_h$. Det antas at $v(l)$ er konstant over dette området (dvs. at den akustiske bølgelengden er mye større enn dimensjonen til hydrofonen). Det kan også antas at den normaliserte faseresponsen til fiberen, $R(l)$, er konstant og er lik R_h i dette området. Likning 5 gir da en faseforskjellsamplitude mellom de interfererende strålene pga. hydrofonfibermodulasjon:

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

der det er antatt at $cL_h/2v \ll 1$. Bemerk at likning 2 stemmer med uttrykket i likning 1.

For fiberbussen blir likning 5 integrert først fra $l_1 = l_d$ til $l_2 = l_d + l_b/2$, og så fra $l_1 = L - l_b/2$ til $l_2 = L$ for å innbefatte både den øvre og nedre busslinjen. Igjen blir det antatt at $R(l)$ er konstant og lik R_b for hele bussfiberen, slik at $v(l)$ er konstant i integralet til likning 5. Faseforskjellsamplituden mellom de interfererende strålene pga. fibermodulasjon blir:

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

der det er antatt at $cL_b/2v \ll 1$. Det skal fremheves at antakelsene vedrørende konstant $v(l)$ og amplituden til $cL_b/2v$ virker slik at ϕ_{int}^b øker, og dette gir således det verste tilfelle scenarioet for bussfiberen.

For forsinkelsesfiberen blir likning 5 integrert fra $l_1 = 0$ til $l_2 = l_d$, og som tidligere blir det antatt $v(l)$ er konstant over dette området, (dvs. at forsinkesssløyfespolen er mye mindre enn den akustiske bølgelengden), og at $R(l)$ er konstant og lik R_d over integralet. Likning 5 gir så en faseforskjellsamplitude mellom de interfererende strålene som skyldes forsinkelsesfibermodulasjonen gitt ved:

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

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

Med likningene 6-8 kan den relative størrelsen til disse fasemodulasjonsamplitudene beregnes. Først er det å merke seg at en standard, plastbelagt fiber har en normalisert faseresponsivitet, R på -328 dB re 1/ μ Pa, som beskrevet for eksempel i J. A. Bucaro et al., *Optical fibre sensor coating*, Optical Fiber Sensors, Proceedings of the NATO Advanced Study Institute, 1986, s. 321-338. På den annen side, som beskrevet for eksempel i C. C. Wang et al., *Very high responsivity fiber optic hydrophones for commercial applications*, Proceedings of the SPIE-The International Society for Optical Engineering, bind 2360, 1994, s. 360-363, har en fiber viklet rundt dagens hydrofoner laget av utluftede dorer en normalisert fasesensitivitet på -298 dB re 1/ μ Pa, en økning på 30 dB i forhold til standardfiberen. Dersom det antas at forsinkelsessløyfen og bussfiberen har den normaliserte faseresponsiviteten til standard, plastbelagt fiber, og hydrofonfiberen er viklet rundt en utluftet dor, så er forholdet mellom R_h til R_b eller R_d omtrent 30 dB. Under den forenklete antakelsen utført for å nå likningene 6-8 kan det derfor finnes at:

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

20

og

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

25

Forholdet L_b/L_h er en funksjon av hydrofonposisjonen. For den første hydrofonen gjør $L_b/L_h \approx 0$ $\phi_{nt}^h/\phi_{nt}^d \approx 31$ og ϕ_{nt}^h/ϕ_{nt}^b ekstremt store. For den siste hydrofonen blir typiske verdier på 100 meter og 1 km for L_h og L_b brukt for å komme frem til at $\phi_{nt}^h/\phi_{nt}^d \approx \phi_{nt}^h/\phi_{nt}^b \approx 3$. Tiltross for det faktum at hydrofonfiberen utgjør en relativt liten mengde av den totale Sagnac-sløyfen, er således størrelsen til den akustisk induuerte fasemodulasjonen i hydrofonfiberen større enn den akustisk induuerte fasemodulasjonen i forsinkelsessløyfefiberen og i bussfiberen, selv for den mest distanserte hydrofonen. Den følgende seksjonen beskriver en innretning for å håndtere dette nivået av fordelt opphengingsstøy ved bruk av tomme trinn.

35

For å kunne evaluere integralet i likning 5 for forsinkelsessløyfefiberen antas det at $R(l)=R_d$ for alle l mindre enn L_d . Det var denne konstantheten til $R(l)$ som eliminerte

et eventuelt bidrag til integralet i likning 5 fra $l=(L-L_d)$ til L_d (siden integralet ble en odd funksjon om $L/2$). Spoling av en langfiberlengde vil imidlertid resultere i avhengighet av $R(l)$ på l (muligens siden det indre lag til fiberen har en forskjellig R enn det ytre laget). Disse variasjoner i $R(l)$ øker forsinkelsessløfens opphenting fra $l=L-L_d$ til L_d .

5 For å redusere denne opphenting er det notert at $R(l)$ bare må være en lik funksjon rundt $L/2$ for å gjøre integranten i likning 5 til en odd funksjon om $L/2$. $R(l)$ tvinges til å være mer symmetrisk om $L/2$ ved å vikle forsinkelsessløyfen på en slik måte at symmetriske punkter til fibersløyfen plasseres inntil hverandre som vist i figur 11. En slik vikling sikrer at symmetriske punkter til forsinkelsessløyfen befinner seg nær

10 hverandre, slik at evt. variasjoner i $R(l)$ pga. fiberens posisjon på spolen er så symmetrisk om $L/2$ som mulig, og derved blir forsinkelsessløyfeopphenting så nær uttrykket til likning 8 som mulig. Det er å merke seg at siden hver Sagnac-sløyfe i Sagnac sensorgruppen har et forskjellig $L/2$, kan bare en sløyfe bli viklet nøyaktig som vist i figur 11, og derved innføres en liten grad av ujevnheter i $R(l)$ til alle unntatt en av

15 Sagnac-sløyfene.

Det skal også nevnes at i tillegg til å øke den akustiske sensitiviteten til fiberen ved en hydrofon, er det mulig å gjøre fiberne mindre sensitive ved å påføre et metallisk belegg av en bestemt diameter. (Se for eksempel J. A. Bucaro et al., *Optical fibre sensor coating*, angitt ovenfor). Målte, normaliserte faseresponsiviteter så lave som -366 dB re

20 $1/\mu\text{Pa}$ har blitt rapportert). Dersom slike fibre blir brukt i forsinkelses- eller busslinjene, nærmer forholdet mellom R_h og R_b eller mellom R_h og R_d seg 68 dB (i stedet for 30 dB med plastbelagte forsinkelses- og bussfibre), og det hydrofoninduserte signalet over forsinkelses- og bussinduserte-signalet øker med 38 dB.

25 Reduksjon av den fordelte opphentingsstøyen ved å bruke tomme trinn

For ytterligere å kunne eliminere fordelt opphentet signal, kan den hydrofoninduserte akustiske modulasjonen isoleres fra den fordelte opphentingsmodulasjonen ved å plassere tomme trinn 300 som ikke inneholder en hydrofon i gruppen 210 som vist i figur 12. Hvert trinn 216(i) som inneholder en

30 hydrofon 212(i), kalt et avfølingstrinn, fortsetter med ett av de tomme trinn 300(i). Det faktum at den ikke avfølede fiberen til hver sløyfe som innelukker et tomt trinn 300(i) er nærmest identisk med den ikke-avfølede fiberen til sløyfen som omgir det korresponderende avfølingstrinnet 212(i), betyr at det tomme trinnet 300(i) og det korresponderende avfølingstrinnet 212(i) vil ha nærmest det samme fordelte,

35 opphentede signalet. Ved å behandle dette tomme trinnet 300(i) som en annen sensor i gruppen 210, og riktig timing av pulsene (i TDM oppsettet) fra de tomme trinnene 300(i) og avfølingstrinnene 212(i), slik at de ikke overlapper hverandre, kan det målte

opphentede signalet som er tilstede i hvert avfølingstrinn 212(i), bli målt. Etter påvisning kan dette signalet subtraheres fra avfølingstrinnsignalet og etterlater bare intensitetsvariasjoner frembrakt av fasemodulasjoner i hydrofonfiberen. Implementering av slikt oppsett krever $2N$ trinn for en N sensorgruppe 210, og derved reduseres driftssyklusen til individuelle signaler med en halvdel.

Dersom det ikke er nødvendig å gjøre busspartiet til gruppen 210 mindre sensitivt, kan ett enkelt tomt trinn 300 anordnes i gruppen 210 for å måle det fordelte opphentede signalet tilordnet forsinkelsessløyfen 214, og derved kreves bare $N+1$ trinn (N avfølingstrinn 212(i) og bare ett tomt trinn 300) for N sensorer. Dersom et tomt trinn 300 ikke på adekvat måte måler det fordelte opphentede signalet for hvert avfølingstrinn 212(i), kan flere tomme trinn 300 være tilføyd i periodiske intervaller langs gruppen, inntil det fordelte, opphentede signalet som er tilstede på hvert avfølingstrinn 212(i) kan måles adekvat av det nærmeste av disse tomme trinnene 300. Ved bruk av færre tomme trinn blir resultatet en høyere driftssyklus for individuelle signaler. Figur 12 viser den ekstreme situasjonen der et tomt trinn ble tilføyd for hvert avfølingstrinn.

Polarisering

For maksimal kontrast i en hvilken som helst interferometrisk sensor, må polarisasjonstilstanden (SOP) til de interfererende strålene være identiske når de rekombineres. Dersom de er ortogonale er det ingen interferens og det er således intet amplitudemodulert signal. Dette refereres til som polarisasjonsindusert signalfading. Siden hver sensor i Sagnac sensorgruppen er en Sagnac-sløyfe, har forskningen utført så langt på polarisasjonsindusert signalfading i Sagnac-fibergyroskopet, passet like gjerne på Sagnac sensorgruppen. En lovende løsning er å anordne en depolarisator inni Sagnac-sløyfen. (se for eksempel K. Böhm et al., *LOW-DRIFT FIBRE GYRO USING A SUPERLUMINICENT DIODE*, *ELECTRONICS LETTERS*, bind 17, nr. 10 14. mai 1981, s. 352-353). Depolarisatoren sikrer at minst halvdelen av den optiske effekten blir returnert til 3x3-kopleren i den korrekte SOP til enhver tid. Denne generelle fremgangsmåten frembringer en konstant synlighet uten hensyn til sløyfedobbeltbrytning. (Se for eksempel William K. Burns et al., *Fiber-Optic Gyroscopes with Depolarized Light*, *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, bind 10, nr. 7, juli 1992, s. 992-999). Den enkleste konfigurasjonen anvender en upolarisert kilde slik som en fiber superfluorescenskilde og en depolarisator i sløyfen. Som illustrert i figur 13, er det i Sagnac sensorgruppen 200 en depolarisator 310 anordnet i et punkt som er felles for alle Sagnac-sløyfene. Depolarisatoren 310 sikrer at hver sensor 212(i) har den konstante synlighet uavhengig av dobbeltbrytning, så lenge

sløyfedobbeltbrytning forblir konstant. Dette representerer en stor forenkling i håndteringen av den polarisasjonsinduserte signalfadingen, sammenliknet med fremgangsmåtene som anvendes i Mach-Zehnder interferometriske sensorgrupper.

Selv om små endringer i dobbeltbrytningen vil bli tilstrekkelig kansellert av den 5
 5 resiproke naturen til Sagnac interferometeret, vil dobbeltbrytningsmodulasjoner ved frekvenser i det akustiske området av interesse produsere polarisasjonsstøy. Mesteparten av dobbeltbrytningsmodulasjonen ved disse frekvensene opptrer som resultat av fysisk fiberbevegelse. Sagnac-sløyfen bør således forbli stasjonær for å kunne redusere polarisasjonsstøyen (så vel som det fordelte, opphentede signalet).

10

Støykilder innført ved anvendelsen av Sagnac interferometeret

Termisk fasestøy

Siden brytningsindeksen til fiberen endrer seg med temperaturen vil termiske fluktuasjoner i en fiber frembringe fasefluktuasjoner i lyset som forplanter seg gjennom 15
 denne. Disse indeksvariasjonene er ikkekorrelerte over lengden av fiberen, og de resulterende fasefluktuasjonene skaleres som kvadratroten av lengden. Siden Mach-Zehnder interferometere typisk anvender mindre enn 100 meter fiber i hver arm, er størrelsen til denne termiske fasestøyen neglisjerbar. Sagnac interferometeret har mye mer fiber i interferometeret, og som et resultat kan termisk fasestøy bli en begrensende 20
 støykilde. Størrelsen av denne termiske fasestøyen i et Sagnac interferometer har blitt beskrevet teoretisk og bekreftet ved eksperiment. (Se for eksempel Sverre Knudsen et al., *Measurements of Fundamnetal Thermal Induced Phase Fluctuations in the Fiber of a Sagnac interferometer*, IEEE Photonics Technology Letters, bind 7, nr. 1, 1995, s. 90-93; og Kjell Kråkenes et al., *Comparison of Fiber-Optic Sagnac and Mach-Zehnder* 25
Interferometers with Respect to Thermal Processes in Fiber, JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, bind 13, nr. 4, april 1995, s. 682-686). For sløyfer kortere enn 2 km, kan den termiske fasestøyen overskride $1 \mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ i frekvensområdet av interesse, som er i størrelsesorden til den nødvendige gruppesensitiviteten.

30

Den termiske fasestøyen kan anses som en kilde av fordelt opphentet støy, beslektet med en ekstern modulasjon av forsinkelsessløyfen, og som sådan kan den reduseres ved anvendelse av tomme trinn, som beskrevet ovenfor. Termisk fasestøy kan også reduseres ved forkorting av sløyfelengden. Som beskrevet ovenfor, kan sløyfelengden forkortes uten å endre lavfrekvenssensitiviteten ved å øke 35
 hydrofonfiberlengden med den samme faktoren som forsinkelsessløyfen ble redusert med. For eksempel har en 40 km forsinkelsessløyfe med 50 meter hydrofonfiber den samme lavfrekvensresponsen som en 20 km forsinkelsessløyfe med 100 meter fiber.

Den sistnevnte kombinasjonen vil imidlertid være mindre utsatt for termisk fasestøy siden den totale forsinkelsessløyfelengden er kortere med nærmest en faktor på to.

Kerr effektindusert fasestøy

5 Kerr-indusert faseforskyvning som kan genereres i et Sagnac interferometer har mottatt mye oppmerksomhet med hensyn til det fiberoptiske gyroskopet. (Se for eksempel R. A. Bergh et al., *Source statistics and the Kerr effect in fiber-optic gyrosopes*, OPTICS LETTERS, bind 7, nr. 11, November 1982, s. 563-565; R. A. Bergh et al., *Compensation of the optical Kerr effect in fiber gyroscopes: effects of*
 10 *nonmonochromatic sources*, OPTICS LETTERS, bind 8, nr. 2, februar 1983, s. 119-121). Gyroskopets krav og den akustiske sensor er imidlertid forskjellige fordi gyroskopet måler likestrømsnivåer. Små likestrømsforskyvninger skapt av Kerr-induserte faseforskyvninger som ville begrense et fibergyroskop, er ikke aktuelle med en akustisk sensor. Den Kerr-induserte likestrømsfaseforskyvningen er ikke et problem
 15 så lenge den ikke forflytter forspenningspunktet for langt bort fra kvadraturen. Intensitetsstøyen på lyskilden kan frembringe en Kerr-indusert fasestøy på utgangssignalet. Størrelsen til denne Kerr-induserte vekselstrømsfasestøyen er imidlertid liten så lenge den Kerr-induserte likestrømsfaseforskyvningen forblir liten. Begynnelsen til Kerr-indusert faseforskyvning i Sagnac sensorgruppen er forskjellig fra
 20 opprinnelsen i fibergyroskopet. Asymmetrien til Sagnac sensorgruppen inviterer mer enkelt til en slik Kerr faseforskyvning enn det nominelt symmetriske gyroskopet gjør. Denne asymmetrien er resultatet av gruppepartiet, så vel som en hvilken som helst plassering av EDFA, som er asymmetrisk, ved at en stråle ser forsterking før den forplanter seg gjennomforsinkelsessløyfen, så ser den eller blir utsatt for tap, mens
 25 strålen som forplanter seg i motsatt retning utsettes for tap, og så forsterkning. Det er mulig å balansere disse asymmetriene og nulle den Kerr-induserte faseforskyvningen ved å velge den passende lokaliseringen av EDFA i forsinkelsessløyfen. Spesifikasjonene avhenger av den nøyaktige gruppe konfigurasjonen og av hvilket multipleksoppsett som blir anvendt.

30

Ikke-lineær fasemodulasjon som resultat av EDFA

Populasjonsinversjonene skapt i EDFA, induserer en faseforskyvning i signallyset som passerer gjennom denne. (Se for eksempel M. J. F. Digonnet et al., *Resonantly Enhanced Nonlinearity in Doped Fibers for Low-Power All-Optical*
 35 *Switching: A Review*, OPTICAL FIBER TECHNOLOGY, bind 3, nr. 1, januar 1997, s. 44-64). Dette fenomen har blitt anvendt for å frembringe heloptiske interferometriske brytere. I en Sagnac sensorgruppe skaper EDFA inni interferometeret en ikke-lineær

faseforskyvning via den samme mekanismen. Variasjoner i populasjonsinversjonen pga. pumpe eller signaleffektfluktuasjoner, vil frembringe fasemodulasjoner som vil bli konvertert til en intensitetsstøy.

For å kunne estimere størrelsen til denne støykilden må det først tas en avgjørelse om hvordan den inverterte populasjonen responderer på pumpe og signaleffektfluktuasjoner. Dette er relativt rett frem å besørge ved å benytte hastighetslikningene for et erbiumsystem:

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

10

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

der N_1 og N_2 er populasjonstettheter til henholdsvis de lavere og eksiterte tilstander, N_0 er den totale populasjonstetthet, I er intensiteten, σ er tverrsnittet, A_{eff} er det effektive modusarealet i fiberen, og τ_2 er levetiden til nivå to. De senkede bokstavene p og s angir henholdsvis pumpe og signal, og de hevede bokstavene a og θ angir henholdsvis absorpsjon og emisjon.

Ved å dele N_1 , N_2 , I_p og I_s i deres stabiltilstand og tidsvarierende komponenter, og så substituere dette i likning 12 og kombinere likning 12 med likning 11, er resultatet:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}N_2(t) = & \left[\frac{N_0 \sigma_p^a + N_2^{ss} (\sigma_p^a + \sigma_p^\theta)}{h\nu_p} \right] I_p(t) + \left[\frac{N_0 \sigma_s^a + N_2^{ss} (\sigma_s^a + \sigma_s^\theta)}{h\nu_s} \right] I_s(t) + \\ & \left[\frac{I_p^m (\sigma_p^a + \sigma_p^\theta)}{h\nu_p} + \frac{I_s^m (\sigma_s^a + \sigma_s^\theta)}{h\nu_s} + \frac{1}{\tau_2} \right] N_2(t) - \left[\frac{(\sigma_p^a + \sigma_p^\theta)}{h\nu_p} \right] I_p(t) N_2(t) - \\ & \left[\frac{(\sigma_s^a + \sigma_s^\theta)}{h\nu_s} \right] I_s(t) N_2(t), \end{aligned} \quad (13)$$

der de opphøyede bokstavene ss angir stabiltilstandsverdier, og de tidsvarierende komponentene nå er skrevet som eksplisitte funksjoner av tiden ($N_2 = N_2^{ss} + N_2(t)$). Dersom det antas $N_2(t)$ er mye mindre enn N_2^{ss} , kan de to siste uttrykkene i likning 13 neglisjeres. 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 modulasjonsamplitudene til henholdsvis $I_p(t)$ og $I_s(t)$, og f_p og f_s angir henholdsvis pumpe og signalmodulasjonsfrekvensene), og løse de resulterende differensiallikningene, kan det finnes at:

35

$$\frac{|N_2(f_p)|}{N_2^m} \approx \left(\frac{\sigma_i^e(\sigma_p^e + \sigma_p^e) - \sigma_p^e(\sigma_i^e + \sigma_i^e)}{(\sigma_p^e + \sigma_p^e)^2} \cdot \frac{v_p}{v_i} \right) \left(\frac{1}{\sqrt{1 + f_p^2/f_o^2}} \right) \cdot \frac{I_i^m I_p^m}{I_p^{m^2}} \quad (14)$$

$$5 \quad \frac{|N_2(f_i)|}{N_2^m} \approx \left(\frac{\sigma_i^e - \sigma_i^e + \sigma_i^e}{\sigma_p^e - \sigma_p^e + \sigma_p^e} \right) \cdot \frac{v_p}{v_i} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{1 + f_p^2/f_o^2}} \right) \cdot \frac{I_i^m}{I_p^m} \quad (15)$$

hvor:

$$f_o = \frac{\sigma_p^e + \sigma_p^e}{h\nu_p} I_p^m + \frac{\sigma_i^e + \sigma_i^e}{h\nu_i} I_i^m + \frac{1}{\tau_2} \approx \frac{\sigma_p^e + \sigma_p^e}{h\nu_p} I_p^m \quad \text{når } I_p^m \gg I_i^m. \quad (16)$$

Dersom det er antatt at $\lambda_p=1480$ nm, $\lambda_s=1550$ nm og $I_p^{ss}=1$ W, og dersom det antas typisk erbiumsilisium tverrsnitt, forenkles likning 14 og 15 til:

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

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

De pumpeinduserte populasjonsinversjonsfluktuasjonene (likning 17) skal analyseres først. Dersom $I_s^{ss}=1$ 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 SNR), så er $|N_2(f_p)|/N_2^{ss}=9 \times 10^{-10} \sqrt{\text{Hz}}^{-1}$ ved frekvenser godt under 4,3 kHz. For å kunne omforme dette tallet til en fasemodulasjon, er det faktum at 10 mW pumpeeffekt, absorbert i en erbiumdopet fiber, induserer omtrent 7 radianer faseforskyvning ved 1550 nm, kan bli brukt. (Se for eksempel M. J. F. Digonnet et al., *Resonantly Enhanced Nonlinearity in Doped Fibers for Low-Power All-Optical Switching: A Review*, OPTICAL FIBER TECHNOLOGY, bind 3, nr. 1, januar 1997, s. 44-64). Ved å bruke simuleringer tilveiebringer 10 mW absorbert pumpeeffekt I en typisk erbiumdopet fiber omtrent 6 dB av liten signalforsterkning ved 1550 nm, hvilket er nær forsterkningen som kreves av hver forsterker i en gruppe med fordelte EDFA. (Se for eksempel Craig W. Hodgson et al., *Optimization of Large-Scale Fiber Sensor Arrays Incorporating Multiple Optical Amplifiers-Part I: Signal-to-Noise Ratio*; Craig W. Hodgson et al., *Optimization of Large-Scale Fiber Sensor Arrays Incorporating Multiple Optical Amplifiers-Part II: Pump Power*; Jefferson L. Wagener et al., *Novel Fiber Sensor Arrays Using Erbium-Doped Fiber Amplifiers*; og C. W. Hodgson et al., *Large-Scale interferometric fiber sensor arrays with multiple optical amplifiers*, sitert ovenfor). Hver forsterker tilveiebringer derfor omtrent 7 radianer likestrømsfaseforskyvning. Siden den ikke-lineære faseforskyvningen er proporsjonal med den øvre tilstandspopulasjonen N_2 , kan det skrives at $\Delta N_2/N_2^{ss}=\Delta\phi/\phi^{ss}$. Ved å bruke dette forholdet og likning 17 igjen 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 lavfrekvensstøyen indusert av hver EDFA (7 radianer) $\times (9 \times 10^{-10}) \sqrt{\text{Hz}}^{-1}=6,3 \times 10^{-9}$ rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$. Dersom det antas at det er totalt 500 slike forsterkere og at fasemodulasjonene fra alle de 500 forsterkerne adderes koherent, kan den totale pumpestøyinduserte faseforskyvningen estimeres til å være $3,2 \mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$. Målfasestøygulvet er typisk innstilt til $1 \mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$, og indikerer at den ikke-lineære fasestøyen indusert av EDFA pga. pumpeeffektfluktuasjoner er nær, men ikke betydelig

større enn det nødvendige fasestøygulvet. I praksis vil ikke forsterkernes fasemodulasjoner adderes koherent, hvilket vil redusere $3,2 \mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ tallet.

Beregninger av den induerte faseforskyvningen pga. signaleffektfluktuasjoner er mer komplisert siden signaleffekten ikke har intensitetsstøy, men også er modulert av multipleksingsoppsettet. Anta igjen TDM-tilfellet hvor generelt, mens en gitt puls forplanter seg gjennom en bestemt EDFA, det kan eller kan ikke være en motforplantende puls som forflytter seg gjennom EDFA samtidig. Dersom det antas det verste tilfellet hvor det alltid er en motforplantende puls, er I_s^m to ganger intensitetsstøyen til hver individuell puls. For forsterkerne er I_s^m typisk 1,5 til 2 ganger intensitetsstøyen til hver individuell puls. Anta at signallyset har en elektronisk SNR på 120 dB/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ved akustiske frekvenser (dvs. $I_s^m/I_s^{ss}=10^{-6}/\sqrt{\text{Hz}}$), og innføring av dette tallet i likning 18 sammen med $I_p^{ss}=1$ W og $I_s^m=2$ mW, kan det beregnes at $|N_2(f_s)|/N_2^{ss}$ er omtrent $2,4 \times 10^{-9} \sqrt{\text{Hz}}^{-1}$ ved frekvenser mye lavere enn 4,3 kHz og at fasestøyen induert av signalintensitetsstøy i hver EDFA således er $1,68 \times 10^{-8} \text{ rad}/\sqrt{\text{Hz}}$. Igjen anta at 500 forsterkere og koherent addisjon av all EDFA-indusert fasemodulasjon er den totale EDFA-induserte fasestøyen på hver puls $8,4 \mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$, et nivå som igjen kunne begrense ytelsen til Sagnac sensorgruppen. Et mer detaljert studium som tar hensyn til multipleksingsoppsettet og den nøyaktige timingen av gruppen, er imidlertid nødvendig for en mer nøyaktig beregning.

20

Multipleksingsoppsett i en Sagnac gruppe

Tidsdivisjon multipleksing

Så langt har det blitt antatt at Sagnac sensorgruppen drives i en TDM konfigurasjon. Det skal imidlertid bemerkes at det i Sagnac sensorgruppen er kildekravene for et slikt TDM system ikke så krevende som kravene til Mach-Zehnder interferometrisk sensorgruppe i en TDM konfigurasjon. Grunnen til dette er bruken av bredbåndskilden i Sagnac sensorgruppen. I den Mach-Zehnder interferometriske sensorgruppen er lyset fra tilstøtende trinn koherent pga. den smale linjebreddekilden, og det er således nødvendig med ekstremt høye slukkeforhold på innmatingspulsene for å forhindre flerbane koherent interferens. Disse høye slukkeforholdskravene oppnås ved å anordne multiple modulatorer i serie, hvilket resulterer i en komplisert høytaps- og kostbar kilde. I Sagnac sensorgruppen behøver ikke det nødvendige slukkeforholdet være så høyt fordi bredbåndskilden eliminerer enhver mulighet for multibane koherent interferens. I tillegg forhindrer de trange eller smale linjebreddene som er nødvendige ved den Mach-Zehnder interferometriske sensorgruppen bruken av en pulset laserkilde i stedet for en kontinuerlig bølge (cw) laserkilde som er eksternt modulert med litiumniobat intensitetsmodulatorer. I Sagnac sensorgruppen kan enten en kontinuerlig

35

bølge ASE kilde, som er eksternt modulert, en pulset ASE kilde eller kombinasjon av disse, anvendes for å utgjøre kilden. Igjen er grunnen for dette at Sagnac sensorgruppen ikke krever en smal linjebreddekilde. Selv om den foreliggende oppfinnelsen ikke krever en smal linjebreddekilde, må det forstås at Sagnac sensorgruppen i henhold til den foreliggende oppfinnelsen kan brukes med en smal linjebreddekilde, slik som for eksempel en laser.

Frekvensdivisjonsmultipleksing

Bruken av bredbåndskilden tillater også Sagnac sensorgruppen å operere i ikke-TDM konfigurasjoner uten å endre designen eller at det kreves ytterligere kilder. Frekvensdivisjonsmultipleksing (FDM) er vanlig anvendt med Mach-Zehnder interferometriske sensorgrupper ved anvendelse av det fasegenererte bærer (PGC) oppsettet, men er også kompatibel med Sagnac sensorgruppen. Figur 14 viser en grunnleggende Sagnac sensorgruppe 400 som bruker et FDM oppsett. En fibersuperfluorescenderende kilde (SFS) 402 (eller annen bredbåndskilde, slik som for eksempel en LED) genererer innmatingslys. En pipende intensitetsmodulasjon påtrykkes innmatingslyset via en intensitetsmodulator 404, som styres av en pipefrekvensgenerator 406. Det modulerte lyset entrer en sensorgruppe 410 via en 3x3-kopler 412. Lyset passerer gjennom en forsinkelsessløyfe 414 og flere avfølingstrinn 416(i) som har respektive sensorer 418(i). Tomme trinn (ikke vist) kan også være innbefattet dersom det er ønskelig. Etter å ha passert gjennom forsinkelsessløyfen 414 og trinnene 416(i), slipper lyset ut fra sensorgruppen 410 via koplere 412 og blir påvist av en detektor 420 som genererer et elektrisk utgangssignal som er responderende på det påviste lyset. Det elektriske utgangssignalet fra detektoren 420 blir blandet i en mikser 422 med den samme pipefrekvensen som har blitt tidsforsinket av en forsinkelse 424, som forsinker den pipende frekvensen ved en tid Δt . I oppsettet illustrert i figur 14 blir utsignalet fra mikseren 422 påtrykket en spektrumanalysator 426. I en driftsutførelse blir utgangssignalet fra mikseren 422 påtrykket et signalbehandlingssystem (ikke vist) som analyserer utgangssignalet fra mikseren 422 for å reprodusere de akustiske signalene som støter an mot gruppen 410.

Signalene som returnerer fra sensorene 418(i) i de forskjellige trinnene 416(i) blir ytterligere forsinket med hensyn til den forsinkede pipefrekvensen. Dette er illustrert ved kurvene i figur 15 ved den opprinnelige pipefrekvensen 450, den forsinkede pipefrekvensen 452 fra forsinkelsen 424, det pipende retursignalet 460 fra det første trinnet, det pipende retursignalet 462 fra det andre trinnet og det pipende retursignalet 464 fra det tredje trinnet. I mikseren 422 blir respektive separate beatfrekvenser f_{b1} 470, f_{b2} 472, f_{b3} 474 (vist i figur 14) tilformet mellom den blandede

pipefrekvensen 452 og hvert av signalene som returnerer fra de forskjellige trinnene i Sagnac sensorgruppen 410. (Se for eksempel S. F. Collins et al., *A Multiplexing Scheme For Optical Fibre Interferometric Sensors Using An FMCW Generated Carrier*, OFS '92 Conference Proceedings, s. 209-211). Selv om bare tre pipende eller "chirped" retursignaler 460, 462, 464 er illustrert i figur 15, forutsettes at opptil N retursignaler kan være tilveiebrakt, hvor N er antallet trinn i gruppen 410. De chirpede retursignalene fra det N'te trinnet forårsaker en beatfrekvens f_{bN} i mikseren 422.

Som illustrert ved en bilderepresentasjon av et spektralt utgangssignal i figur 14, vil akustisk modulasjon av signalene opptre som øvre sidebånd 480, 481, 482 og nedre sidebånd 484, 485, 486 til beatfrekvensene. En fordel med dette FDM oppsettet er at kravene til gruppetiming er sterkt avslappet, sammenliknet med de som kreves i et TDM system. Et TDM system krever en spesifikk forsinkelse mellom tilstøtende trinn for å forhindre pulser i å overlape hverandre, og dette kan oppvise et krevende konstruksjonsproblem. I FDM vil variasjoner i fiberlengden forskyve beatfrekvenser, men ikke indusere overlapping mellom signaler så lenge som disse beatfrekvensene er separert ved to ganger det akustiske påvisningsområdet. Det sistnevnte oppnås ved å velge en passende "chirpe"-hastighet. Til forskjell fra et TDM system, returnerer alle banene eller linjene lys til enhver tid, hvilket kan resultere i fasestøy mellom de forskjellige inkohrente signalene. Bredbånd-ASE-lyskilden minimaliserer størrelsen til denne fasestøyen. (Se for eksempel Moslehi, *Analysis of Optical Phase Noise in Fiber-Optic Systems Employing a Laser Source with Arbitrary Coherence Time*, Journal of Lightwave Technology, bind LT-4, nr. 9, September 1986, s. 1334-1351).

Kodedivisjonsmultipleksing

Kodedivisjonsmultipleksing (CDM) har fått øket oppmerksomhet i den senere tid for dens anvendelse i sensorgrupper. (Se for eksempel A. D. Kersey et al., *Code-division Multiplexed Interferometric Array With Phase Noise Reduction And Low Crosstalk*, OFS '92 Conference Proceedings, s. 266-269; og H. S. Al-Raweshidy et al., *Spread spectrum technique for passive multiplexing of interferometric optical fibre sensors*, SPIE, bind 1314 Fibre Optics '90, s. 342-347). Som illustrert for en Sagnac sensorgruppe 600 i figur 16, blir i CDM det innmatede lyset fra en superfluorescenderende fiberkilde 602 (eller annen bredbåndskilde, slik som for eksempel en LED) modulert i en intensitetsmodulator 604 i samsvar med en pseudo-tilfeldig kode generert av en kodegenerator 606. Det modulerte lyset blir påtrykket en interferometrisk sløyfe 608 via en 3x3-kopler 610, og forplanter seg gjennom en forsinkelsessløyfe 614 og et mangfold trinn 616(i) i en gruppe 612. I den illustrerte utførelsen innbefatter hvert trinn 616(i) en respektiv sensor 618(i). Tomme trinn (ikke

vist) kan også være innbefattet dersom det er ønskelig. Lyset returnerer fra sløyfe via 3x3-kopleren 610 og blir påvist av en detektor 620. Det elektriske utsignalet fra detektoren 620 blir påtrykket en korrelator 622 sammen med utgangssignalet fra kodegeneratoren 606, hvilket utgangssignal er forsinket i en varighet τ_{cor} av en

5 forsinkelse 624. Bit-varigheten til den pseudo-tilfeldige koden er kortere enn forplantningsforsinkelsen mellom tilstøtende trinn i gruppen 612. Når τ_{cor} er lik en av sløyfeforplantningstidene τ_j , gjennom et respektivt trinn 616(i), blir så signalet som returnerer fra denne sensoren i trinnet 616(i) korrelert til den forsinkede pseudo-tilfeldige koden. De andre signalene som har forsinkelser τ_j , hvor $|\tau_j - \tau| > \tau_{bit}$ korreleres

10 til null. Korrelasjonsprosessen involverer for eksempel å multiplisere det påviste signalet med 1 eller -1 (eller portstyre signalet i en elektronisk port 630 til ikkeinverterte og inverterte innmatninger til en differensialforsterker 632) avhengig av hvorvidt korreleringskoden er på eller av. Utsignalet fra differensialforsterkeren på en ledning 634 er det korrelerte utsignalet. Signalet blir så tidsgjennomsnittsbestemt over en

15 periode t_{avg} som er lik varigheten til koden. De ikkekorrelerte signalenes tidsgjennomsnittsbestemmes til null, og derved isoleres signalet fra sensoren 618(i). τ_{cor} blir scannet for å gjenvinne signalene sekvensielt fra alle sensorene.

En fordel med CDM sammenliknet med TDM er at forsinkelsen mellom sensorene ikke må styres nøyaktig. Enhver sløyfeforsinkelse τ_j hvori $|\tau_j - \tau| > \tau_{bit}$ er

20 akseptabelt (hvor τ_{bit} er varigheten til en puls i koden). Korrelering krever kunnskap om τ_j som er lett å måle. Som ved FDM, trekker bruken av bredbåndskilde fordel av å redusere fasestøyen, hvilket er resultatet av tilføyelsen av alle signalene til sammen.

Det forutgående beskriver en nytt design og en akustisk sensorgruppe, basert på Sagnac interferometeret. Hovedfordelene ved denne designen er anvendelsen av

25 fellesbane eller -linje interferometere. Dette eliminerer omformingen av kildefasestøy til intensitetsstøy, som er fremherskende i Mach-Zehnder interferometriske sensorer, og tillater anvendelsen av rimelige, høyeffekt ASE-kilder eller andre bredbåndskilder. Responsen til Sagnac sensorgruppen som funksjon av akustisk frekvens er vist å passe med havstøygulvet. Designen tillater også at det dynamiske området kan økes dramatisk

30 uten å tilføye hydrofoner ved bruken av en ytterligere, svært kort forsinkelsessløyfe. En teknikk for å eliminere polarisasjonsindusert signalfading, ble beskrevet ovenfor. Sagnac sensorgruppen tillater også bruken av flere multipleksingsoppsett på en enklere måte enn det som er mulig med en standard Mach-Zehnder gruppe. På grunn av disse trekkene tilveiebringer Sagnac sensorgruppen et svært lovende alternativ til Mach-

35 Zehnder interferometerbaserte sensorgrupper.

Foldet Sagnac sensorgruppe

Figurene 17-20 illustrerer alternative utførelser av en fordelt akustisk sensorgruppe basert på Sagnac effekten som har en arkitektur modifisert til å redusere den fordelte opphenting fra nedføringsfiberne. Spesielt illustrerer figur 17 en grunnleggende, foldet akustisk Sagnac fibersensorgruppe 700, som omfatter en kilde 702, en første detektor 704 og en andre detektor 706. Kilden 702, den første detektoren 704 og den andre detektoren 706 befinner seg fortrinnsvis i den tørre enden av sensorgruppen 700 (for eksempel på land eller om bord på et skip).

Kilden 702 genererer lyspulser som er koblet til en 3x3-kopler 710 via en nedføringsfiber 708. Som illustrert, befinner 3x3-kopleren seg i den våte enden (for eksempel nær havbunnen). 3x3-kopleren 710 har en første utgangsport koblet til en ende av et felles fibertrinn (trinn 0) 712, har en andre utgangsport koblet til en første gruppe inngangs/utgangsfiber 714 av en gruppe 716, og har en tredje utgangsport som er ikkereflekterende terminert. Omtrent 33% av lyset fra kilden 702 blir koblet til hver av den første og andre porten av 3x3-kopleren og således forplanter omtrent 33% av lyset seg til det felles fibertrinnet 712, og omtrent 33% av lyset forplanter seg til gruppen 716. Som beskrevet ovenfor, selv om det er beskrevet her, en 3x3-kopler 710, kan andre $n^x m$ -koplere (for eksempel en 2x2-kopler, en 4x4-kopler etc.) brukes med den utførelsen i figur 17 og de alternative utførelsene av den foreliggende oppfinnelsen som er beskrevet nedenfor.

Gruppen 716 omfatter et mangfold trinn 718(i) (dvs. 718(1), 718(2)... 718(N) koblet mellom den første gruppeinngangs/utgangsfiberen 714 og en andre gruppe inngangs/utgangsfiber 720. Hvert trinn 718(i) innbefatter en respektiv akustisk sensor (dvs. hydrofon) 722(i). Gruppen innbefatter på fordelaktig måte fordelt erbiumdopete fiberforsterkere (EDFA) 724, slik som beskrevet ovenfor i tilknytning til figur 3. (Pumpekilden til EDFA 724 er ikke vist i figur 17). Selv om det er beskrevet her med hensyn til gruppen 716, kan andre gruppekonfigurasjoner også med fordel bli anvendt i den foreliggende oppfinnelsen.

Den andre gruppe inngangs/utgangsfiber 720 kobler gruppen 716 til en første port av en 2x2-kopler 730. En andre ende av det felles trinn (trinn 0) 712 er koblet til en andre port av 2x2-kopleren 730. Selv om det er beskrevet her som en gruppe 716 som omfatter mange sensorer 722(i), må det forstås at den foreliggende oppfinnelsen har applikasjoner for et sensorsystem som har bare en enkelt sensor 722.

En tredje port av 2x2-kopleren 730 er ikkereflekterende terminert i en terminal 732. En fjerde port av 2x2-kopleren 730 er koblet til en forsinkelsessløyfenedføringsfiber 740. Forsinkelsessløyfenedføringsfiberen 740 kobler den fjerde porten av 2x2-kopleren til en første ende av en forsinkelsessløyfe 750.

Forsinkelsessløyfen 250 kan befinne seg enten i den tørre enden som vist, eller i den våte enden. En andre ende av forsinkelsessløyfen 750 er tilkoblet en reflektor 752, slik at lys som slipper ut av den andre enden av forsinkelsessløyfen 750 blir reflektert tilbake i forsinkelsessløyfen 750, forplanter seg gjennom forsinkelsessløyfen 750 og forplanter seg gjennom forsinkelsessløyfenedføringsfiberen 740 tilbake til den fjerde porten av 2x2-kopleren 730. Lyset returnert fra sløyfenedføringsfiberen 740 er delt av 2x2-kopleren 730 med hovedsakelig like andeler som forplanter seg i det felles trinnet 712 og i gruppen 716 og begge andelene forplanter seg mot 3x3-kopleren 710. De to andelene blir kombinert i 3x3-kopleren 710 hvor lyspulser som har forplantet seg i den samme avstanden gjennom gruppen 716 og gjennom det felles trinnet 712 interfererer og lyspulser som har forplantet seg i forskjellige avstander ikke interfererer. Signalene som er resultatet av interferensen, blir sendt ut fra 3x3-kopleren 710 som første og andre utgangssignaler som henholdsvis forplanter seg til den første detektoren 704 via en første detektornedføringsfiber 770 og forplanter seg til den andre detektoren via en andre detektornedføringsfiber 772. Detektorene 704, 706 genererer elektriske utgangssignaler som blir analysert av elektronikk (ikke vist) på en konvensjonell måte for å reprodusere de akustiske signalene som støter an mot sensorene 702(i). Som beskrevet nedenfor, returnerer signalene som interfererer inni 3x3-kopleren 710 fra hver sensor 722(i) ved forskjellige tidspunkt, og de kan derfor være separert ved tidsdivisjonmultipleksing, frekvensmultipleksing, kodedivisjonmultipleksing eller liknende, som beskrevet ovenfor. De ikke interfererende signalene genererer ikke påvisbare utgangssignaler og ignoreres.

Utførelsen i figur 17 kan modifiseres ytterligere ved å innføre en depolarisator (ikke vist) i et av fibersegmentene 712, 714 eller 720 i tilknytning til en ikkepolarisert kilde, som beskrevet ovenfor i tilknytning til Sagnac interferometeret. Slike utførelser skal beskrives nedenfor i tilknytning til figurene 23A, 23B og 23C.

Lyset i en enkelt puls fra kilden 702 skal nå spores gjennom sensorgruppen 700. En kildepuls fra kilden 702 blir avsendt og forplanter seg ned kildenedføringen 708 og gjennom 3x3-kopleren 710 til det felles trinnet 712 og til gruppen 716. Sammen tilveiebringer det felles trinnet 712 og de N trinnene 718(i) i gruppen 716 N+1 separate baner eller linjer for kildepulsene for å forplante seg til 2x2-kopleren 730. Siden det er N+1 separate baner for kildepulsen å forplante seg i, blir kildepulsen delt i N+1 separate pulser som passerer gjennom 2x2-kopleren 730 og forplanter seg ned forsinkelsessløyfenedføringen 740 til forsinkelsessløyfen 750. Etter å ha passert gjennom forsinkelsessløyfen 750 blir N+1 pulsene reflektert av reflektoren 752 og forplanter seg så tilbake gjennom forsinkelsessløyfen 750, ned forsinkelsessløyfenedføringen 740 til 2x2-kopleren 730 i den våte enden, fremdeles som

N+1 separate pulser. Hver av de N+1 pulsene blir igjen delt i N+1 pulser i det felles trinnet 712 og de N trinnene 718(i). Etter å ha passert tilbake gjennom det felles trinnet 712 og trinnene 718(i), blir de $(N-1)^2$ pulsene kombinert i 3x3-kopleren 710 og returnerer så ned detektornedføringene 770, 772 tilbake til den tørre enden hvor pulsene
 5 blir detektert av den første og andre detektoren 704, 706 og analysert.

Siden det er $(N+1)^2$ mulige separate kombinasjoner av baner eller linjer fra kilden 702 til reflektoren 752 og tilbake til detektorene 704, 706, er det $(N+1)^2$ returnerte pulser. De eneste pulser som vil interferere på en nyttbar måte er puls-par som forplanter seg i nøyaktig den samme banelengden, men i motsatt rekkefølge. For
 10 formålene med den følgende beskrivelse vil en puls bli identifisert av to tall, hvor det første tallet identifiserer banen som tas av pulsen fra kilden 702 til reflektoren 752, og det andre tallet identifiserer banen som tas av pulsen fra reflektoren 752 tilbake til detektorene 704, 706. For eksempel forplanter pulsen 0,1 seg gjennom et felles trinn (trinn 0) 712, så gjennom forsinkessløyfen 750, til reflektoren 752, tilbake gjennom
 15 forsinkessløyfen 750, og så gjennom trinn 718(1). Pulsen 1,0 forplanter seg først gjennom trinnet 718(1), så gjennom forsinkessløyfen 750, til reflektoren 752, tilbake gjennom forsinkessløyfen 750, og så gjennom det felles trinnet (trinn 0) 712. Siden avstanden som pulsen 0,1 har forplantet seg er identisk med avstanden som pulsen 1,0 har forplantet seg, interfererer pulsen 0,1 og pulsen 1,0 når de kombineres i 3x3-
 20 kopleren 710 og definerer derfor et fellesbane-interferometer (dvs. et foldet Sagnac interferometer) på samme måte som Sagnac interferometrene beskrevet ovenfor. Akustiske avfølingsresultater fra hydrofonen 722(1) er plassert i trinn 1 som responderer på akustisk modulasjon. De interfererende pulsene 0,1 og 1,0 møter hydrofonen 722(1) ved forskjellige tidspunkter, og henter således opp en faseforskjell
 25 pga. den tidsvarierende akustiske modulasjonen av hydrofonen 722(1). I 3x3-kopleren 710 blir denne faseforskjellen konvertert til en intensitetsmodulasjon som blir sendt ned detektornedføringene 770, 772 til detektorene 704,706. Den samme effekten opptrer for pulsene 0,2 og 2,0, for pulsene 0,3 og 3,0, etc.

Siden det foldede Sagnac interferometeret har en felles bane, kan kilden 702 ha
 30 en kort koherenslengde, hvilket betyr at interferens bare vil opptre mellom pulser som har forplantet seg nærmest i identiske baner. Pulsen i, j vil derfor interferere bare med pulsen j, i. Som angitt ovenfor, er det N interferometere av interesse (puls 0,i som interfererer med i,0 for i=1 til N). Det er også de mange andre interferometrene som ikke innbefatter det felles trinnet (trinn 0) 712 (for eksempel interfererer puls 1,2 med
 35 puls 2,1, puls 1,3 interfererer med puls 3,1, etc.). Slike interfererende pulser bidrar med støy i de nyttbare pulsene, og skal refereres til her som støypulser. Disse støypulsene fører to typer støy. Som med alle pulser, fører de tilleggsskuddstøy, ASE-signal

beatstøy (i en forsterket gruppe), fasestøy etc., som øker den påviste støyen. Støypulsene som danner et uønsket interferometer (puls 1,2 som interfererer med puls 2,1, etc.), fører også intensitetsmodulasjon pga. interferometrisk avføling av akustiske bølger. Denne intensitetsmodulasjonen er et uønsket signal og kan anses som en

5 støykilde. Det er viktig å merke seg at disse uønskede interferometrene har som deres interfererende punktkopplere 280(1) til 280(N) hvor trinnene 218(1) til 218(N) kobler til den første innmatings/utmatingsfiberens 714 av gruppen 716, mens signalpulsene interfererer ved 3x3-kopleren 710. Siden støypulsene interfererer før de når 3x3-

10 kopleren 710, blir intensitetsmodulasjon av støypulsene tilveiebrakt symmetrisk til begge detektorene 704 og 706. Signalpulsene som interfererer i 3x3-kopleren 710 frembringer imidlertid en asymmetrisk intensitetsmodulasjon. Ved å forsterke strømmene fra detektorene 704, 706 forskjellig, tilføyes derfor intensitetsmodulasjon av signalpulsene og intensitetsmodulasjonen til støypulsene subtraheres og således reduseres støybidraget til de uønskede interferometrene.

15 For fullstendig å eliminere all støyen tilføyd av disse støypulsene, kan pulsene av interesse separeres fra støypulsene ved å anvende et tidsdivisjonsmultipleksingsoppsett og på passende måte velge forsinkelseslengder. Spesielt er den optiske banelengden fra 3x3-kopleren 710 via det felles trinnet 712 til 2x2-kopleren 730 valgt til å korrespondere med en forplantningstid τ . Den optiske

20 banelengden til et fiberparti fra 3x3-kopleren til kopleren 780(1) via det første trinnet 718(1), til en korresponderende kopler 790(1), og til 2x2-kopleren 730, er valgt til å være $(N+1)\tau$. Et parti av den optiske banelengden er en felles bane fra 3x3-kopleren 710 til kopleren 780(1) og fra kopleren 790(1) til 2x2-kopleren 730, og et parti av den optiske banen er via trinnet 718(1). De optiske banelengdene via hvert av trinnene

25 718(i) er fortrinnsvis valgt til å være omtrent like. Den totale lengden optisk bane fra kopleren 780(1) til kopleren 780(2) og den optiske banen fra en kopler 790(2) til kopleren 790(1) er valgt til å være τ slik at den totale optiske banelengden fra 3x3-kopleren 710 til 2x2-kopleren 730 via det andre trinnet 712(2) er τ lenger enn den totale optiske banelengden fra 3x3-kopleren 710 til 2x2-kopleren 730 via det første trinnet

30 718(1) (dvs. at den totale optiske banelengden mellom de to kopleerne 710, 730 via det andre trinnet 718(2) er lik $(N+2)\tau$). Den totale ytterligere optiske banelengde for hver påfølgende er valgt til å være τ . Forplantningstiden for lys fra 3x3-kopleren 710 via et trinn 718(i) til 2x2-kopleren er således definert som forsinkelsestiden T_j til trinnet 718(i).

I samsvar med den foreliggende beskrivelsen bestemmes T_j av de optiske banelengdene via trinnene som følger:

$$T_j = \tau \quad i = 0 \quad (\text{for det felles trinnet 712})$$

$$T_j = (N+i)\tau \quad 1 \leq i \leq N \quad (\text{for hvert av avfølingstrinnene 718(1), 718(2), etc.})$$

5 Fra det forutgående kan det sees at den optiske banelengden gjennom det mest fjerne trinnet N er lik $(N+N)\tau$ eller $2N\tau$.

Varigheten til hver puls er valgt til ikke å bli mer enn τ . Som illustrert i figur 18 vil således den første pulsen 800 som returnerte til 3x3-kopleren 710 være pulsen som har forplantet seg gjennom det felles trinnet 712 (dvs. trinn 0) fra kilden 702 til
 10 reflektoren 752 og tilbake til detektorene 704, 706. Denne pulsen har en total forplantningstid på 2τ . (Ved sammenlikning av forplantningstider ignoreres forplantningstiden til hver puls til reflektoren 752 via forsinkelsessløyfen 750 og tilbake, siden forplantningstiden er felles for alle pulsene og ganske enkelt virker som en forskyvning (ikke vist) av tidsdiagrammet i figur 18). Det neste settet 810 av pulser
 15 returnert til detektorene 702, 706 er pulsene som forplanter seg gjennom det felles trinnet 712 i en retning og forplanter seg gjennom et avfølingstrinn 718(i) i den motsatte retningen (dvs. pulsene 0,1 og 1,0; 0,2 og 2,0; 0,3 og 3,0, til 0,N og N,0). Disse pulsene har respektive forplantningstider på $2\tau + N\tau$, $3\tau + N\tau$, $4\tau + N\tau$, til $(N+1)\tau + N\tau$. Alle de nyttbare pulsene blir således mottatt mellom et tidspunkt $(N+2)\tau$ og et tidspunkt
 20 $(2N+2)\tau$ (innbefattende varigheten τ til den siste mottatte pulsen). I motsetning til dette blir de interfererende pulsene som forplanter seg gjennom et avfølingstrinn 718(i) i begge retninger (dvs. pulsene 1,1, 1,2 og 2,1, 1,3 og 3,1 ... 2,2, 2,3 og 3,2 ... etc.) mottatt som et sett av pulser 820 mellom et tidspunkt $2(N+2)\tau$ og et tidspunkt $(4N+1)\tau$. Signalpulsene er således atskilt fra støypulsene.

25 I figur 18, for eksempel, er antallet returnerte pulser som funksjon av tiden opptegnet for $N = 50$. Som illustrert, mottas en enkelt puls i et tidspunkt 2τ . Deretter blir ingen pulser mottatt under intervallet 3τ til 52τ . Så fra 52τ til 102τ blir to pulser mottatt under hvert tidsintervall. Støypulsene returnerer så fra et tidspunkt 102τ til et tidspunkt 201τ . På denne måten blir signalpulsene separert i tid fra støypulsene, og således
 30 forhindres støypulsene i å tilføye støy til signalpulsene. Elektronikken (ikke vist) blir lett synkronisert til bare å se på pulsene som er mottatt mellom tidspunktet 52τ og tidspunktet 102τ .

En bør merke seg at kilden 702 kan aktiveres for å sende ut den neste pulsen ved tidsintervallet til 150τ i forhold til den tidligere pulsen siden 0τ til 50τ intervallet som
 35 respons på neste pulsen kan overlappes 150τ til 200τ intervallet av støypulser som returneres som respons på den tidligere kildepulsen. Et neste sett 830 av nyttige pulser

kan således begynne å ankomme i et tidspunkt 201. Derfor har utførelsen i figurene 17 og 18 en total driftssyklus på grovt $\frac{1}{3}$ for nyttbar signalinformasjon.

Fordelen med den foldete akustiske Sagnac fibersensoren 700, sammenliknet med Sagnac sløyfen illustrert i de tidligere figurene, er at forsinkelsesfiberen 750 er ufølsom for modulasjon. Pga. at nedføringene ofte er ganske lange og er utsatt for store bevegelser og vibrasjoner, er fordelt nedføringsoppheving en potensiell alvorlig begrensning på en akustisk Sagnac fibersensor. I den foldete akustiske Sagnac fibersensoren 700 er kilden 708 og detektornedføringene 770, 772 ufølsomme, siden de opptrer utenfor interferometeret. Forsinkessløyfenedføringen 740 er ufølsom siden alle de interfererende pulsene forplanter seg i denne samme fiberen separert av små tidsforsinkelser (omtrent 1 mikrosekund) og ser således de samme forstyrrelsene. Enhver lavfrekvens (mye mindre enn omtrent 1 MHz) modulasjon av forsinkessløyfenedføringen og selve forsinkessløyfen sees i hovedsaken lik av begge interfererende pulser og bidrar ikke til en faseforskjell. Gruppepartiet 716 og det felles trinnet 712 omfatter de eneste sensitive fibre i interferometeret 700.

Som vist i figur 17, kan de fjernpumpede, fordelte, erbiumdopete fiberforsterkerne (EDFA) 724 befinne seg ut gjennom gruppen 216 for å regenerere effekt, som beskrevet ovenfor.

3x3-kopleren 710 blir anvendt til passivt å forspenne hver sensor 722(i) nær kvadratur og for å tillate kildestøysubtraksjon. Støysubtraksjon resulterer av det faktum at hver detektor 704, 706 er forspent på en motstående helling (siden måten signalene kommer ut av 3x3-kopleren 710 faset i forhold til hverandre), og forårsaker fasemodulasjon til å påvirke intensiteten ved hver detektor asymmetrisk, mens kildeoverskuddsstøy symmetrisk påvirker intensiteten ved hver detektor. Ved å forsterke detektorutgangssignalene forskjellig, blir derfor de fasemodulasjonsinduserte intensitetsvariasjonene tilføyd og kildens intensitetsstøy subtrahert på den samme måte som signalene fra de uønskede interferometrene vil bli subtrahert.

Det må forstås med henvisning til figurene 17 og 18 at en tilsvarende tidsdivisjonmultipleksingseffekt kan oppnås ved å tilveiebringe en lengre optisk bane eller linjelengde gjennom det felles trinnet 712 og kortere optiske banelengder gjennom avfølingstrinnene 718(i). For eksempel kan det felles trinnet 712 med fordel være valgt til å ha en optisk banelengde på $2N\tau$ (dvs. $T_0 = 2N$), og de optiske banelengdene gjennom trinnene kan med fordel være valgt til å være $\tau, 2\tau, 3\tau, \dots N\tau$. Det forutgående kan oppsummeres som:

$$\begin{aligned} T_j &= 2N\tau & i &= 0 & & \text{(for det felles trinnet 712)} \\ T_j &= i\tau & 1 &\leq i \leq N & & \text{(for hvert av avfølingstrinnene 718(1), 718(2), etc.} \end{aligned}$$

Det første signalet som returnerer vil således ha en optisk forplantningstid (igjen subtraheres forplantningstiden gjennom forsinkelsessløyfen 750 som er felles for alle signalene) på 2τ som er tiden som er nødvendig for å passere gjennom det første trinnet 718(1) i begge retninger. Den lengste forsinkelsen til et signal som passerer gjennom et av avfølingstrinnene 718(i) i begge retninger er $2N$ for en signalpuls som forplanter seg i begge retninger gjennom det mest fjerne avfølingstrinnet 718(N). Det første nyttbare signalet som returnerer er et signal som er resultatet av interferensen til et signal som forplanter seg til reflektoren 752 gjennom det felles trinnet 712 og returnerer gjennom det første avfølingstrinnet 718(1) med et signal som forplanter seg til reflektoren 752 gjennom det første avfølingstrinnet 718(1) og returnerer via det felles trinnet 712. Interferenssignalet vil ankomme i et tidspunkt $(2N+1)\tau$ som er senere enn det siste uønskede signalet. Det siste nyttbare signalet vil ankomme i et tidspunkt $(2N+1)\tau$ (dvs. $3N\tau$). Sluttlig ankommer et signal frembrakt av en puls som forplantet seg til og fra reflektoren 752 i det felles trinnet 712 i et tidspunkt $4N\tau$, som er godt separert fra de nyttbare interferenssignalene.

Det er ønskelig at akustiske sensorer har et så stort dynamisk område (område med påvisbare akustiske modulasjonsamplituder) som mulig. Uten å bruke demodulasjonsteknikker slik som det fasegenererte bæreoppsettet, blir den minimale påvisbare fasemodulasjonen innstilt av støytytelsen til gruppen, og den maksimale påvisbare fasemodulasjonen (omtrent 1 rad) blir innstilt av den ikke-lineære responsfunksjonen til et interferometer. I en Mach-Zehnder sensor er mappingen av akustisk modulasjon til fasemodulasjon en funksjon av bare hydrofonens responsivitet. Disse grensene på den påvisbare fasemodulasjon sammen med denne mappingen av akustiske modulasjon i fasemodulasjon gir således området for akustisk modulasjon som sensoren kan påvise.

I en foldet akustisk Sagnac fibersensorgruppe er mappingen av akustisk modulasjon til fasemodulasjon en funksjon av både responsiviteten til hver av hydrofonene (sensorer) 722(i) og lengden til forsinkelsessløyfen 750. Ved således å endre lengden til forsinkelsessløyfen 750, kan det dynamiske området til sensorene 722(i) justeres uten å modifisere selve hydrofonene 722(i). Dersom i tillegg to reflektorer 742(1) og 752(2) blir brukt, kan hver sensor 718(i) ha to forskjellige forsinkelsessløyfer 750(1) og 750(2), som vist i en sensor 850 i figur 19. Dette gjør det mulig for hver sensor 722(i) å returnere to signaler som har forskjellig dynamiske områder, som beskrevet ovenfor med henvisning til figur 7 og 8, og derved i stor grad øke det totale dynamiske område til hver sensor 722(i). Straffen er en reduksjon i driftssyklus for hvert individuelle signal med en faktor på $1/(\text{antallet forsinkelsessløyfer})$.

Figur 20 illustrerer en sensor 900 som implementerer en fasenullingsteknikk tilsvarende teknikkene som har blitt brukt i fiberyroskoper.

Forsinkelsessløyfereflektoren 752 i figur 17 blir ikke brukt i sensoren 900 i figur 20. Snarere blir pulsene i stedet returnert via en returnedføring 310 inn i den tidligere ubrukte porten til 2x2-kopleren 730. En optisk isolator 912 er innført i returnedføringen 910 for å forhindre lys i å forplante seg i forsinkelsessløyfen 750 i begge retninger. Sensoren 900 i figur 20 oppfører seg identisk med sensoren 700 i figur 17 med reflektoren 752. Sensoren 900 tillater imidlertid tilføyelsen av en fasemodulator 920 som innføres i returnedføringen 910. Fasemodulatorens 920 blir aktivert for å tilføye en faseforskyvning til hver puls individuelt. Ved å mate den påviste faseforskyvningen inn i fasemodulatorens 920 via en differensialforsterker 922, blir faseendringer nullet ut, og den nødvendig påførte faseforskyvningen i fasemodulatorens 920 blir signalet. I denne fasenullingsfremgangsmåten er det dynamiske området til gruppen 900 begrenset bare av den maksimale faseforskyvningen som fasemodulatorens 920 kan tilveiebringe.

Figur 21 illustrerer en ytterligere alternativ utførelse av figur 19 hvori de to forsinkelsessløyvene 750(1) og 750(2) ikke er forbundet med den samme forsinkelsessløyfenedføringen. Snarere er den første ende av den første forsinkelsessløyfen 750(1) forbundet med den første forsinkelsessløyfenedføring 740(1), som er tilkoblet den fjerde porten av 2x2-kobleren 730, som i figur 19. Den andre enden av den første forsinkelsessløyfen 750(1) er koblet til den første reflektoren 752(1), som tidligere. Den første enden til den andre forsinkelsessløyfen 750(2) er koblet til den tredje porten av 2x2-kopleren 730 via en andre forsinkelsessløyfenedføring 740(2), og den andre enden av den andre forsinkelsessløyfen 750(2) er koblet til den andre reflektoren 752(2). Omtrent halvparten av lyset fra 2x2-kopleren 730 blir koblet til hver av nedføringene 740(1), 740(2). Lyset i hver nedføring 740(1), 740(2) blir forsinket i den respektive forsinkelsessløyfen 750(1), 750(2) og blir reflektert tilbake til 2x2-kopleren 730 som tidligere. Det reflekterte lyset blir koblet til det felles trinnet 712 og til gruppen 716. Forsinkelsene til forsinkelsessløyvene 750(1), 750(2) er valgt slik at ingen av de N+1 pulsene som forplanter seg fra den fjerde porten av 2x2-kopleren 730 gjennom den første forsinkelsessløyfen 750(1) overlapper i tid med noen av N+1 pulsene som forplanter seg fra den tredje porten av 2x2-kopleren 730 gjennom den andre forsinkelsessløyfen 750(2). I utførelsen i figur 21 tilveiebringes således en tilsvarende funksjonalitet som utførelsen i figur 19; men utførelsen i figur 21 anvender imidlertid lyset som ble koblet ut av den tredje porten av 2x2-kopleren 730 i figur 19 og forkastet.

Figur 22 illustrerer en alternativ utførelse av et fiberoptisk, akustisk sensorsystem 1000 som benytter en foldet Sagnac sensorgruppe. I systemet 1000 er en

kilde 1004 koblet til en første port av en 2x2 polarisasjonsoppretholdende kopler 1006 av en X-polarisator 1008. En detektor 1002 er tilkoblet en andre port av 2x2-kopleren 1006 via en X-polarisator 1010. En andre detektor (ikke vist) kan med fordel være innbefattet i utførelsen i figur 22 ved koble lys fra fiberen som fører til kilden 1004. X-polarisatoren 1008 sender bare lys fra kilden 1004 som har en første polarisasjon (for eksempel en X-polarisasjon). Den polarisasjonsoppretholdende kopleren 1006 mottar således lys som har en X-polarisasjon fra kilden 1004 og kobler lyset til et felles trinn 1020 via en tredje port og til en sensorgruppe 1022 via en fjerde port. Sensorgruppen 1022 har en tilsvarende struktur som sensorgruppen 716 i figur 17, og like elementer har blitt nummerert i samsvar med dette.

Det er å merke seg at de to X-polarisatorene 1008, 1010 kan erstattes av en eller flere X-polarisatorer i alternative lokaliseringer i systemet 1000.

Det felles trinnet 1020 er koblet via en X-polarisator 1030 til en første port av en andre polarisasjonsoppretholdende 2x2-kopler 1032. Lyset som forplanter seg til gruppen 1022 passerer først gjennom en depolarisator 1034 og så til en første innmatings/utmatingsfiber 714. Depolarisatoren 1034 kobler i hovedsak like mengder av det X-polariserte lyset til Y-polarisert lys og til Y-polarisert lys. Omtrent 50% av lyset forplanter seg således i gruppen 1022 som X-polarisert lys og omtrent 50% forplanter seg i gruppen 1022 som Y-polarisert lys.

Etter å ha passert gjennom trinnene i gruppen 1022 forplanter lyset seg via den andre innmatings/utmatingsfiberen 720 og en Y-polarisator 1040 til en andre port av den andre kopleren 1032. Y-polarisatoren tillater bare Y-polarisert lys å entre den andre kopleren 1032. Kopleren 1032 kombinerer lyset fra gruppen 1022 og fra det felles trinnet 1020. Omtrent halvparten av lyset som entrer kopleren 1032 koplet via en tredje port av kopleren 1032 til en lysabsorberende terminering 1042, og omtrent halvparten av lyset blir koplet til en nedføringsfiber 1050 som forplanter lyset til en første ende av en forsinkelsessløyfe 1052.

Lys passerer gjennom forsinkelsessløyfen 1052 til et Faradayspeil (FRM) 1054. Faradayspeilets 1054 virkemåte er velkjent og skal ikke beskrives detaljert.

Grunnleggende består denne i at når lys som faller inn på Faradayspeilet 1054 i en polarisasjon, blir det reflektert i den ortogonale polarisasjonen. Det Y-polariserte lyset som passerer gjennom det felles trinnet 1020 blir således reflektert som Y-polarisert lys, og det Y-polariserte lyset som passerte gjennom gruppen, blir reflektert som X-polarisert lys.

Det reflekterte lyset passerer tilbake gjennom forsinkelsen 1052 og entrer den fjerde porten av kopleren 1032. Lyset blir koplet til det felles trinnet 1020 og til gruppen 1022. X-polarisatoren 1030 i det felles trinnet passerer bare lyset i X-polarisasjonen

som opprinnelig ble forplantet gjennom gruppen 1022. Tilsvarende passerer Y-polarisatoren 1040 i gruppen 1022 bare Y-polarisert lys som opprinnelig ble forplantet via det felles trinnet 1020.

Etter å ha forplantet seg gjennom gruppen 1020 blir det returnerte Y-polariserte lyset depolarisert i depolarisatoren 1034 for å frembringe både X-polarisert lys og Y-polarisert lys. Lyset fra det felles trinnet 1020 entrer den tredje porten av koplere 1006, og lys fra depolarisatoren 1034 entrer den fjerde porten av koplere 1006. Lyset kombineres i koplere og det X-polariserte lyset fra de portene som har forplantet seg den optiske avstanden interfererer og blir koplet til den første og andre porten. Delen som blir tilkoblet den andre porten forplanter seg gjennom X-polarisatoren 1020 til detektoren 1002, hvor de interfererende signalene blir påvist.

Det må forstås at bare lyset som opprinnelig forplantet seg i forskjellige baner til å fra Faradayspeilet 1054 interfererer i koplere 1006. Det eneste lyset som tillates å forplante seg gjennom det felles trinnet 1020 i den reflekterte retningen, er X-polarisert lys som opprinnelig forplantet seg i gruppen 1022 som Y-polarisert lys. På tilsvarende måte er det bare lyset som tillates og forplante seg gjennom et av trinnene i gruppen 1022 i den reflekterte retningen y-polarisert lys opprinnelig forplantet seg i det felles trinnet 1020 som X-polarisert lys. Potensielt interfererende lys kan ikke forplante seg gjennom trinnene i begge retningene for å frembringe støysignalene beskrevet ovenfor i tilknytning til de ovenfor beskrevne utførelser. Hver av pulsene generert i gruppen 1022 fra den reflekterte pulsen som opprinnelig forplantet seg i det felles trinnet 1020, kan således interferere bare med en enkelt av pulsene som opprinnelig ble generert i gruppen 1022 og som ble forplantet i det felles trinnet 1020 etter at det var reflektert. Det er således ikke nødvendig i utførelsen i figur 22 å innbefatte tilleggsforsinkelser for å separere de nyttbare signalpulsene fra støypulser.

Figurene 23A, 23B og 23C illustrerer ytterligere alternative utførelser av den foreliggende oppfinnelsen. En sensorgruppe 1100 i utførelsen i figur 23A, 23B og 23C er tilsvarende sensorgruppen 700 i utførelsen i figur 17, og like elementer er blitt nummerert i samsvar med dette. Utførelsene i figur 23A, 23B og 23C innbefatter en ikkepolarisert kilde 1102. 2x2-koplere 730 i figur 17 er erstattet med en polarisasjonsstrålesplitter (PBS) 1104 i figurene 23A, 23B og 23C. Bruken av polarisasjonsstrålesplitteren 1104 sparer omtrent 6 dB effekt, sammenliknet med koplere 730 i figur 17 og koplere 1130 i figur 22. Reflektoren 752 i figur 17 er erstattet med et Faradayspeil (FRM) 1106 som er tilsvarende Faradayspeilet 1054 i figur 22. 3x3-koplere 710 i figur 23A, 23B og 23C behøver ikke være en polarisasjonsopprettholdende kopler.

Hver av figurene 23A, 23B og 23C innbefatter en depolarisator 1110. I figur 23A er depolarisatoren 1110 anordnet på den første gruppeinnmatings/utmatingsfiberen 714. I figur 23B er depolarisatoren 1110 anordnet på det felles trinnet 712. I figur 23C er depolarisatoren 1110 anordnet på den andre gruppeinnmatings/utmatingsfiberen 720.

5 I utførelsen på figur 23A entrer lys fra den ikkepolariserte kilden 1102 3x3-kopleren 710 og blir koplet i omtrent like deler til det felles trinnet 712 og til den første gruppeinnmatings/utmatingsfiberen 714. Som beskrevet ovenfor i tilknytning til figurene 3 og 17, tilveiebringer bruken av 3x3-kopleren passiv forspenning nær kvadratur. Lyset som forplanter seg i den første gruppeinnmatings/utmatingsfiberen 714
10 passerer gjennom depolarisatoren 1110, som har effekten som forårsaker at omtrent halvparten av lyset entrer gruppen i en polarisering (for eksempel X-polariseringen) for å koples inn i den ortogonale polariseringen (for eksempel Y-polarisering), og likeledes halvparten av lyset som entrer gruppen i Y-polariseringen til å bli koplet til X-polariseringen. Etter depolarisatoren 1110 har således halvparten av lyset i X-
15 polariseringen sin opprinnelse i X-polariseringen og den andre halvparten av lyset i X-polariseringen sin opprinnelse i Y-polariseringen. Etter depolarisatoren 1110 har likeledes halvparten av lyset i Y-polariseringen sin opprinnelse i Y-polariseringen og den andre halvparten av lyset i Y-polariseringen sin opprinnelse i X-polariseringen. På effektiv måte sammenblender depolarisatoren 1110 det ikkepolariserte lyset.

20 Lyset passerer gjennom gruppen 716 på måten beskrevet ovenfor i tilknytning til de andre utførelsene. Lyset som slipper ut av gruppen 716 forplanter seg gjennom den andre gruppeinnmatings/utmatingsfiberen 720 til en første port 1121 av polarisasjonsstrålesplitteren 1104. Polarisasjonsstrålesplitteren 1104 deler det innfallende lyset i de to ortogonale polariseringene (dvs. X-polariseringen og Y-polarisering). For beskrivelsesformål antas det at polarisasjonsstrålesplitteren 1104
25 virker som et polarisasjonsavhengig speil orientert i 45° , hvor lyset som entrer den første porten 1121 i en polarisering (for eksempel X-polariseringen) blir reflektert til en andre port 1122 og lys som entrer den første porten 1121 i den andre polariseringen (for eksempel Y-polariseringen) blir sendt til en tredje port 1123. I den viste utførelsen blir
30 lyset som slipper ut av den andre porten 1122 ikkereflekterende absorbert av termineringen 732. Det Y-polariserte lyset som slipper ut av den terminalen 1123 forplanter seg gjennom forsinkelsessløyfeneføringsfiberen 740, gjennom forsinkelsessløyfen 750 til Faradayspeilet 1106. Det er å merke seg at dette Y-polariserte lyset fra gruppepartiet 716 har forplantet seg gjennom depolarisatoren 1110
35 og halvparten av det var opprinnelig X-polarisert lys og halvparten av det var opprinnelig Y-polarisert lys. Som beskrevet ovenfor, forårsaker Faradayspeilet 1106 at

det innfallende lyset blir koblet til den ortogonale polariseringen. Det Y-polariserte lyset blir således koplet til X-polarisasjon.

Det X-polariserte lyset reflektert av Faradayspeilet 1106, passerer gjennom forsinkelsessløyfen 750 og forsinkelsessløyfenedføringsfiberen 740 tilbake til den tredje porten 1123 av polarisasjonsstrålesplitteren. Siden lyset nå er i X-polarisasjonen, blir lyset reflektert til en fjerde port 1124, snarere enn å bli sendt til den første porten 1121. Det Y-polariserte lyset som opprinnelig falt inn på polarisasjonsstrålesplitteren fra gruppen 716, blir således koplet til det felles trinnet 712 for å forplante seg til 3x3-kopleren 710 i X-polarisasjonen.

Ikkepolarisert lys som forplanter seg fra 3x3-kopleren 710 til polarisasjonsstrålesplitteren 1104 via det felles trinnet 712, entrer polarisasjonsstrålesplitteren 1104 via den fjerde porten 1124. Komponentene til lyset i Y-polarisasjonen blir sendt til andre port 1122 og blir ikkereflekerende terminert av termineringen 732. Lysets komponenter i X-polarisasjonen blir reflektert til den tredje porten 1123 og forplanter seg til Faradayspeilet 1106 via forsinkelsessløyfenedføringsfiberen 740 og forsinkelsessløyfen 750. (Grunnen for å innbefatte depolarisatoren 1110 kan nå forstås. Siden bare det X-polariserte lyset fra det felles trinnet 712 blir koplet til forsinkelsessløyfenedføringsfiberen 740, sikrer depolarisatoren 1110 at lyset koplet fra gruppen 716 til forsinkelsessløyfenedføringsfiberen 740 også innbefatter noe lys som opprinnelig var X-polarisert). Faradayspeilet 1106 reflekterer lyset som Y-polarisert lys, og det Y-polariserte lyset forplanter seg gjennom forsinkelsessløyfen og nedføringsfiberen til den tredje porten 1123 av polarisasjonsstrålesplitteren 1104.

Det Y-polariserte lyset som faller inn på den tredje porten 1123 av polarisasjonsstrålesplitteren 1104 blir sendt til den første porten 1121 og således til den andre gruppeinnmatings/utmatingsfiberen 720. Det Y-polariserte lyset forplanter seg gjennom gruppen 716 til den første gruppeinnmatings/utmatingsfiberen 714 og passerer så gjennom depolarisatoren 1110 til 3x3-kopleren 710. Depolarisatoren 1110 virker slik at den konverterer omtrent 50% av det Y-polariserte lyset til X-polarisert lys. Det X-polariserte lyset fra depolarisatoren 1110 interfererer med det X-polariserte lyset fra det felles trinnet 712. Det resulterende kombinerte lyset blir påvist av detektoren 704 eller detektoren 706 i samsvar med faseforholdet mellom de interfererende lyssignalene i 3x3-kopleren 710.

Det er å merke seg at det X-polariserte lyset som faller inn på 3x3-kopleren 710 fra depolarisatoren 1110 og det X-polariserte lyset fra det felles trinnet 712 forplanter seg identiske banelengder. For eksempel forplanter lys som forplanter seg gjennom det felles trinnet 712 først seg i X-polarisasjonen gjennom det felles trinnet 712 og så

forplanter det seg gjennom gruppen 716 i Y-polarisasjonen. På den annen side forplanter lyset som forplanter seg gjennom gruppen 716 først i Y-polarisasjonen gjennom gruppen 716 og forplanter seg så i X-polarisasjonen gjennom det felles trinnet. Siden de to "motforplantende" lyssignalene er i de samme polarisasjonene når de

5 forplanter seg gjennom de korresponderende delene av den interferometriske banen, er forplantningslengdene identiske, unntatt for innvirkningen av innfallende støy avfølt av gruppen 716.

Det må forstås at terminatoren 732 koplet til den andre porten 1122 av polarisasjonsstrålesplitteren 1104, kan erstattes med en andre forsinkessløyfe (ikke vist) og et andre Faradayspeil (ikke vist) for å tilveiebringe en andre interferometrisk

10 bane for lyset som interfererer i X-polarisasjonen. Ved å justere forsinkelsen tilveiebrakt av den andre forsinkessløyfen, kan retursignalene fra den andre interferometriske banen utelukkes fra overlapping med retursignalene fra den første interferometriske bane.

Utførelsen i figur 23B tilsvare utførelsen i figur 23A, unntatt for at depolarisatoren 1110 er anordnet i det felles trinnet 712. Virkningen av depolarisatoren 1110 i figur 23B er (1) å forårsake at en del av lyset i det felles trinnet 712 som returneres fra polarisasjonsstrålesplitteren 1104 i en enkelt polarisasjon (for eksempel X-polarisasjon) blir koplet til den ortogonale polarisasjonen og (2) å sammenblende det

20 ikkepolariserte lyset som forplanter seg fra 3x3-kopleren 710 gjennom det felles trinnet 712 mot polarisasjonsstrålesplitteren 1104. Dett sikrer at lyset interfererer når det recombines i 3x3-kopleren 710 (den samme grunnen til at depolarisatoren 1110 ble tilføyd fiberen 714 i figur 23A).

Utførelsen i figur 23C tilsvare også utførelsen i figur 23A, unntatt for at depolarisatoren 1110 er anordnet i den andre gruppeinnmatings/utmatingsfiberen 720. Utførelsen i figur 23C er funksjonelt ekvivalent med utførelsen i figur 23A, siden det ikke spiller noen rolle hvorvidt lyset passerer gjennom gruppepartiet 716 og så passerer gjennom depolarisatoren 1110 og så passerer gjennom gruppepartiet 716. Funksjonen til utførelsen i figur 23C er således hovedsakelig den samme som funksjonen til utførelsen

30 i figur 23A, som beskrevet ovenfor.

Figur 24 illustrerer en ytterligere alternativ utførelse av den foreliggende oppfinnelsen, hvori en foldet Sagnac sensorgruppe 1200 innbefatter polarisasjonsstrålesplitteren (PBS) 1104. Faradayspeilet (FRM) 1106 og depolarisatoren 1110 tilkobles som vist i gruppen 1100 i figur 23A. Andre komponenter fra figur 23A er

35 også nummerert som tidligere. Til forskjell fra gruppen 1100 i figur 23A som har 3x3-kopleren 710, har den foldede Sagnac sensorgruppen 1200 en polarisasjonsopprettholdende (PM) 2x2-kopler 1220 forbundet på samme måte som

2x2-kopleren 1006 i figur 22. En port av 2x2-kopleren 1220 er tilkoblet en første port av en optisk sirkulator 1222 via en første polarisator 1224. En andre port av den optiske sirkulatoren 1222 er forbundet med en første detektor 1226. En tredje port av den optiske sirkulatoren 1222 er tilkoblet en ikkepolarisert kilde 1228 (for eksempel en intensitetsmodulert superfluorescenderende fiberkilde). En andre port av 2x2-kopleren 1220 er tilkoblet en andre detektor 1230 via en andre polarisator 1232. Detektorene 1226 og 1230 og den ikkepolariserte kilde 1228 er tilkoblet sirkulatoren 1222 ved hjelp av standard (ikke polarisasjonsopporettholdende) fibre. Polarisatorene 1224 og 1232 er koblet til den polarisasjonsopporettholdende kopleren 1220 via den polarisasjonsopporettholdende fiberen, slik at polarisatorene 1224, 1232 flukter med en felles akse til den polarisasjonsopporettholdende 2x2-kopleren 1220. Alternativt, dersom en polarisasjonskilde blir brukt i stedet for den ikkepolariserte kilden 1228, er den polariserte kilden (ikke vist) tilkoblet en polarisasjonsopporettholdende sirkulator (ikke vist) ved hjelp av polarisasjonsopporettholdende fiber, og den polarisasjonsopporettholdende sirkulatoren er tilkoblet polarisatoren 1224 ved hjelp av polarisasjonsopporettholdende fiber. De polarisasjonsopporettholdende komponentene er tilkoblet slik at det polariserte lyset fra kilden passerer gjennom polarisatoren 1224. Forbindelsene fra den polarisasjonsopporettholdende sirkulatoren til detektorene 1226 og 1230 er tilveiebrakt ved hjelp av standard (ikke polarisasjonsopporettholdende fibre).

Den foldede Sagnac sensorgruppen 1200 innbefatter videre en ikke-resiprok faseskifter 1250. Faseskifteren 1250 er tilkoblet det felles trinnet 712 via en første optisk fiber 1252 som har en første ende 1254 og en andre ende 1256 og via en andre optisk fiber 1258 som har en første ende 1260 og en andre ende 1262. Den første enden 1254 av den første optiske fiberen 1252 er tilkoblet det felles trinnet 712 nær 2x2-kopleren 1220 via en første kopler 1264. Den første ende 1260 av den andre optiske fiberen 1258 er tilkoblet det felles trinnet 712 nær polarisasjonsstrålesplitteren 1104 via en andre kopler 1266. De respektive andre endene 1256, 1262 til den første og andre optiske fiberen 1252, 1258 er koplet til faseskifteren 1250, som beskrevet nedenfor i tilknytning til figur 25 og 26.

Det felles trinnet 712, den første fiberen 1252 og den andre fiberen 1258 er fortrinnsvis polarisasjonsopporettholdende fibre (PM), og den første kopleren 1264, den andre kopleren 1266 og 2x2-kopleren 1220 er polarisasjonsopporettholdende (PM) koplere. Den første kopleren 1264 og den andre kopleren 1266 er også fortrinnsvis 50/50-koplere, som kopler omtrent 50% av lyset som entrer det felles trinnet 712 i hver retning til faseskifteren 1250, mens omtrent 50% av lyset forblir i det felles trinnet. Den ikke-resiproke faseskifteren 1250 og de tilordnede fibre, danner således et andre trinn 1268 i parallell med det felles trinnet 712.

Et av trinnene 712, 1268 (for eksempel det felles trinnet 712) innbefatter fortrinnsvis et forsinkelselement (for eksempel en forsinkelsessløyfe 1269) som innfører en tidsforsinkelse i et trinn som er tilstrekkelig til å forhindre at pulsene, som forplanter seg gjennom trinnene, overlapper hverandre. Lyset som returnerer til 2x2-
 5 koplern 1220 fra sensorgruppen 716 omfatter således to pulser for hver sensor som er atskilt i tid fra hverandre. En puls omfatter det kombinerte lyset som passerer gjennom det felles trinnet 712 i hver retning. Den andre pulsen omfatter det kombinerte lyset som passerer gjennom den ikke-resiproke faseskifteren 1250 i hver retning. Det må forstås at lyspulsene som passerer gjennom faseskifteren 1250 i en retning og lyspulsene som
 10 passerer gjennom det felles trinnet 712 i den andre retningen har vesentlig forskjellige forplantningstider og vil ikke overlape hverandre i koplern 1220. De vil således ikke interferere.

Lyset som passerer gjennom det fellestrinnet 712 i en retning gjennomgår ingen faseforskyvning i felles trinnet 712 i forhold til lyset som passerer gjennom det felles
 15 trinnet i den andre retningen. Det kombinerte lyset som passerer gjennom det felles trinnet 712 i begge retninger har således en relativ faseforspenning på 0. Som beskrevet nedenfor, fører imidlertid den ikke-resiproke faseskifteren 1250 til en forskyvning eller et skifte av lyset i en retning i forhold til lyset i den andre retningen. I en foretrukket utførelse innfører faseskifteren 1250 spesielt en relativ $\pi/2$ -faseforskyvning mellom
 20 lyset i de to retningene. Lyset som entrer koplern 1220 som har forplantet seg gjennom faseskifteren 1250 i begge retninger, vil således kombineres i koplern 1220 med en $\pi/2$ -faseforspenning.

En fagkyndig på området vil forstå at 50% koplern 1220 i den interferometriske konfigurasjonen som vist i figur 24, kople returnerende lys til utgangsporten
 25 korresponderende til den opprinnelige innmatingsporten når det returnerende lyset ved de to innmatingsportene interfererer i koplern og har relativ faseforskjell på 0, 2π , 4π , etc., og kople returnerende lys til den andre utgangsporten når lyset har en relativ faseforskjell på π , 3π , 5π , etc. Når det returnerende lyset har en relativ faseforskjell som ikke er et multippel av π , blir en del av det returnerende lyset sendt ut fra begge portene.
 30 Når for eksempel den relative faseforskjellen er en odd multippel av $\pi/2$ (for eksempel $\pi/2$, $3\pi/2$, etc.), blir omtrent 50% av det returnerende lyset kople til hver utgangsport. Ved å tilveiebringe to uavhengige forplantningsbaner mottar hver detektor 1226, 1230 to signaler som er atskilt i tid og derfor kan påvises separat. Et signal har en 0 faseforspenning, og et signal har en $\pi/2$ faseforspenning slik at når et signal er minst
 35 sensitivt for pertubasjon, er det andre signalet mest sensitivt for pertubasjon, og omvendt. Det må forstås at ytterligere trinn i parallell med det felles trinnet 712 og med

forskjellige mengder relativ faseforskyvning, kan bli innbefattet for å tilveiebringe pulser med forskjellig faseforspenning.

Figur 25 illustrerer en alternativ konfigurasjon av en foldet Sagnac sensorgruppe 1200', som i hovedsak er tilsvarende den foldete Sagnac sensorgruppen 1200 i figur 24. I den foldete Sagnac sensorgruppen 1200' i figur 25 befinner depolarisatoren 1110 seg i den andre gruppeinnmatings/utmatingsfiberen 720, snarere enn i den første gruppeinnmatings/utmatingsfiberen 714. På grunn av den resiproke strukturen til sensorgruppen 716, endrer ikke relokaliseringen av depolarisatoren 1110 til fiberen 720 den totale virkemåten til den foldete Sagnac sensorgruppen 1200' i forhold til virkemåten til den foldete Sagnac sensorgruppen 1200. Virkemåten eller operasjonen til den foldete Sagnac sensorgruppen 1200' vil ikke bli beskrevet i detalj heri.

Utførelse i figur 24 og 25 innbefatter sensorgruppen 716, som ble beskrevet detaljert ovenfor. det må forstås at andre konfigurasjoner av forsterkede sensorgrupper også kan anvendes i stedet for sensorgruppen 716 i utførelsene i figur 24 og 25.

Figur 26 illustrerer en første foretrukket utførelse av den ikke-resiproke $\pi/2$ -faseskifteren 1250 i figur 24 og 25. Som illustrert i figur 26, omfatter faseskifteren 1250 en første kollimeringslinse 1270, en første 45° Faraday-rotator 1272, en kvartbølgeplate 1274, en andre 45° Faraday-rotator 1276, og en andre kollimeringslinse 1278. I den illustrerte utførelsen omfatter den første Faradayrotatoren 1272, den andre Faradayrotatoren 1276 og kvartbølgeplaten 1274 bulkoptiske anordninger som er kommersielt tilgjengelige, men kan med fordel omfatte fiberoptikk eller andre bølgelederanordninger. Kollimeringslinsene 1270, 1278 er anordnet nær andre ender 1256, 1262 av PM-fibrene 1252, 1258 for å fokusere lys fra fiberendene 1256, 1262 på de respektive Faradayrotatorene 1272, 1276, og for å fokusere lys fra Faradayrotatorene 1272, 1276 inn i fibrene 1256, 1262. hver av Faradayrotatorene 1272, 1276 virker på velkjent måte for å bringe lys matet inn i Faradayrotatoren med dets polarisasjon i en bestemt vinkel til å få polarisasjonen rotert slik at polarisasjonen er i en ny vinkel, rotert ved en forutbestemt mengde i forhold til den opprinnelige vinkel. I den foretrukne utførelsen roterer for eksempel hver Faradayrotator 1272, 1276 polarisasjonen til det innfallende lyset med 45° i retning mot klokken (ccw). Som illustrert i figur 26 vil således lys utsendt fra enden 1256 av PM-fiberen 1252 som har sin polarisasjon orientert horisontalt, blir rotert 45° mot klokken i den første Faradayrotatoren 1272, slik at polarisasjonen er orientert i en vinkel på 45° i retning med klokken i forhold til den opprinnelige orienteringen når det slipper ut fra den første Faradayrotatoren 1272.

Kvartbølgeplaten 1274 er anordnet mellom de to Faradayrotatorene 1272, 1276. Kortbølgeplaten 1274 har den første dobbeltbrytende akse 1280 og en ortogonal andre dobbeltbrytende akse 1282. Lys som forplanter seg i en polarisasjon orientert langs en

dobbeltbrytende akse (for eksempel den første dobbeltbrytende akse 1280) har en treger forplantningshastighet enn lyset som forplanter seg i en polarisasjon orientert langs den andre dobbeltbrytende aksen (for eksempel den andre dobbeltbrytende aksen 1282). Kwartbølgeplaten 1274 er orientert slik at for eksempel den første

5 dobbeltbrytende aksen 1280 er orientert i 45° med klokken i forhold til vertikalretningen, og er derfor orientert slik lyset som slipper ut fra den første Faradayrotatoren 1272 er orientert langs den første dobbeltbrytende aksen 1280 og er ortogonal på den andre dobbeltbrytende aksen 1282. På grunn av forskjellen i forplantningshastigheter langs de to aksene innfører kvartbølgeplaten 1274 en $\pi/2$ eller

10 90° faseforskyvning i lyset polarisert langs den første dobbeltbrytende aksen 1280 med hensyn til lyset polarisert langs den andre dobbeltbrytende aksen 1282. I samsvar med dette eksemplet blir således lyset som opprinnelig forplantet seg i den horisontale polarisasjonen som ble orientert til å være fluktende med den første dobbeltbrytende aksen 1280, utsatt for en relativ faseforskyvning på 90° i forhold til lys som forplanter

15 seg langs den andre dobbeltbrytende aksen 1282.

Etter å ha passert gjennom kvartbølgeplaten 1274 passerer lyset gjennom den andre Faradayrotatoren 1276 og blir igjen rotert 45° i retning mot klokken. Lyset som slipper ut fra den andre Faradayrotatoren 1276 passerer gjennom den andre kollimeringslinsen 1278 og blir fokusert inn i den andre enden 1262 av den andre

20 optiske PM-fiberen 1258. Det må forstås av den forutgående beskrivelsen at lys utsendt fra den første optiske PM-fiberen 1252 i den horisontale polarisasjonen entrer den andre optiske PM-fiberen 1258 i den vertikale polarisasjonen. Som beskrevet ovenfor vil lyset som entrer den andre optiske PM-fiberen 1258 i den vertikale polarisasjonen ha forplantet seg langs den trege, dobbeltbrytende aksen 1280 til kvartbølgeplaten 1274 og

25 vil bli utsatt for en relativ $\pi/2$ -faseforskjell i forhold til lys som forplanter seg langs den hurtige, dobbeltbrytende aksen 1282.

Som indikert ved dets beskrivelse, virker den ikke-resiproke faseskifteren 1250 på en ikke-resiprok måte pga. virkemåten eller operasjonen til Faradayrotatorene 1272, 1276. Som beskrevet ovenfor blir lyset som passerer gjennom Faradayrotatorene 1272, 1276 fra den første PM-fiberen 1252 til den andre PM-fiberen 1258, rotert 45° mot

30 klokken av hver rotator i forhold til forplantningsretningen til lyset vist i figur 25. Dersom Faradayrotatorene var resiproke, ville lys som forplantet seg gjennom Faradayrotatorene 1272, 1276 i den motsatte retningen, også bli rotert i retningen mot klokken i forhold til forplantningsretningen til lyset, men siden Faradayrotatorene ikke

35 er resiproke vil imidlertid lyset bli rotert i den motsatte retning (dvs. med klokken i forhold til forplantningsretningen til lyset). Den ikke-resiproke effekten er illustrert i figur 27 for lys som passerer fra den andre enden 1262 av den andre PM-fiberen 1258,

gjennom den ikke-resiproke faseskifteren 1250, til den andre enden 1256 av den første PM-fiberen 1252. Det er å merke seg at man betrakter figur 27, viser rotasjonen seg igjen å være i retningen mot klokken, men lyset forplanter seg nå imidlertid mot observatøren. Lys utsendt fra den andre enden 1262 av den andre optiske PM-fiberen 1258 i den vertikale polarisasjonen, passerer således gjennom den andre kollimeringslinsen 1278 og gjennom den andre Faradayrotatoren 1276 og blir rotert til en orientering som flukter med den andre (hurtige) dobbeltbrytende aksens 1282 av kvartbølgeplaten 1274. Lyset som opprinnelig var i den vertikale polarisasjonen, blir således ikke utsatt for en relativ forsinkelse mens det forplanter seg gjennom kvartbølgeplaten 1274. Etter å ha passert gjennom kvartbølgeplaten 1274, passerer lyset gjennom den første Faradayrotatoren 1272, slik at lyset blir rotert ytterligere 45° til den horisontale polarisasjonen. Lyset blir så fokusert gjennom den første kollimeringslinsen 1270 på den andre enden 1256 av den første optiske PM-fiberen 1252.

Av det forutgående kan det ses at det horisontalt polariserte lyset som passerer i den første retningen fra den første PM-fiberen 1252 til den andre PM-fiberen 1258 via den ikke-resiproke faseskifteren 1250, forplanter seg gjennom den trege dobbeltbrytende aksens 1280 av kvartbølgeplaten 1274 og blir utsatt for en relativ faseforsinkelse på 90° eller $\pi/2$. Det horisontalt polariserte lyset som forplanter seg i den første retningen blir rotert slik at lyset blir orientert i den vertikale polarisasjonen når det entrer den andre PM-fiberen 1258. I motsetning til dette vil vertikalt polarisert lys som passerer fra den andre PM-fiberen 1258 til den første PM-fiberen 1252 via den ikke-resiproke faseskifteren 1250 i den andre retningen, forplanter seg gjennom den hurtige dobbeltbrytende aksens 1282 av kvartbølgeplaten 1274 og blir ikke utsatt for en relativ faseforsinkelse. Det vertikalt polariserte lyset som forplanter seg i den andre retningen roteres slik at lyset blir orientert i den horisontale polarisasjonen når det entrer den første PM-fiberen 1252. Slik det skal beskrives mer fullstendig nedenfor, tilveiebringer den relative faseforskyvningen mellom det horisontalt polariserte lyset som forplanter seg i den første retningen en $\pi/2$ faseforspenning i forhold til det vertikalt polariserte lyset som forplanter seg i den andre retningen.

Figurene 28 og 29 illustrerer en alternativ utførelse av den ikke-resiproke faseskifteren 1250 hvor den første Faradayrotatoren 1272 er anordnet mellom kvartbølgeplaten 1274 (nå referert til som den første kvartbølgeplaten) og en andre kvartbølgeplate 1294. I figur 28 blir lys fra den andre enden 1256 som den første PM-fiberen 1252 kollimert av den første kollimeringslinsen 1270, som ovenfor. Lyset er opprinnelig i den horisontale polarisasjonen. Når lyset passerer gjennom den første kvartbølgeplaten 1274, blir det omformet til lys som har en sirkulær polarisasjon. Det sirkulært polariserte lyset passerer gjennom den første Faradayrotatoren 1272, som

bringer det sirkulært polariserte lyset til å utsettes for en faseforskyvning ϕ . I den foretrukne utførelse er den første Faradayrotatoren 1272 valgt til å forårsake en faseforskyvning på $\pi/4$. Lyset fra Faradayrotatoren 1272 forblir sirkulært polarisert og passerer gjennom den andre kvartbølgeplaten 1294, som omformer det sirkulært polariserte lyset til lineært polarisert lys i den vertikale polarisasjonsorienteringen. I tillegg til å være i den vertikale polarisasjonen har lyset blitt utsatt for en faseforskyvning på ϕ (for eksempel $\pi/4$).

Figur 29 illustrerer virkemåten til den alternative utførelsen av den ikke-resiproke faseskifteren 1250 for lys som forplanter seg i den motsatte retningen. I figur 29 blir vertikalt polarisert lys fra den andre enden 1262 av den andre PM-fiberen 1260 kollimert av den andre kollimasjonslinsen 1278 og passerer gjennom den andre kvartbølgeplaten 1294. Den andre kvartbølgeplaten 1294 omformer det vertikalt polariserte lyset til lys som har en sirkulær polarisasjon. Det sirkulært polariserte lyset passerer gjennom den første Faradayrotatoren 1272 og blir utsatt for en faseforskyvning som tidligere. Siden lyset forplanter seg gjennom den første Faradayrotatoren 1272 i den motsatte retningen, blir lyset utsatt for en motsatt faseforskyvning på $-\phi$ (for eksempel $-\pi/4$). Lyset fra den første Faradayrotatoren 1272 passerer sp gjennom den første kvartbølgeplaten 1274, hvor det sirkulært polariserte lyset blir omformet til lineært polarisert lys med en horisontal polarisasjon. Lyset som forplanter seg i de to retningene blir således utsatt for en total relativ faseforskyvning på 2ϕ (for eksempel $\pi/2$), som har den samme effekten som den første utførelsen av den ikke-resiproke faseskifteren 1250 illustrert i figurene 26 og 27.

Effekten eller virkningen av den ikke-resiproke faseskifteren 1250 på orienteringen av polarisasjonen og faseforsinkelsen tilveiebringer forspenningseffekten beskrevet ovenfor og forklart igjen i tilknytning til figur 24. Som vist i figur 24, blir lyset som entrer den andre PM-fiberen 1258 i den vertikale polarisasjonen, kombinert i den andre PM-kopleren 1266 med lyset som forplantet seg gjennom det felles trinnet 712 fra det første PM-kopleren 1264 til den andre PM-kopleren 1266. Av grunner som vil bli åpenbare, på bakgrunn av den etterfølgende beskrivelsen, er det ønskelig at lyset som entrer den andre PM-kopleren 1266 fra det felles trinnet 712 har den samme polarisasjonen som lyset som entrer den andre PM-kopleren fra den andre PM-fiberen 1258. I den foretrukne utførelse blir således enten den andre PM-fiberen 1258 eller det felles trinnet 712 rotert 90° slik at lyset i den vertikale polarisasjonen i den andre PM-fiberen 1258 blir orientert i den samme retningen som lyset i den horisontale polarisasjonen av det felles trinnet 712. Dette blir enkelt besørget ved å rotere den andre enden 1262 av den andre PM-fiberen 1258 nær den andre kollimeringslinsen 1278, slik at det vertikalt polariserte lyset entrer den andre enden 1262 med dets

polarisasjonstilstand orientert langs den horisontale polarisasjonsaksen til den andre PM-fiberen 1258. Lyset som slipper ut av den ikke-resiproke faseskifteren i den vertikale polarisasjonstilstanden blir således påtrykket koplere 1266 som lys i den horisontale polarisasjonstilstanden med hensyn til polarisasjonsaksene til koplere 1266. Følgelig har lyset fra den ikke-resiproke faseskifteren 1250 den samme polarisasjonstilstanden som lyset fra det felles trinnet 712.

Lyset som passerer gjennom det felles trinnet 712 og lyset som passerer gjennom den ikke-resiproke faseskifteren 1250 entrer så porten 1124 av polarisasjonsstrålesplitteren (PBS) 1104. Lyset i den horisontale polarisasjonen blir utsendt fra porten 1123 av PBS 1104 til fiberen 740. Fiberen 740 innbefatter forsinkelsessløyfen 750 og er terminert i Faradayspeilet (FRM) 1106. Forsinkelsessløyfen 750 og FRM 1106 virker som beskrevet ovenfor, og de reflekterte og forsinkede pulsene blir returnert til porten 1123 av PBS 1104 i den vertikale polarisasjonen. Pulsene blir utsendt fra porten 1121 av PBS 1104 til gruppen 716 via fiberen 720 og forplanter seg i retning med klokken gjennom sensorene 722(i) til gruppen 716.

Pulsene blir utsendt fra gruppen 716 via fiberen 714 og depolarisatoren 1110 til 2x2-koplere 1220 hvor lyset som forplanter seg med klokken blir kombinert med lyset som forplanter seg mot klokken. Lyset som forplanter seg mot klokken starter også opp som horisontalt polarisert lys. Lyset blir depolarisert og passerer gjennom sensorgruppen 716. Lys som slipper ut fra sensorgruppen 716 i den vertikale polarisasjonen blir reflektert av PBS 1123 og kastet via porten 1122 og terminatoren 732. Lys som slipper ut fra sensorgruppen 716 i den horisontale polarisasjonen passerer gjennom PBS 1123, er forsinket av sløyfen 750, og er rotert til den vertikale polarisasjonen av FRM 1106. Returlyset som er i den vertikale polarisasjonen blir reflektert av PBS 1123 til porten 1124 og blir således rettet til den andre PM-koplere 1266. En del av lyset passerer gjennom forsinkelsessløyfen 1269 av det felles trinnet 712 og en del av lyset passerer gjennom den ikke-resiproke faseskifteren 1250. Som beskrevet ovenfor, forplanter lys som entrer den ikke-resiproke faseskifteren 1250 i den vertikale polarisasjonen seg gjennom den hurtige dobbeltbrytende aksene 1282 av kvartbølgeplaten 1274 (figur 27) og blir ikke utsatt for en relativ faseforsinkelse. De to pulsene med lys som forplanter seg mot klokken, forplanter seg til koplere 1220 der de blir kombinert med lyspulsene som forplanter seg med klokken. Lyssignalene som passerer gjennom det felles trinnet 712 og forsinkelsessløyfen 1269 i begge retninger, utsettes ikke for relativ faseforskyvning og kombineres som beskrevet ovenfor. Lyssignalene som passerer gjennom den ikke-resiproke faseskifteren 1250 i begge retninger, blir utsatt for en relativ faseforskyvning på $\pi/2$ mellom signalet som

forplanter seg med klokken og signalet som forplanter seg mot klokken, og har således en $\pi/2$ faseforspenning som beskrevet ovenfor. På begge utgangene til kopleren 1220 blir en del av de to pulsene med lys som returnerer fra sensorgruppen 1200 rettet til polarisatoren 1224, og den gjenværende delen blir rettet til polarisatoren 1232. Rollen til de to polarisatorene 1224 og 1232 er å sikre at lyset som entrer sløyfen har den samme polarisasjonen som lyset som forlater sløyfen, hvilket garanterer resiprositet. Som beskrevet tidligere, har de to pulsene som når detektoren 1230 i fasekvadratur, hvilket tillater bruken av et antall signalbehandlingsteknikker som er velkjent på området for å unngå signalfading. Tilsvarende kommentarer passer på detektoren 1226. I utførelsen i figur 24 er genereringen av to pulser i fasekvadratur hovedgrunnen for å innlemme trinnet som inneholder den ikke-resiproke faseskifteren 1250.

Figurene 30-36 illustrerer ytterligere alternative utførelser av den foreliggende oppfinnelse hvor en foldet Sagnac sensorgruppen anvender polarisasjonsbasert forspenning for multiple detektorer, og der hver detektor har et forspenningspunkt som kan innstilles uavhengig av forspenningspunktene til de andre detektorene. Utførelsene i figurene 30-36 innbefatter sensorgruppen 716, som ble beskrevet detaljert ovenfor. Det må forstås at andre konfigurasjoner av forsterkede sensorgrupper også kan anvendes i stedet for sensorgruppen 716 i utførelsene i figurene 30-36.

I en foldet Sagnac sensorgruppen 1300 illustrert i figur 30, er en polarisert fibersuperfluorescens kilde (SFS) 1310 koplet til en polarisasjonskontrollinnretning 1312 via en fiber 1314. Fiberen 1314 kopler videre polarisasjonskontrollinnretningen 1312 til den første port av en 2x2-kopler 1316. En andre port av kopleren 1316 er en utgangsport, hvilket skal beskrives nedenfor. En tredje port av kopleren 1316 er koplet via en fiber 1318 til en ikkereflekerende terminator 1320. En fjerde port av kopleren 1316 er koplet til en første port 1330 av en polarisasjonsstrålesplitter (PBS) 1332 via en felles gruppeinnmatings/utmatingsfiber 1334. En andre port 1336 av polarisasjonsstrålesplitteren 1332 er koplet til en første horisontal polarisator 1338. Den første horisontale polarisatoren 1338 er koplet til den andre gruppeinnmatings/utmatingsfiberen 720 til gruppen 716. En tredje port 1340 av polarisasjonsstrålesplitteren 1332 er forbundet med en felles forsinkelsesfiber 1342, som er formet i en forsinkelsessløyfe 1344 og som er terminert i et Faradayspeil (FRM) 1346. En fjerde port 1348 av polarisasjonsstrålesplitteren 1332 er koplet til en andre horisontal polarisator 1350 og så til en depolarisator 1352. Depolarisatoren 1352 er koplet til den første gruppeinnmatings/utmatingsfiberen 714.

Den andre porten av kopleren 1316 er koplet til et detektorsubsystem 1360 via en fiber 1362. I utførelsen i figur 30 omfatter detektorsubsystemet 1360 en $1^x n$ kopler 1364 som har en enkelt innmatingsport som mottar lyset fra den andre porten til

kopleren 1316. En første utmatingsport av 1^xn kopleren 1364 er koplet til en polarisasjonskontrollinnretning 1366. Polarisasjonskontrollinnretningen 1366 er koplet til en polarisator 1368, som i sin tur er koplet til en første detektor 1370. En andre innmatingsport på 1^xn kopleren 1364 er koplet til en polarisasjonskontrollinnretning 5 1372. Polarisasjonskontrollinnretningen 1372 er koplet til en polarisator 1374 som er koplet til en andre detektor 1376. Ytterligere polarisasjonskontrollinnretninger, polarisatorer og detektorer (ikke vist) kan være tilkoblet ytterligere porter (ikke vist) av 1^xn kopleren 1364.

Den foldede Sagnac sensorgruppen 1300 i figur 30 virker på følgende måte. Den 10 polariserte SFS 1310 tilveiebringer et polarisert utgangssignal som passerer gjennom polarisasjonskontrollinnretningen 1312 via fiberen 1314.

Polarisasjonskontrollinnretningen 1312 er justerbar for å variere polarisasjonen til en ønsket polarisasjonstilstand. På for eksempel figur 30 blir polarisasjonstilstanden justert for å tilveiebringe lineært, polarisert lys orientert i 45° i forhold til den vertikale og den 15 horisontale aksene på inngangen til polarisasjonsstrålesplitteren 1332. Lyset forblir i fiberen 1314 og blir tilveiebrakt som innmatningen til kopleren 1316. Kopleren 1316 kobler omtrent 50% av det innkommende lyset til den første utgangsfiberen 1318 og blir således kastet i den ikkereflekerende terminatoren 1320. Kopleren 1316 kopler omtrent 50% av det innkommende lyset til den felles gruppeinnmatings/utmatingsfiberen 1334.

20 Den felles gruppeinnmatings/utmatingsfiberen 1334 leder lyset til polarisasjonsstrålesplitteren 1330, som reflekterer horisontalt polarisert lys til den andre porten 1336 og som passerer vertikalt polarisert lys til den tredje porten 1340. Det reflekterte horisontalt polariserte lyset fra den andre porten 1336 passerer gjennom den første horisontale polarisatoren 1338 til den andre gruppeinnmatings/utmatingsfiberen 25 720 og forplanter seg i en retning med klokken gjennom gruppen 716. Lyset som forplanter seg med klokken slipper ut av gruppen 716 via depolarisatoren 1352 og gruppeinnmatings/utmatingsfiberen 714. Som beskrevet ovenfor, sikrer depolarisatoren 1352 at lyset som slipper ut i hovedsak er jevnt fordelt i den horisontale polarisasjonsmodusen og den vertikale polarisasjonsmodusen etter passering gjennom 30 sensorene i gruppen 716. Lyset som forplanter seg med klokken passerer så gjennom den andre horisontale polarisatoren 1350, som eliminerer andelen av lyset i den vertikale polarisasjonen. Lyset som forplanter seg med klokken i den horisontale polarisasjonen entrer så den fjerde porten 1348 av polarisasjonsstrålesplitteren 1330, og blir reflektert til den tredje porten 1340 for å forplante seg i den felles 35 forsinkelsesfiberen 1342. Det returnerende lyset som forplanter seg med klokken passerer gjennom forsinkelsesfiberen 1344 til Faradayspeilet 1346 der det blir reflektert som vertikalt polarisert lys. Det vertikalt polariserte lyset returnerer til den tredje porten

1340 av polarisasjonsstrålesplitteren 1332 og blir sendt gjennom til den første porten 1330.

Som beskrevet ovenfor, var lyset som opprinnelig falt inn på den første porten 1330 av polarisasjonsstrålesplitteren 1332, orientert i omtrent 45° i forhold til den horisontale og vertikale polarisasjonen. Omtrent 50% av lyset korresponderer således til den vertikalt polariserte komponenten av lyset sendt gjennom polarisasjonsstrålesplitteren 1332 til den tredje porten 1340 og således til den felles forsinkelsesfiberen 1342. Det vertikalt polariserte lyset forplanter seg gjennom forsinkessløyfen 1344 og blir reflektert av Faradayspeilet 1346 som horisontalt polarisert lys. Det reflekterte horisontalt polariserte lyset passerer gjennom forsinkessløyfen 1344 og tilbake til den tredje porten 1340 av polarisasjonsstrålesplitteren 1342. Siden lyset er horisontalt polarisert, blir lyset reflektert til den fjerde porten 1348 av polarisasjonsstrålesplitteren 1342 og bringes således til å forplante seg via den første gruppeinnmatings/utmatingsfiberen 714, gjennom den andre horisontale polarisatoren 1350, gjennom depolarisatoren 1352 og inn i gruppen 716 for å forplante seg i denne i en retning mot klokken. Depolarisatoren 1352 sikrer at lyset som forplanter seg mot klokken har komponenter i alle polarisasjoner, slik at når lyset som forplanter seg mot klokken slipper ut av gruppen 716, vil det være minst en del av lyset i den horisontale polarisasjonen.

Lyset som forplanter seg mot klokken slipper ut av gruppen 716 via den andre gruppeinnmatings/utmatingsfiberen 720, og den horisontalt polariserte komponenten av lyset passerer gjennom den første horisontale polarisatoren 1338, som eliminerer lyset i andre polarisasjonsorienteringer. Det horisontalt polariserte lyset, som er resultatet av delen av lyset som forplanter seg mot klokken, entrer den andre porten 1336 av polarisasjonsstrålesplitteren 1332 og blir reflektert til den første porten 1330 av polarisasjonsstrålesplitteren 1332 hvor det blir kombinert med det vertikalt polariserte lyset, som er resultatet av delen av lyset som forplanter seg med klokken.

Det kombinerte lyset forplanter seg til den fjerde porten av koplere 1316 hvor omtrent 50% av det kombinerte lyset blir koplet til den andre porten av koplere 1316 og således til detektorsubsystemet 1360 via fiberen 1362. 1^x_n -koplere 1364 deler lyset i N deler. I figur 30 er for eksempel N lik 2, og en første del av lyset blir koplet til polarisasjonskontrollinnretningen 1366 for å forplante seg gjennom polarisatoren 1368 til den første detektoren 1370, og en andre del av lyset blir koplet til polarisasjonskontrollinnretningen 1372 for å forplante seg gjennom polarisatoren 1374 til den andre detektoren 1376. Orienteringene til polarisasjonskontrollinnretningene 1366, 1372 og polarisatorene 1368, 1374 kan justeres for å forspenne de optiske signalene som faller inn på den første detektoren 1370 og den andre detektoren 1376 i

forskjellige faser. For eksempel kan signalet som påtrykkes den andre detektoren 1376 være forspent til å være i kvadratur med signalet påtrykket den første detektoren 1370, slik at når et signal har minimal sensitivitet, har det andre signalet maksimal sensitivitet, og omvendt.

5 Som beskrevet ovenfor, forplanter hvert av de to signaldelene seg den samme avstanden gjennom gruppen 716 gjennom den felles forsinkelsesfiberen 1342, og gjennom forsinkessløyfen 1344. I fraværet av perturbasjoner forårsaket av akustiske signaler eller annen støy som støter an på sensorene i gruppen 716, vil således de to delene være i fase og de vil konstruktivt interferere for å generere et kombinert optisk
10 signal som har en lineær polarisasjon på 45° , men lyset har imidlertid en polarisasjonstilstand ortogonal på den opprinnelige polarisasjonstilstanden. Dersom den opprinnelige polarisasjonstilstanden var $+45^\circ$, er således polarisasjonstilstanden til det utsendte lyset (igjen i fraværet av en faseperturbasjon) -45° .

I nærvær av et akustisk signal blir lyset som forplanter seg med og mot klokken
15 utsatt for en relativ faseforskyvning. Med økende relativ faseforskyvning endrer polarisasjonstilstanden til de to interfererende strålene seg fra -45° lineær polarisasjon til venstresirkulær polarisasjon til $+45^\circ$ polarisasjon til høyresirkulær polarisasjon og tilbake til -45° polarisasjon. Progresjonen gjennom disse fire polarisasjonstilstandene definerer en sirkel på Poincaré kulen. Polarisasjonstilstanden på utgangen av
20 polarisasjonsstrålesplitteren 1332 korresponderer med et punkt langs denne sirkelen på Poincaré kulen hvis lokalisering på sirkelen er en funksjon av den akustisk induerte ikkeeresiproke faseforskyvningen.

Etter å ha forplantet seg fra utgangen av polarisasjonsstrålesplitteren 1332, gjennom den felles gruppeinnmatings/utmatingsfiberen 1334 gjennom koplere 1316 og
25 til detektorsubsystemet 1360, blir polarisasjonstilstanden til det kombinerte signalet endret tilfeldig av den ikkekjente dobbeltbryteren til fiberen 1334.

Polarisasjonskontrollinnretningen 1366 nær polarisatoren 1368 i front av den første detektoren 1370 og polarisasjonskontrollinnretningen 1372 nær polarisatoren 1374 i front av den andre detektoren 1376, blir brukt for å reorientere polarisasjonstilstandene
30 til en respektiv valgt polarisasjonstilstand for hver detektor 1370, 1376.

Polarisasjonskontrollinnretningene 1366, 1372 er innstilt for eksempel når ingen akustiske signaler blir påtrykket gruppen 716, og således ingen relativ faseforskyvning blir introdusert i de motforplantende, optiske signalene.

For å tilveiebringe for eksempel et forspenningspunkt på $\pm 90^\circ$ for den første
35 detektoren 1370, blir polarisasjonskontrollinnretningen 1376 innstilt slik at når det kombinerte lyset på utgangen av polarisasjonsstrålesplitteren 1332 har en venstre sirkulær polarisasjonstilstand, påviser den første detektoren 1370 enten en maksimal

intensitet eller en minimal intensitet på lyset. For andre polarisasjonstilstander på utgangslýset påviser den første detektoren 1370 lys som har en intensitet mellom den maksimale intensiteten og den minimale intensiteten.

Som et ytterligere eksempel kan den andre detektoren 1376 med fordel være innstilt til et forskjellig forspenningspunkt, slik som for eksempel 0° og 180° . For dette forspenningspunktet blir polarisasjonskontrollinnretningen 1372 innstilt slik at når lyset på utgangen av polarisasjonsstrålesplitteren 1332 har en -45° polarisasjonstilstand, påviser den andre detektoren 1376 enten en maksimal intensitet eller en minimal intensitet av lyset. For andre polarisasjonstilstander i utgangslýset, påviser den andre detektoren 1376, lys som har en intensitet mellom den maksimale intensiteten og den minimale intensiteten.

Det må forstås at lyset som påtrykkes inngangen til polarisasjonsstrålesplitteren 1332 kan ha en polarisasjonstilstand forskjellig fra $\pm 45^\circ$. Dersom for eksempel det innmatede lyset har en opprinnelig venstresirkulær polarisasjonstilstand, blir polarisasjonskontrollinnretningene 1366, 1372 innstilt i samsvar med dette for tilveiebringelse av de passende forspenningspunktene i den første detektoren 1370 og den andre detektoren 1376.

Figur 31 illustrerer en alternativ konfigurasjon av en foldet Sagnac sensorgruppe 1300', som i hovedsak er tilsvarende den foldede Sagnac sensorgruppen 1300 i figur 30. I den foldede Sagnac sensorgruppen 1300' i figur 31 befinner depolarisatoren 1352 seg i den andre gruppeinnmatings/utmatingsfiberen 720, snarere enn i den første gruppeinnmatings/utmatingsfiberen 714. På grunn av den resiproke strukturen til sensorgruppen 716, endrer ikke relokaliseringen av depolarisatoren 1352 til fiberen 720 den totale virkemåten til den foldede Sagnac sensorgruppen 1300' i forhold til virkemåten til den foldede Sagnac sensorgruppen 1300. Virkemåten til den foldede Sagnac sensorgruppen 1300' er tilsvarende virkemåten til den foldede Sagnac sensorgruppen 1300 og vil ikke bli beskrevet detaljert her.

Figur 32 illustrerer en ytterligere alternativ utførelse av en foldet akustisk Sagnac sensorgruppe 1400, som er tilsvarende den foldede Sagnac sensorgruppen 1300 på figur 30, og tilsvarende elementer er nummerert i samsvar med dette. Til forskjell fra den foldede Sagnac sensorgruppen 1300, erstatter den foldede Sagnac sensorgruppen 1400 2x2-kopleren 1316 med en polarisasjonsuavhengig optisk sirkulator 1410. Den optiske sirkulatoren utfører en tilsvarende funksjon som 2x2-kopleren 1316, men i den foldede Sagnac sensorgruppen 1300 tapes imidlertid omtrent 50% av det innmatede lyset når det innmatede lyset blir delt i kopleren 1316 og omtrent 50% av det utmatede lyset tapes når det blir delt i kopleren 1316. I utførelse 1400 blir i hovedsak alt innmatet lys sendt fra polarisatoren SFS 1310 gjennom sirkulatoren 1410 til

polarisasjonsstrålesplitteren 1332 og hovedsakelig alt utmatet lys blir sendt fra polarisasjonsstrålesplitteren 1332 gjennom sirkulatoren 1410 til detektorsubsystemet 1360.

Figur 33 illustrerer en alternativ konfigurering av en foldet Sagnac sensorgruppe 1400', som i hovedsak er tilsvarende den foldede Sagnac sensorgruppen 1400 i figur 32. I den foldede Sagnac sensorgruppen 1400' i figur 33, befinner depolarisatoren 1352 seg i den andre gruppeinnmatings/utmatingsfiberen 720, snarere enn i den første gruppeinnmatings/utmatingsfiberen 714. På grunn av den resiproke strukturen til sensorgruppen 716, endrer ikke relokaliseringen av depolarisatoren 1352 til fiberen 720 den totale virkemåten til utførelsen 1400' i forhold til virkemåten til den foldede Sagnac sensorgruppen 1400. Virkemåten til den foldede Sagnac sensorgruppe 1400' vil således ikke bli beskrevet detaljert her.

Figur 34 illustrerer en ytterligere alternativ utførelse av en foldet Sagnac sensorgruppe 1600 i samsvar med den foreliggende oppfinnelse, som innbefatter et kombinert innmatings-/utmatingsubsystem 1610 som er koplet til gruppen 716 på en måte tilsvarende måten beskrevet ovenfor i tilknytning til figurene 30-33.

I figur 34 tilveiebringer en polarisert kilde 1620 lineært, polarisert innmatingslys langs en akse av en polarisasjonsopprettholdende fiber 1622. Den polarisasjonsopprettholdende fiberen 1622 blir rotert slik at polarisasjonsaksen blir orientert $\pm 45^\circ$ i forhold til den vertikale polarisasjonsaksen til innmatings/utmatingsubsystemet 1610. Lyset fra fiberen 1622 blir koplet til innmatings-/utmatingsubsystemet 1610 via en første kollimasjonslinse 1630. Den første kollimasjonslinsen 1630 påviser lyset mot en første port 1634 til en første polarisasjonsstrålesplitter (PBS) 1632, som altså har en andre port 1636, en tredje port 1638 og en fjerde port 1640. Den andre porten 1636 retter en del av det innmatede lyset mot en første 45° Faradayrotator (45° FR) 1642. Den tredje porten 1638 retter en del av det innmatede lyset mot en andre 45° Faradayrotator 1644. Slik det vil bli beskrevet nedenfor, retter den fjerde porten 1640 en valgt del av det utmatede lyset til et påvisningssystem 1650.

Lyset som passerer gjennom den første Faradayrotatoren 1642, blir kollimert av en andre kollimasjonslinse 1660 og blir koplet inn i gruppeinnmatings/utmatingsfiberen 720 og forplanter seg således til sensordelen av gruppen 716 for å forplante seg i en retning med klokken i denne.

Lyset som passerer gjennom den andre Faradayrotatoren 1644, passerer gjennom en halvbølgeplate ($\lambda/2$) 1662. Halvbølgeplaten 1662 har første og andre dobbeltbrytende akser (ikke vist). En av de dobbeltbrytende aksene er orientert i en vinkel på $22,5^\circ$ i forhold til den vertikale polarisasjonsaksen til det innkommende lyset og de $-22,5^\circ$ i

forhold til 45° polarisasjonen til lyset som forplanter seg mot denne fra kilden (dvs. aksens ligger mellom vertikalen og polarisasjonen av lyset). Formålet med denne orienteringen skal beskrives nedenfor. Lyset som passerer gjennom halvbølgeplaten 1662 entrer den første porten 1672 av en andre polarisasjonsstrålesplitter 1670, som
 5 også har en andre port 1674, tredje port 1676 og en fjerde port 1678. Som beskrevet nedenfor har den andre porten 1674 ikke koplet til ytterligere elementer. Lys utsendt fra den tredje porten 1676 blir rettet mot en tredje kollimasjonslinse 1680. Lys utsendt fra den fjerde porten 1678 blir rettet mot en fjerde kollimasjonslinse 1682.

10 Lyset som passerer gjennom den fjerde kollimasjonslinsen 1682 blir koplet inn i den første gruppeinnmatings/utmatingsfiberen 714 og passerer gjennom depolarisatoren 1352 inn i sensordelen av gruppen 716 for å forplante seg i en retning mot klokken i denne.

Lyset som passerer gjennom den tredje kollimasjonslinsen 1680 blir fokusert på enden av den felles forsinkelsesfiberen 1342, forplanter seg gjennom
 15 forsinkessløyfen 1344 til Faradayspeilet 1346, tilbake gjennom forsinkessløyfen 1344 og tilbake til kollimasjonslinsen 1680. Det reflekterte lyset blir således rettet tilbake inn i den tredje porten 1676 av den andre polarisasjonsstrålesplitteren 1670.

Som beskrevet ovenfor, entrer lyset fra den fjerde porten 1640 av den første polarisasjonsstrålesplitteren 1632 detekteringssystemet 1650.
 20 Detekteringssystemet 1650 omfatter en første strålesplitter 1690, en andre strålesplitter 1692, et første dobbeltbrytende element 1694, et andre dobbeltbrytende element 1696, en første detektor 1698, en andre detektor 1700, en første polarisator 1702 og en andre polarisator 1704. En første prosentdel av lyset fra den fjerde porten 1640 blir reflektert av den første strålesplitteren 1690 og passerer gjennom det første
 25 dobbeltbrytende elementet 1694 og den første polarisatoren 1702 til den første detektoren 1698. Den gjenværende delen av lyset fra den fjerde porten 1640 passerer gjennom den første strålesplitteren 1690 og faller inn på den andre strålesplitteren 1692, slik hvor den andre prosentdel av lyset blir reflektert av den andre strålesplitteren 1692, slik at det passerer gjennom det andre dobbeltbrytende elementet 1696 og den andre
 30 polarisatoren 1704 til den andre detektoren 1700. Den gjenværende delen av lyset passerer gjennom den andre strålesplitteren 1692 til ytterligere elementer (ikke vist). Dersom bare to detektorer er tilveiebrakt, er den første prosentdelen av koplingen fordelaktig 50% og den andre prosentdelen er fordelaktig 100%, slik at begge detektorene 1698, 1700 mottar omtrent den samme lysmengden. Dersom en tredje
 35 detektor (ikke vist) er innbefattet, er den første prosentdelen med fordel omtrent 33% og den andre prosentdelen med fordel omtrent 50% slik at den andre detektoren 1700 også

mottar omtrent 33% av det opprinnelige lyset. Den tredje detektoren vil da motta de gjenværende 33%.

Den foldede Sagnac sensorgruppen 1600 i figur 34 virker på den følgende måten. Som beskrevet ovenfor, vil lys som faller inn på den første linsen 1630 orientert i 45° til den vertikale og horisontale polarisasjonsaksen. Lyset som passerer gjennom linsen 1630 og entrer den første porten 1634 av den første polarisasjonsstrålesplitteren 1632 har således en komponent i den horisontale polarisasjonstilstanden og en komponent i den vertikale polarisasjonstilstanden. Den horisontale komponenten blir reflektert av polarisasjonsstrålesplitteren 1632 til den andre porten 1636, og den vertikale komponenten blir sendt gjennom polarisasjonsstrålesplitteren 1632 til den tredje porten 1638.

Den horisontale komponenten fra den andre porten 1636 passerer gjennom den første Faradayrotatoren 1648 og polarisasjonstilstanden blir rotert med 45° i en første retning (for eksempel med klokken) slik at lyset som slipper ut av den første Faradayrotatoren 1642 og faller inn på den andre linsen 1660 har en lineær polarisasjonstilstand på 45°. Lyset passerer gjennom den andre linsen 1660 og entrer den andre gruppeinnmatings/utmatingsfiberen 720 for å forplante seg i retning med klokken gjennom gruppen 716. Lyset kan bli utsatt for polarisasjonsendringer innen gruppen 716. Som beskrevet ovenfor, passerer lyset som slipper ut av gruppen 716 via den første gruppeinnmatings/utmatingsfiberen 714 gjennom depolarisatoren 1352, som sikrer at minst en del av lyset er i den horisontale og vertikale polarisasjonstilstanden.

Lyset som forplanter seg med klokken fra den første gruppeinnmatings/utmatingsfiberen 714 entrer innmatings-/utmatingssubsystemet via den fjerde linsen 1682 og faller inn på den andre polarisasjonsstrålesplitteren 1670. Den vertikale komponenten til lyset passerer gjennom den andre polarisasjonsstrålesplitteren 1670 og blir sendt ut fra den andre porten 1674 og blir forkastet. Den horisontalt polariserte lyskomponenten blir reflektert til den tredje porten 1676 av den andre polarisasjonsstrålesplitteren 1670 og passerer gjennom den tredje linsen 1680 til den felles forsinkelsesfiberen 1342 for å bringe lyset til å forplante seg gjennom forsinkessløyfen 1344, og blir reflektert av Faradayspeilet 1346 i den vertikale polarisasjonstilstanden, passerer tilbake gjennom forsinkessløyfen 1344 og den felles forsinkelsesfiberen 1342 til den tredje linsen 1680. Det reflekterte lyset i den vertikale polarisasjonstilstanden passerer fra den tredje porten 1676 til den første porten 1672 av den andre polarisasjonsstrålesplitteren 1670, passerer gjennom halvølgeplaten 1662 til den andre Faradayrotatoren 1644 til den tredje porten 1638 av den første polarisasjonsstrålesplitteren 1632. Siden halvølgeplaten 1662 er orientert med en av dens dobbeltbrytende akser i 22,5° i forhold til den vertikale polarisasjonsaksen, bringes

det vertikale lyset som faller inn på halvølgeplaten 1662 til å bli speilvendt om den dobbeltbrytende aksene, slik at polarisasjonstilstanden til lyset som slipper ut fra halvølgeplaten 1662 er orientert i 45° i forhold til den vertikale og horisontale aksene. Den andre Faradayrotatoren 1644 roterer polarisasjonstilstanden ytterligere 45° for å bringe lyset som slipper ut fra den andre Faradayrotatoren 1644 og faller inn på den tredje porten 1638 av polarisasjonsstrålesplitteren 1632 til å ha en horisontal polarisasjonstilstand. Lyset som entrer den tredje porten 1638, blir således reflektert til den fjerde porten 1640 og entrer detekteringssystemet 1650 i den horisontale polarisasjonstilstanden.

10 Som angitt ovenfor, passerer den vertikale komponenten til det innmattede lyset, som faller inn på den første porten 1634 av den første polarisasjonsstrålesplitteren 1632, gjennom til den tredje porten 1638. Polarisasjonstilstanden til lyset blir rotert 45° av den andre Faradayrotatoren 1644 til en 45° polarisasjonstilstand i forhold til den vertikale og horisontale polarisasjonsaksene. Polarisasjonstilstanden til lyset blir så speilet om den dobbeltbrytende aksene til halvølgeplaten 1662, slik at polarisasjonstilstanden til lyset som slipper ut fra halvølgeplaten igjen er orientert i den vertikale retningen. Det vil forstås av en fagkyndig på området at den ikkeresiproke virkningen til den andre Faradayrotatoren 1644 bringer det vertikalt polariserte lyset, som passerer fra venstre til høyre gjennom Faradayrotatoren 1644 og så gjennom halvølgeplaten 1646, til først å være rotert til en 45° polarisasjonstilstand og så til å bli speilet tilbake til vertikal polarisasjonstilstand. I motsetning til dette blir det vertikalt polariserte lyset som passerer fra høyre til venstre først speilet av halvølgeplaten 1646 til en 45° polarisasjonstilstand og blir så rotert av den andre Faradayrotatoren 1644 til en horisontal polarisasjonstilstand.

25 Det vertikalt polariserte lyset fra halvølgeplaten 1662 entrer den første porten 1672 av den andre polarisasjonsstrålesplitteren 1670 og passerer gjennom til den tredje porten 1676 til den tredje linsen 1680. Det vertikalt polariserte lyset passerer gjennom den felles forsinkelsesfiberen 1342, gjennom forsinkessløyfen 1344, til Faradayspeilet 1346, og blir reflektert tilbake igjennom forsinkessløyfen 1344 og den felles forsinkelsesfiberen 1342 som horisontalt polarisert lys. Det horisontalt polariserte lyset passerer gjennom den tredje linsen 1680 til den tredje porten 1676 av polarisasjonsstrålesplitteren 1670. Det horisontalt polariserte lyset blir reflektert til den fjerde porten 1678 og passerer gjennom den fjerde linsen 1682 til den første gruppeinnmatings/utmatingsfiberen 714 og gjennom depolarisatoren 1352 for å forplante seg i en retning mot klokken gjennom gruppen 716.

35 Lyset som forplanter seg mot klokken slipper ut fra gruppen 716 via den andre gruppeinnmatings/utmatingsfiberen 720 og passerer gjennom den andre linsen 1660 til

den første Faradayrotatoren 1642. Den første Faradayrotatoren 1642 roterer polarisasjonstilstanden til lyset med 45° . Siden lyset ble effektivt depolarisert av depolarisatoren 1352, innbefatter lyset som passerer gjennom den første Faradayrotatoren 1642 til den andre porten 1634 av den første

5 polarisasjonsstrålesplitteren 1632 lys som har horisontalt og vertikalt polariserte komponenter. De horisontalt polariserte komponentene til lyset blir reflektert til den første porten 1634 og blir sendt ut gjennom den første linsen 1630 til innmatingsfiberen 1622. En isolator (ikke vist) er med fordel innbefattet for å absorbere lyset.

De vertikalt polariserte komponentene til lyset som forplanter seg mot klokken

10 entrer den andre porten 1636 av den første polarisasjonsstrålesplitteren 1632 og passerer til den fjerde porten 1640 og blir kombinert med de horisontalt polariserte komponentene til lyset som forplanter seg med klokken. Som beskrevet ovenfor i tilknytning til figur 30 vil, dersom det motforplantende lyset ikke blir utsatt for noen relativ faseforskyvning, lyset bli kombinert som lineært polarisert lys i en 45°

15 polarisasjonstilstand. En relativ faseforskyvning bringer polarisasjonstilstanden til å variere, som ytterligere beskrevet ovenfor.

De dobbeltbrytende elementene 1694, 1696 er innbefattet for selektivt å forspenne lyset som faller inn på detektorene 1698, 1900 ved å innføre en relativ faseforskyvning for lyset i de to forskjellige polarisasjonene (for eksempel den

20 horisontale og vertikale polarisasjonen, $+45^\circ$ og -45° polarisasjonen, eller venstresirkulære og høyresirkulære polarisasjonen). De dobbeltbrytende elementene kan med fordel omfatte lineære eller sirkulære bølgeplater (for eksempel kvartbølgeplater, halvbølgeplater, Faradayrotatorer eller liknende).

Figur 35 illustrerer en utførelse av en foldet, akustisk Sagnac sensorgruppen

25 1750, tilsvarende den foldede, akustiske Sagnac sensorgruppen 1600 i figur 34, og like elementer er identifisert med de samme henvisningstallene som i figur 34. Til forskjell fra figur 34 innbefatter den foldede, akustiske Sagnac sensorgruppen 1750 en ikkepolarisert lyskilde 1720, i stedet for den polariserte lyskilden 1620. For å kunne anvende den ikkepolariserte lyskilden 1720, innbefatter den foldede, akustiske Sagnac

30 sensorgruppen 1750 en 45° polarisator 1730 mellom den første kollimasjonslinsen 1630 og en første polarisasjonsstrålesplitteren 1632. 45° -polarisatoren 1730 bringer lyset som faller inn på den første porten 1634 av den første polarisasjonsstrålesplitteren 1632 til å bli orientert i 45° og således til å ha hovedsakelig like komponenter i den horisontale og vertikale polarisasjonen. Den foldede, akustiske Sagnac sensorgruppen 1750 i figur 35

35 virker således på hovedsakelig samme måte som den foldede, akustiske Sagnac sensorgruppen 1600 i figur 34, og virkemåten til den foldede, akustiske Sagnac sensorgruppen 1750 vil ikke bli beskrevet ytterligere detaljert.

Figur 36 illustrerer en ytterligere utførelse av en foldet, akustisk Sagnac sensorgruppen 1800 tilsvarende den foldede, akustiske Sagnac sensorgruppen 1600 og 1750 i de respektive figurer 34 og 35, og like elementer er identifisert med de samme henvisningstallene som på figurene 34 og 35. Til forskjell fra utførelsene i figurene 34 og 35 blir lyssignalene som passerer gjennom polarisatorene 1702 og 1704 i den foldede, akustiske Sagnac sensorgruppen 1800, ikke rettet til detektorene 1698 og 1700. Snarere innbefatter den foldede, akustiske Sagnac sensorgruppen 1800 en kollimasjonslinse 1810 anordnet nær polarisatoren 1702 og en kollimasjonslinse 1812 anordnet nær polarisatoren 1704. Kollimasjonslinsen 1810 retter lyset fra polarisatoren 1702 inn i en første ende 1822 av en fiber 1820. Fiberen 1820 har en andre ende 1824 nær den første detektoren 1698, slik at lyset som entrer fiberen 1820 fra kollimasjonslinsen 1810, faller inn på den første detektoren 1698. Tilsvarende retter kollimasjonslinsen 1812 lyset fra polarisatoren 1702 inn i en første ende 1832 av en fiber 1830. Fiberen 1830 har en andre ende 1834 nær den andre detektoren 1700, slik at lyset som entrer fiberen 1830 fra kollimasjonslinsen 1812 faller inn på den andre detektoren 1700. Ved å innbefatte kollimasjonslinsene 1810 og 1812 og fiberne 1820 og 1830, er fiberne i stand til å transportere lyset i en avstand til detektorene 1698 og 1700, slik at detektorene kan befinne seg på fjerntliggende lokaliseringer, nær deteksjonselektronikken (ikke vist).

Det er å merke seg at i figurene 34, 35 og 36 kan depolarisatoren 1352 være relokalisert fra den første gruppeinnmatings/utmatingsfiberen 714 til den andre gruppen innmatings/utmatingsfiberen 720 uten i vesentlig grad å påvirke driftsegenskapene til den foldede, akustiske Sagnac sensorgruppen 1600, den foldede, akustiske Sagnac sensorgruppen 1750, eller den foldede, akustiske Sagnac sensorgruppen 1800.

Det er videre å merke seg at de forutgående utførelsene er beskrevet i tilknytning til superfluorescenderende lyskilder. En fagkyndig på området vil forstå at andre lyskilder (for eksempel laserkilder) også med fordel kan brukes.

Selv om den foregående beskrivelsen av gruppen i samsvar med den foreliggende oppfinnelsen har adressert akustisk undervannsavføling, må det forstås at den foreliggende oppfinnelsen kan brukes til å avføle en hvilken som helst målestørrelse som kan utføres for å frembringe ikke-resiproke fasemodulasjoner i en fiber. Dersom for eksempel hydrofonene ble erstattet med en alternativ avfølingsanordning som responderer på en forskjellig målestørrelse, vil gruppen påvise denne målestørrelsen på samme måte som akustiske bølger blir påvist. Gruppen i henhold til den foreliggende oppfinnelse kan med fordel brukes til å avføle vibrasjoner, intrusjoner, støt, kjemikalier, temperatur, væsknivåer og spenningsnivåer. Gruppen i henhold til den foreliggende oppfinnelsen kan også brukes til å kombinere et antall forskjellige sensorer som

befinner seg på enten det samme stedet eller befinner seg på forskjellige steder (for eksempel for påvisningen av forskjellige feil i forskjellige punkter langs skroget til et skip eller en bygning). Andre eksempler på anvendelser innbefatter påvisningen og sporing av kjøretøy som forflytter seg på vegsystemer eller fly på flyplasser for

5 trafikkovervåking og kontroll.

Selv om den foreliggende oppfinnelsen er beskrevet ovenfor i tilknytning til bestemte utførelser, må det forstås at beskrivelsene av utførelsene er illustrerende for oppfinnelsen og er ikke ment å være begrensende. Forskjellige modifikasjoner og applikasjoner kan komme til for fagkyndige på området uten å forlate rammen for

10 oppfinnelsen slik den er definert i de medfølgende kravene.

P a t e n t k r a v

1.

Akustisk sensor, omfattende;

5 en kilde (1228) av lyspulser;

en første kopler (1220) som kopler lyspulsene til en første optisk bane eller linje som har en første optisk lengde og en gruppe sensorer (716), hvilken sensorgruppe (716) omfatter minst en første sensor (722(1)), hvilken første sensor (722(1)) er i en andre optisk bane som har en andre optisk lengde forskjellig fra den første optiske
10 lengden;

en optisk forsinkelseslinje eller -bane;

en polarisasjonsavhengig andre kopler (1104), som kopler lyspulser mottatt fra den første optiske bane i en første polarisasjon til den optiske forsinkelseslinjen, og som kopler lyspulser mottatt fra gruppen (716) mottatt i en andre polarisasjon til den optiske
15 forsinkelseslinjen, hvilke lyspulser koplet til den optiske forsinkelseslinjen i den første polarisasjonen returnerer fra den optiske forsinkelseslinjen til den andre kopleren (1104) i den andre polarisasjonen, til hvilke lyspulser koplet til den optiske forsinkelseslinjen i den andre polarisasjonen returnerer fra den optiske forsinkelseslinjen til den andre kopleren (1104) i den første polarisasjonen, og den andre kopleren (1104) kopler
20 lyspulsene som returnerer til den andre kopleren (1104) fra den optisk forsinkelseslinjen i den første polarisasjonen til den første optiske banen for å forplante seg i denne til den første kopleren (1220), og den andre kopleren (1104) kopler lyspulser som returnerer til den andre kopleren (1104) fra den optiske forsinkelseslinjen i den andre polarisasjonen til gruppen for å forplante seg i denne til den første kopleren (1220), og den første
25 kopleren (1220) kombinerer lyspulsene fra den første optiske banen og lyspulsene fra gruppen (716) for å bringe lyspulsene som forflytter seg like avstander gjennom den første optiske banen og gruppen (716) til å interferere og generere et detekterbart utgangssignal, hvilket detekterbare utgangssignal varierer som respons på akustisk energi som støter an mot den første sensoren; og

30 minst en detektor (1226) som detekterer de detekterbare utgangssignalene for å generere et detektorutgangssignal som er responderende på variasjoner i det detekterbare utgangssignalet fra den første kopleren(1220), hvor den akustiske sensoren er k a r a k t e r i s e r t v e d at den første optiske banen innbefatter en ikkeresiprok faseskifter (1250) som bringer lys som forplanter seg gjennom den første
35 optiske banen i en første retning og lys som forplanter seg gjennom den første optiske banen i en andre retning til å bli utsatt for en relativ faseforskyvning, slik at lys kombinert i den første kopleren (1220) har en faseforspenning.

2.

5 Akustisk sensor ifølge krav 1, k a r a k t e r i s e r t v e d at den videre omfatter en andre sensor (718(2)) i gruppen, hvilken andre sensor (718(2)) er i en tredje optisk bane som har en tredje optisk lengde forskjellig fra den første optiske lengde og den andre optiske lengde.

10 3.

Akustisk sensor ifølge krav 1, k a r a k t e r i s e r t v e d at den polarisasjonsavhengige andre koplere (1104) omfatter en polarisasjonsstrålesplitter.

4.

15 Akustisk sensor ifølge krav 1, k a r a k t e r i s e r t v e d at den optiske forsinkelseslinje omfatter en lengde av optisk bølgeleder (740) og en polarisasjonsroterende reflektor(1106);
hvilken reflektor (1106) bringer lys som faller inn på reflektoren (1106) i den første polarisasjonen til å reflekteres som lys i den andre polarisasjonen; og
20 reflektoren (1106) bringer lys som faller inn på reflektoren (1106) i den andre polarisasjonen til å reflekteres som lys i den første polarisasjonen.

5.

25 Akustisk sensor ifølge krav 4, k a r a k t e r i s e r t v e d at den polarisasjonsroterende reflektoren (1106) omfatter et Faradayspeil.

6.

Akustisk sensor ifølge krav 1, k a r a k t e r i s e r t v e d at den relative faseforskyvningen fra den ikke-resiproke faseskifteren er $\pi/2$.

30

7.

Akustisk sensor ifølge krav 1, k a r a k t e r i s e r t v e d at den videre omfatter en tredje optisk bane i parallell med den første optiske banen, hvor en av den første optiske banen og den tredje optiske banen omfatter en optisk forsinkelse (1269)
35 for å bringe den første optiske banen til å ha en optisk banelengde som er forskjellig fra en optisk banelengde til den tredje optiske banen, slik at lys som forplanter seg gjennom den første optiske banen har en forplantningstid som er forskjellig fra en

forplantningstid til lys som forplanter seg gjennom den andre optiske banen for derved å tidsmultiplekse lyspulsene.

8.

5 Akustisk sensor ifølge krav 1, k a r a k t e r i s e r t v e d at den
 ikke-resiproke faseskifteren omfatter en første Faradayrotator (1272), en kvartbølge plate
 (1274) og en andre Faradayrotator (1276), hvor den første Faradayrotatoren (1272),
 kvartbølgeplaten og den andre Faradayrotatoren (1276) er posisjonert slik at lys som
 forplanter seg i den første retningen passerer gjennom den første Faradayrotatoren
 10 (1272), så gjennom kvartbølgeplaten, og så gjennom den andre Faradayrotatoren
 (1276), slik at lys som forplanter seg i den andre retningen passerer gjennom den andre
 Faradayrotatoren (1276), så gjennom kvartbølgeplaten (1274) og så gjennom den første
 Faradayrotatoren (1272).

15 9.

Akustisk sensor ifølge krav 1, k a r a k t e r i s e r t v e d at den
 ikke-resiproke faseskifteren omfatter en første kvartbølgeplate (1274), en Faradayrotator
 (1272), og en andre kvartbølgeplate (1294), hvilken første kvartbølgeplate (1274),
 Faradayrotatoren (1272), og den andre kvartbølgeplaten (1294) er posisjonert slik at lys
 20 som forplanter seg i den første retningen passerer gjennom den første kvartbølgeplaten
 (1274), så gjennom Faradayrotatoren (1272), og så gjennom den andre kvartbølgeplaten
 (1294), og slik at lys som forplanter seg i den andre retningen passerer gjennom den
 andre kvartbølgeplaten (1294), så gjennom Faradayrotatoren (1272), og så gjennom den
 første kvartbølgeplaten (1274).

25

10.

Sensor ifølge krav 1, k a r a k t e r i s e r t v e d at forsinkelseslinjen
 omfatter en lengde optisk fiber og en polarisasjonsroterende reflektor (1106), hvilken
 lengde av optisk fiber er valgt for å tilveiebringe en optisk forsinkelsestid, og lyset som
 30 forplanter seg gjennom den optiske fiberen fra den andre koplere (1104) til reflektoren
 (1106), hvilken reflektor (1106) reflekterer lys i den optiske fiberen slik at det forplanter
 seg gjennom den optiske fiberen til den andre koplere (1104), hvilken reflektor (1106)
 videre roterer lys som faller inn i den første polarisasjonen til den andre polarisasjonen,
 og roterer lys som faller inn i den andre polarisasjonen til den første polarisasjonen.

35

11.

Sensor ifølge krav 10, k a r a k t e r i s e r t v e d at reflektoren (1106) omfatter et Faradayspeil.

5 12.

Sensor ifølge krav 10, k a r a k t e r i s e r t v e d at den polarisasjonsavhengige andre koplere (1104) omfatter en polarisasjonsstrålesplitter, og hvor forsinkelseslinjen mottar lyset fra en port (1123) på polarisasjonsstrålesplitteren og returnerer lys til porten til polarisasjonsstrålesplitteren.

10

13.

Fremgangsmåte for å detektere akustiske signaler, hvor fremgangsmåten omfatter:

generering av et innmatingslyssignal;

15 koplere av innmatingslyssignalet til minst første og andre forplantningsbane for å forplante seg i respektive første retninger i disse, hvor den første og andre forplantningsbanen har respektive første og andre optiske lengder, og den første og andre forplantningsbanen sender ut respektive første og andre utgangslysdeler, og den første og andre utgangslysdelen blir sendt ut fra den første og andre forplantningsbanen ved forskjellige tidspunkter i samsvar med forskjeller i den første og andre optiske
20 banelengden, og den andre utmatede lysdelen er modulert av et akustisk signal som støter an mot den andre forplantningsbanen;

kopling av den første lysdelen til en forsinkelseslinje i en første polarisasjon og kopling av den andre lysdelen til forsinkelseslinjen i en andre polarisasjon, hvilken forsinkelseslinje sender ut en første forsinket lysdel som korresponderer med den første
25 utmatede lysdelen, og den første forsinkede lysdelen har den andre polarisasjonen, hvilken forsinkelseslinje sender ut en andre forsinket lysdel som korresponderer med den andre utmatede lysdelen, hvor den andre forsinkede lysdelen har den første polarisasjonen;

30 kopling av den første og andre forsinkede lysdelen til den første og andre forplantningsbanen for å forplante seg i disse i respektive andre retninger motsatt til de respektive første retningene, hvor den første forplantningsbanen sender ut et første sett av returlysdeler, og det første settet av returlysdeler omfatter en respektiv returlysdel for hver av den første og andre forsinkede lysdelen, og den andre forplantningsbanen sender ut et andre sett av returlysdeler, og det andre settet av returlysdeler omfatter en
35 respektiv returlysdel for hver av den første og andre forsinkede lysdelen;

kopling av det første og andre settet av returlysdeler til minst én detektor, og returlysdelen i det første og andre settet av returlysdeler som er resultatet av utsendte

lysdeler og forsinkede lysdeler som forplanter seg identiske optiske banelengder interfererer for å generere påvisbare utgangssignaler; og

selektivt å påvise de påvisbare utgangssignalene for å påvise bare utgangssignaler som er resultatet av interferens av lysdeler som forplanter seg i den

5 første forplantningsbanen i enten den første retningen eller den andre retningen, hvor de påvisbare utgangssignalene varierer som respons på det akustiske signalet som støter an mot den andre forplantningsbanen hvor fremgangsmåten er

k a r a k t e r i s e r t v e d at lys som forplanter seg gjennom en

ikkeresiprok fasefakter inkludert i den første forplantningsbanen i den første retningen

10 og lys som forplanter seg gjennom den ikke-resiproke fasefakteren i den andre retningen har en faseforskyvning

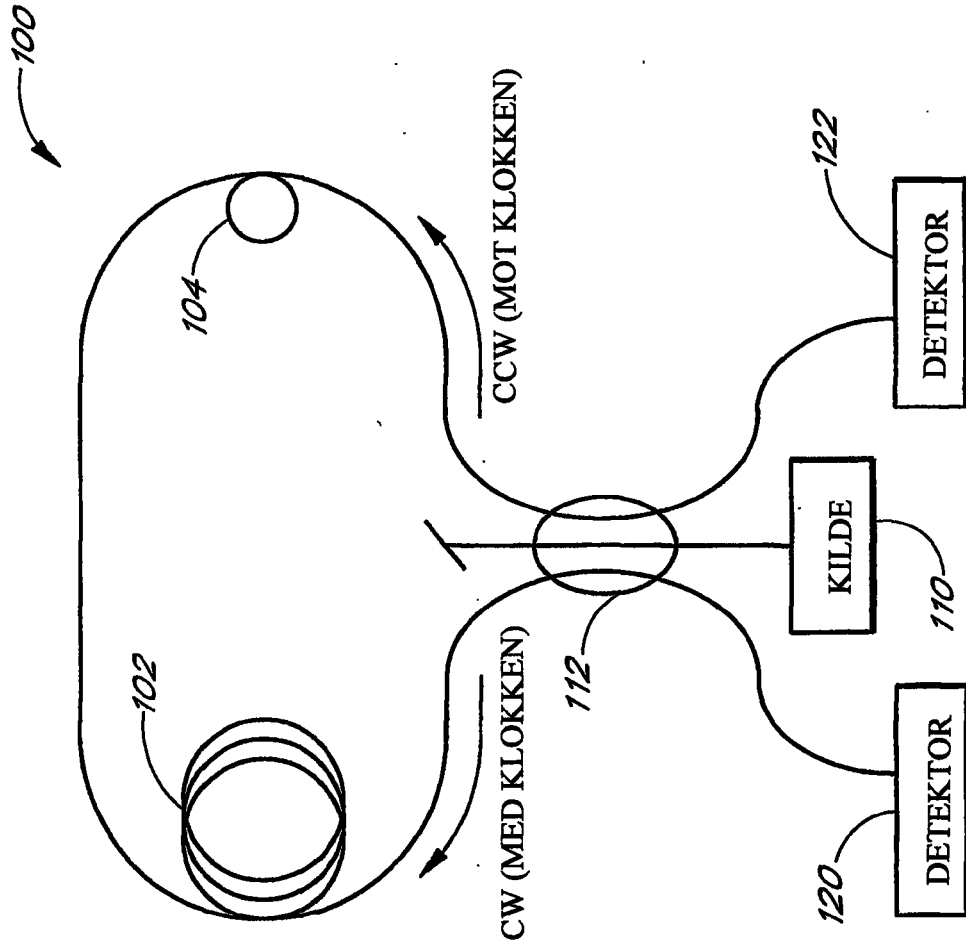


FIG. 1

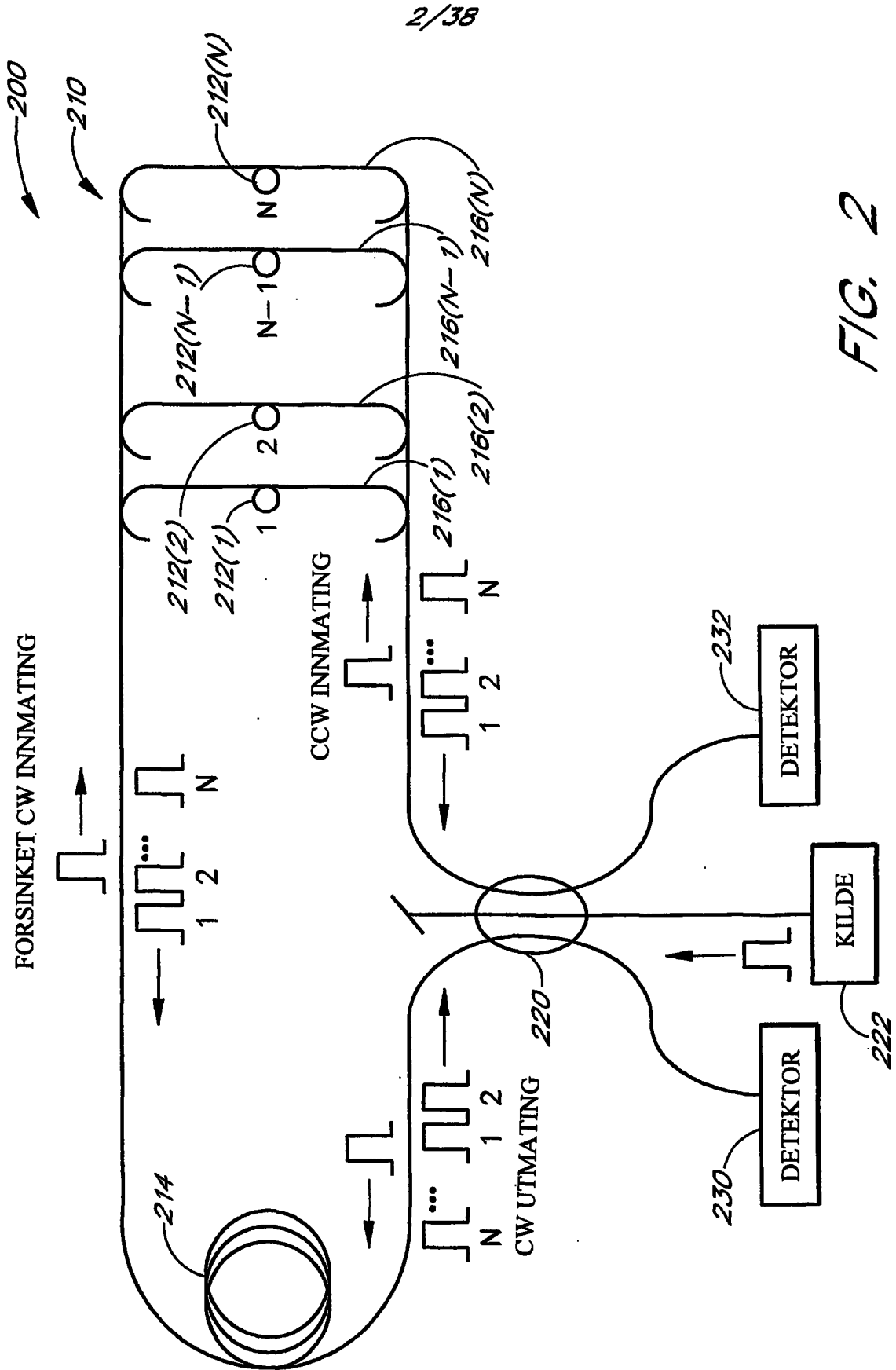


FIG. 2

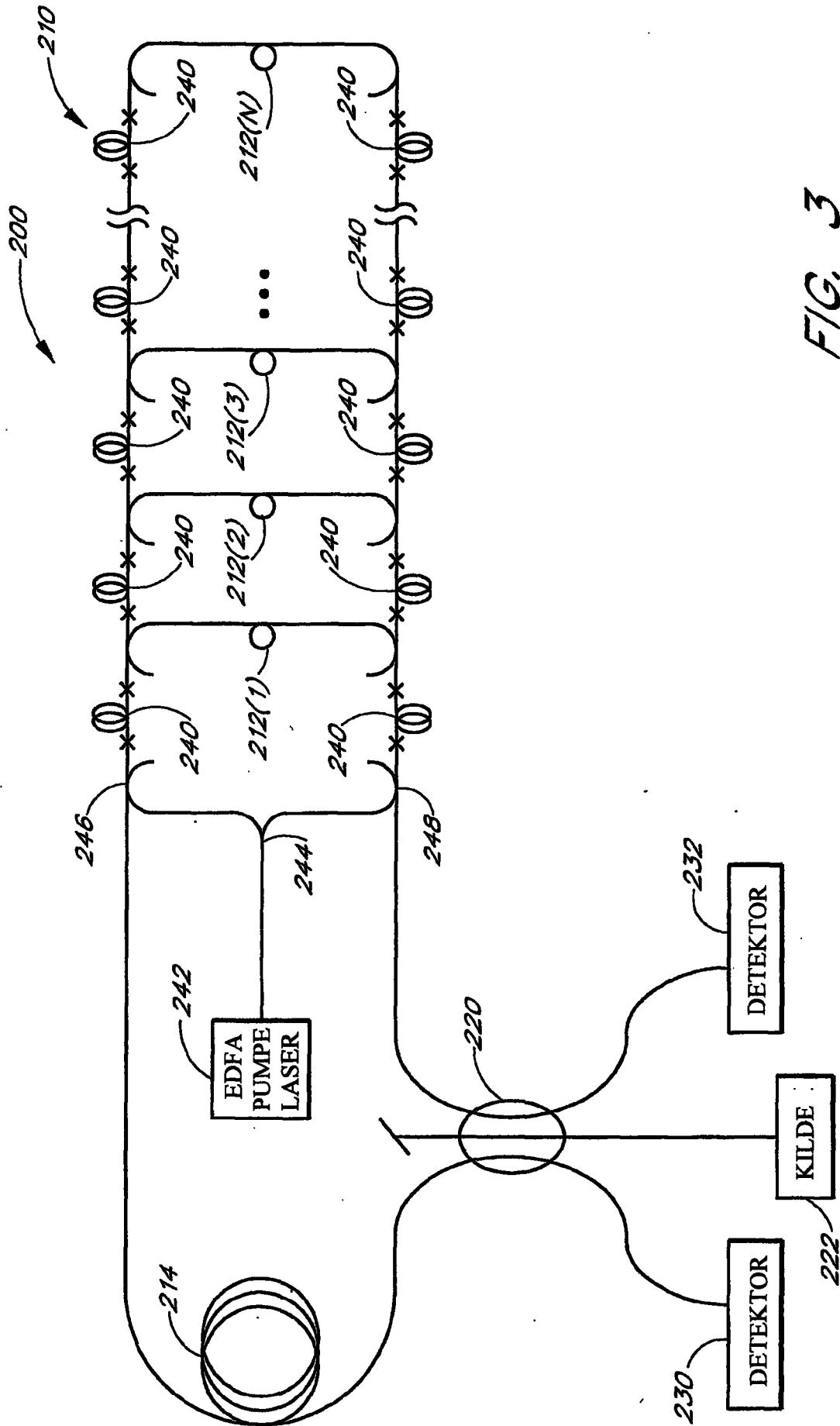


FIG. 3

4/38

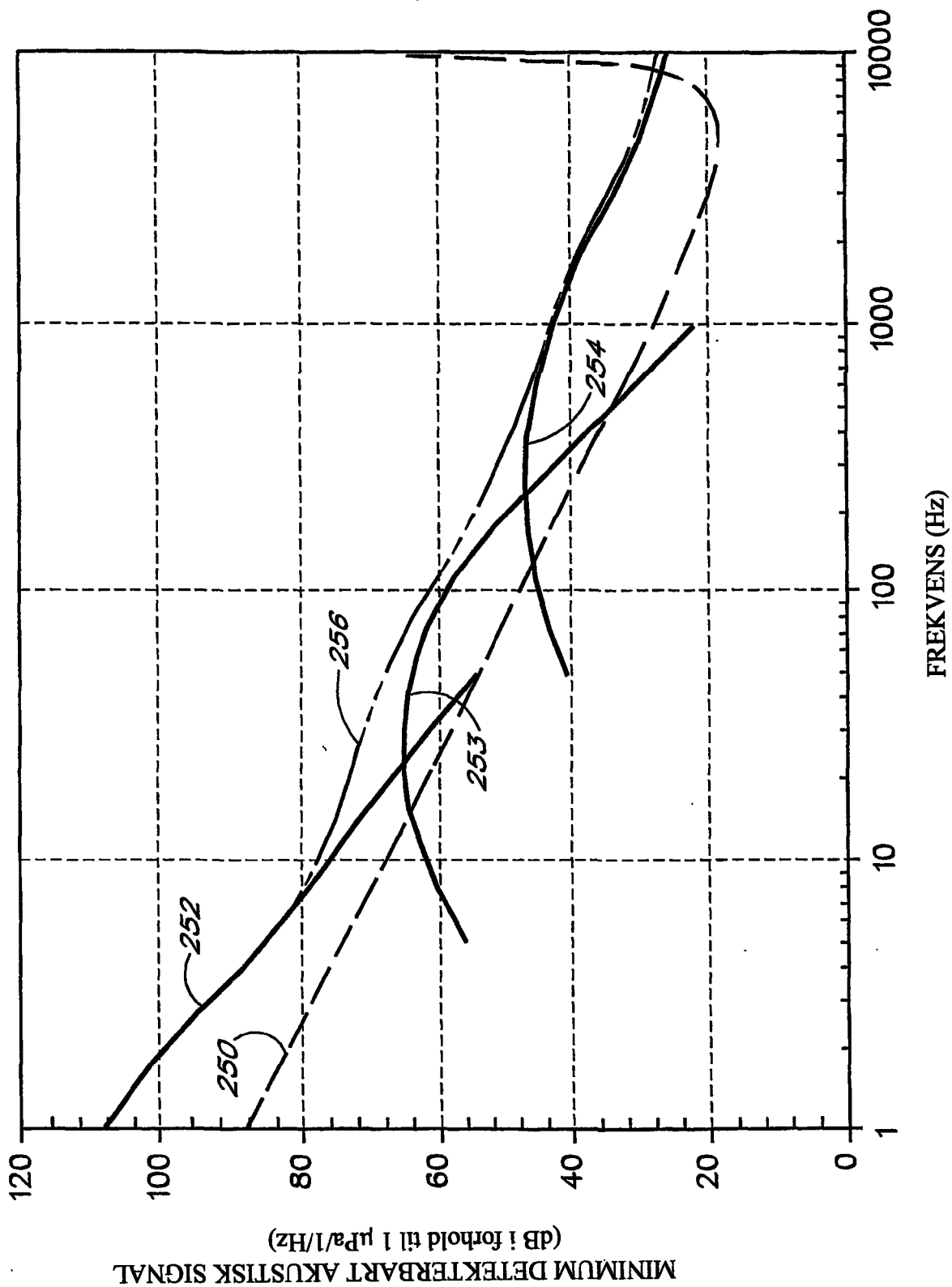
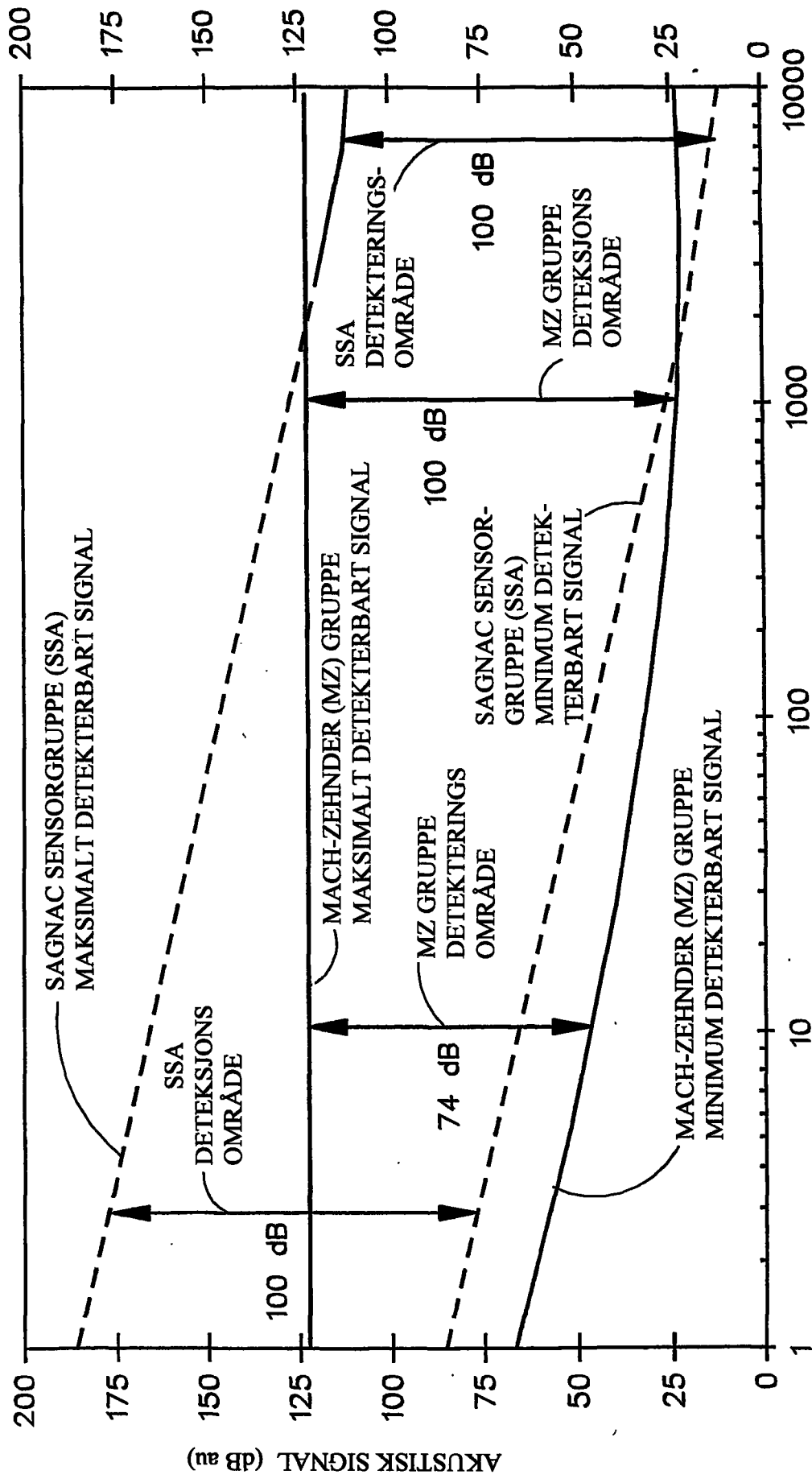


FIG. 4

5/38



FREKVENNS (Hz)

FIG. 5

6/38

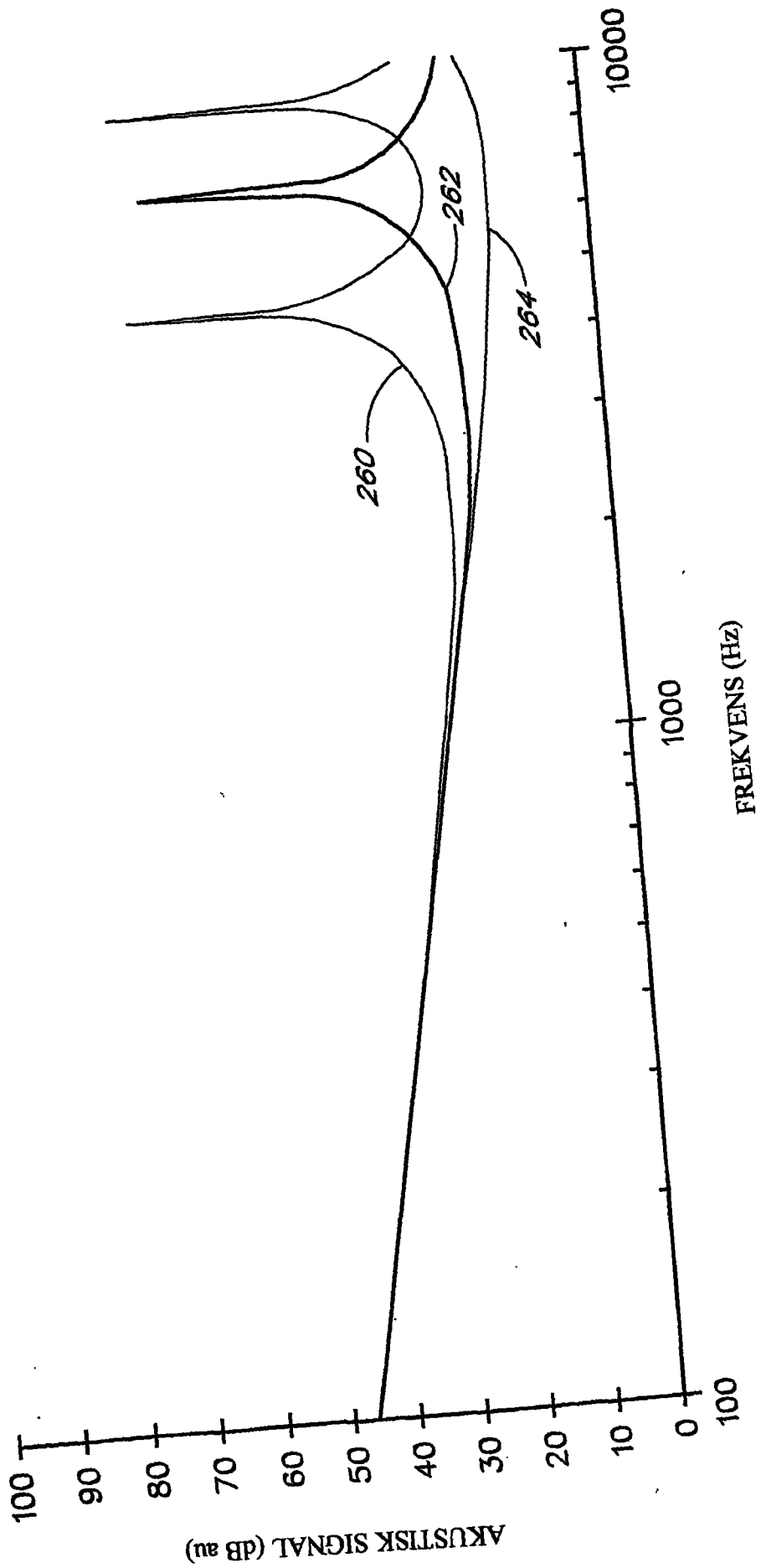


FIG. 6

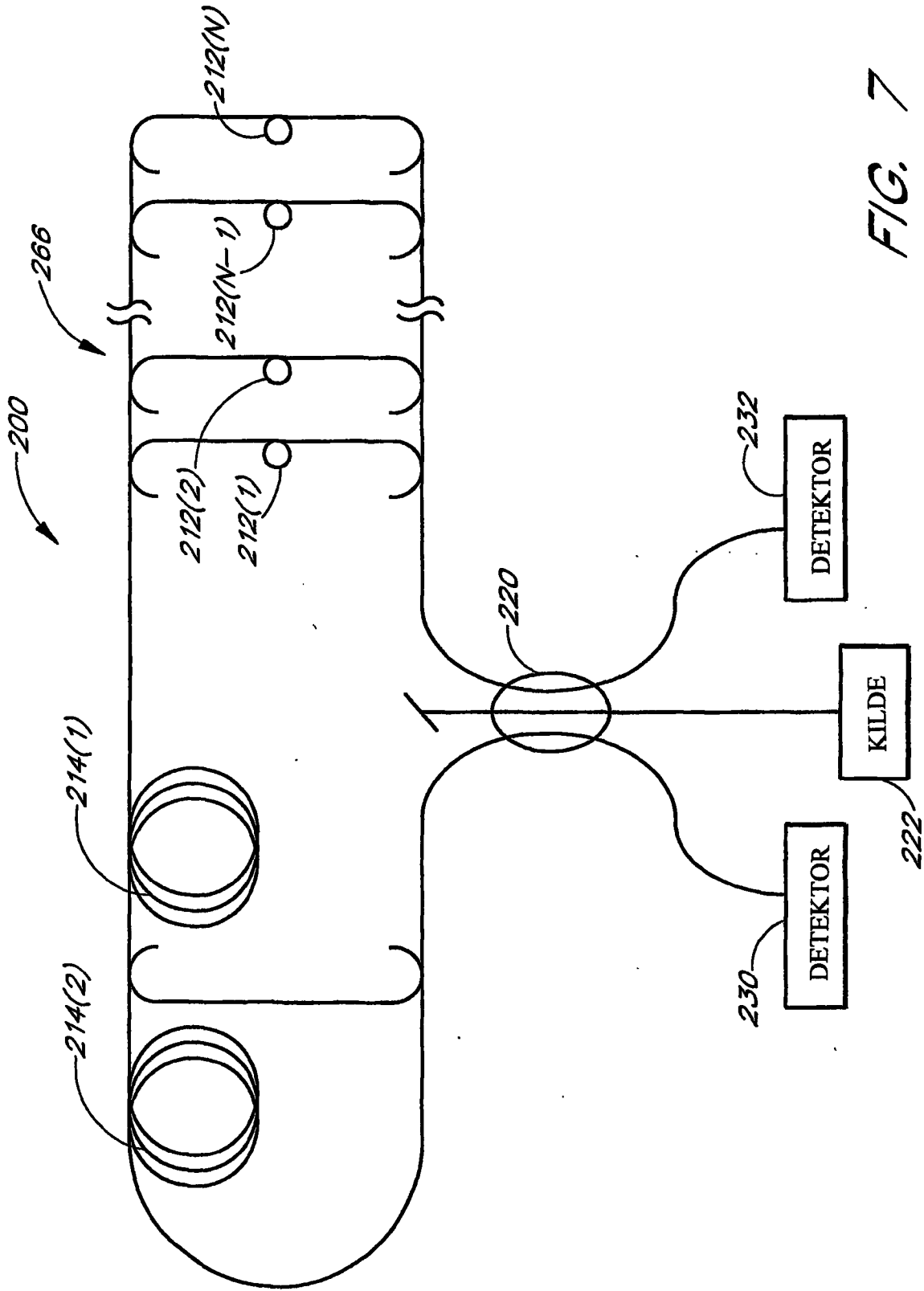


FIG. 7

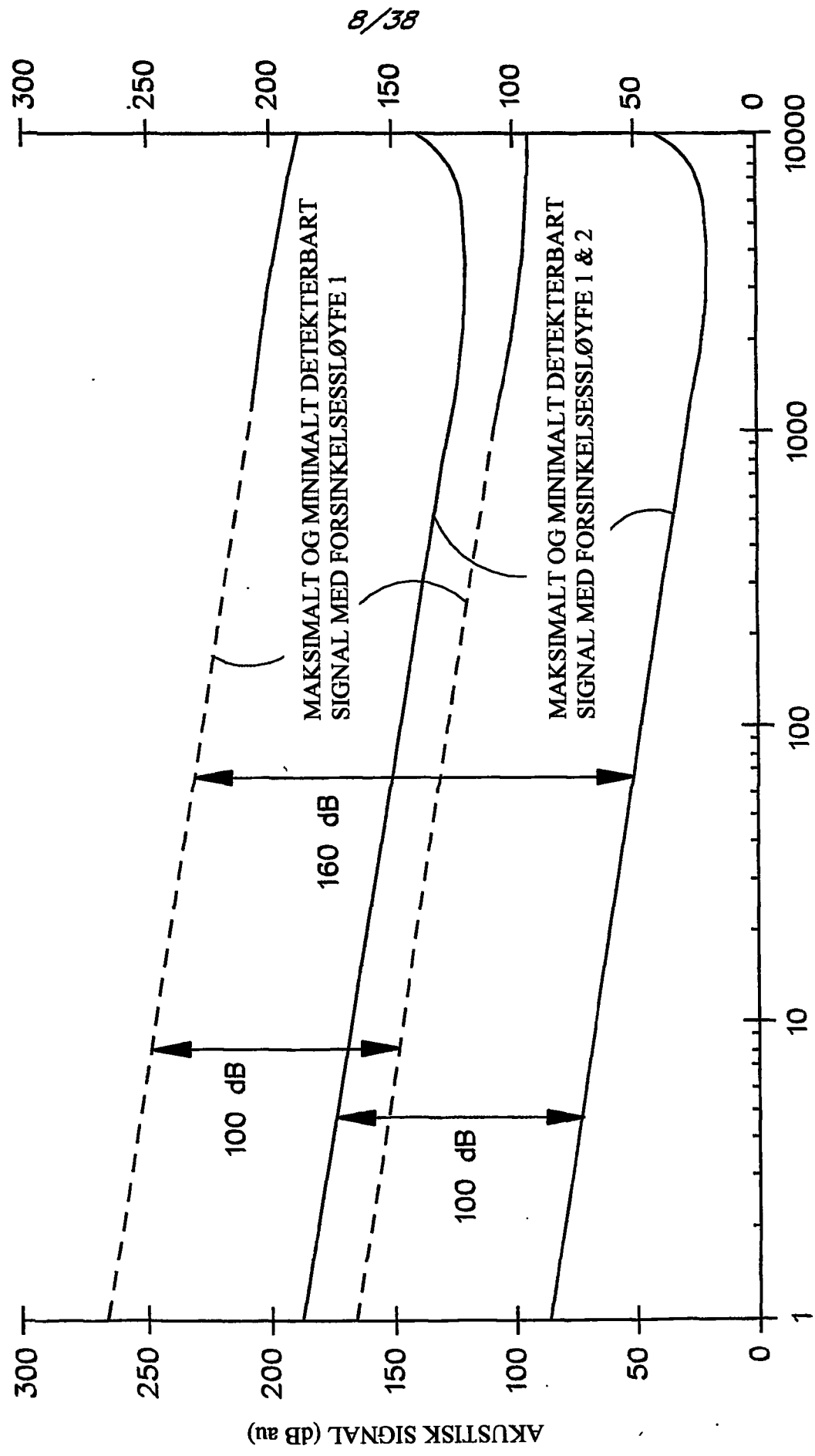


FIG. 8

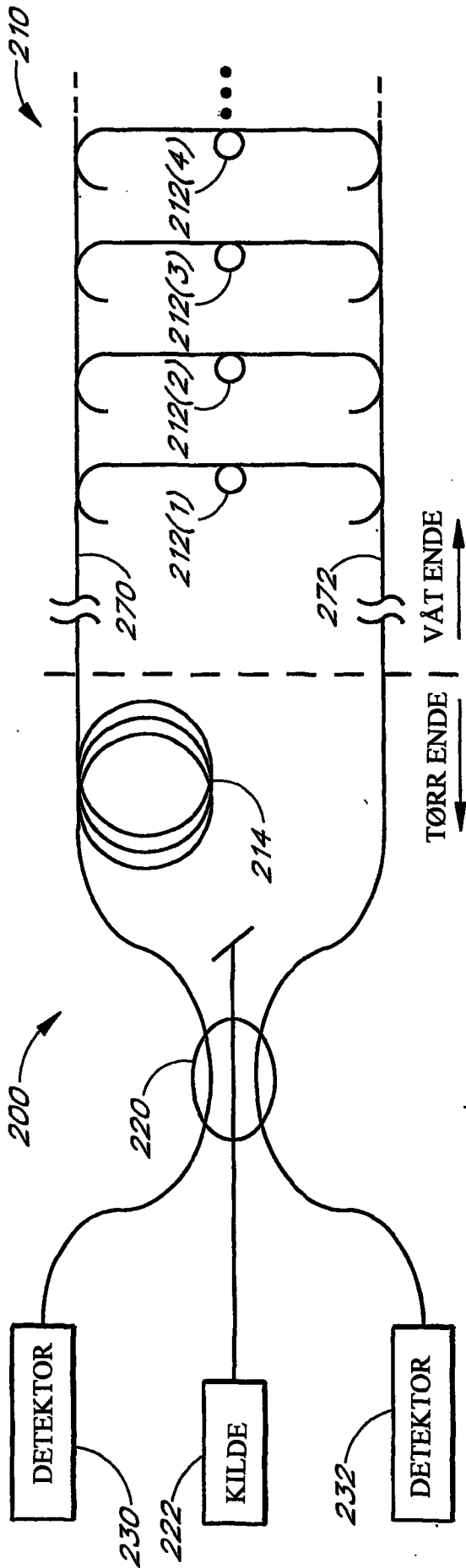


FIG. 9a

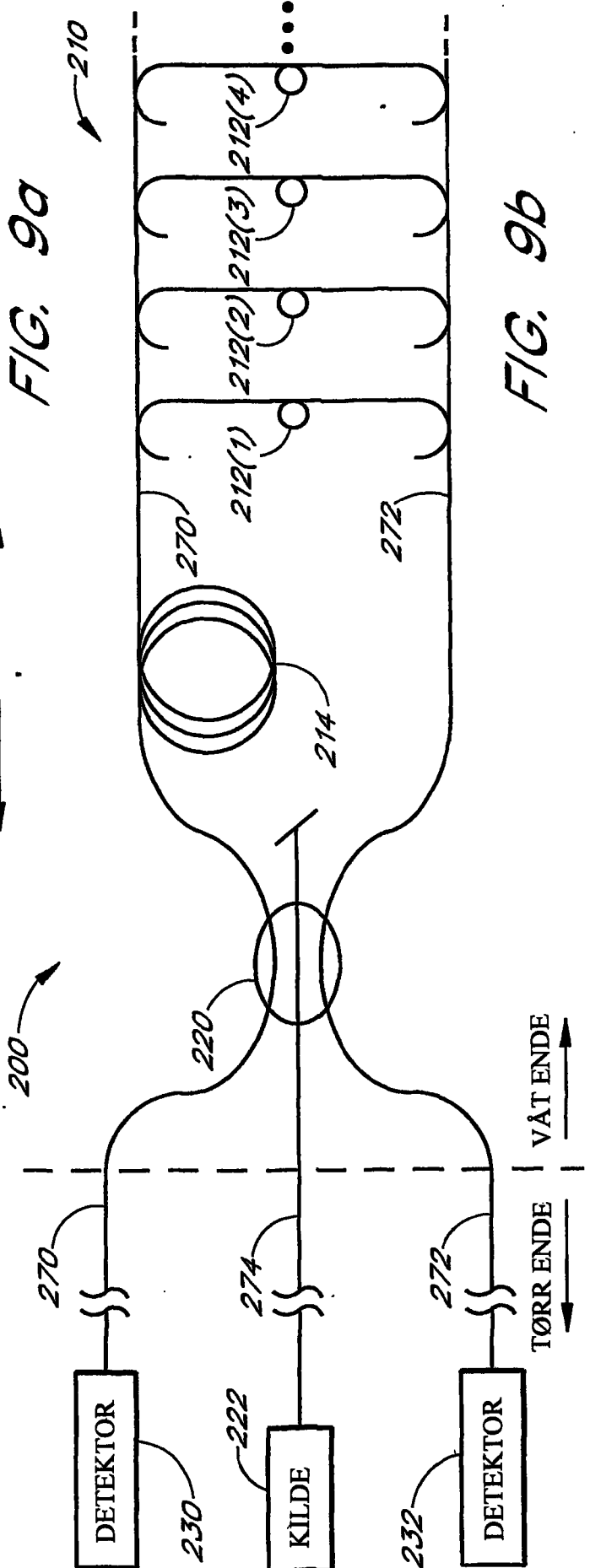


FIG. 9b

10/38

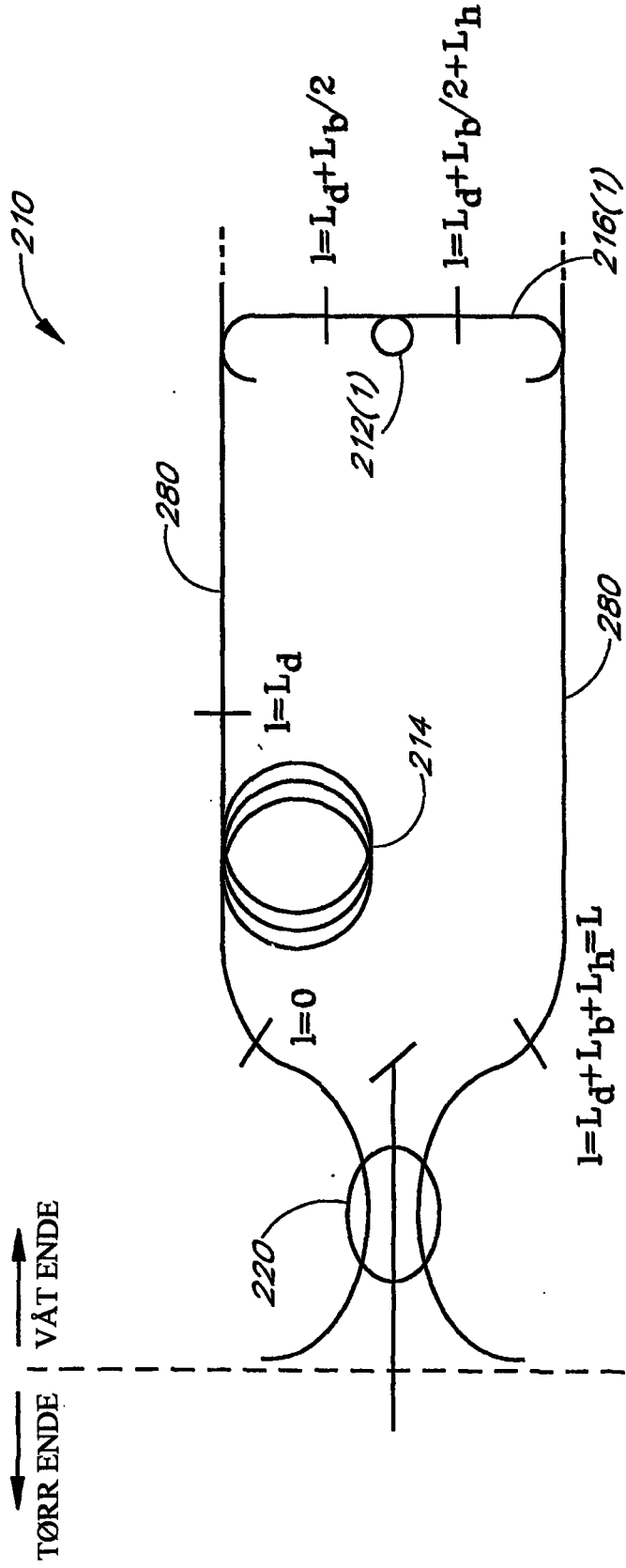


FIG. 10

11/38

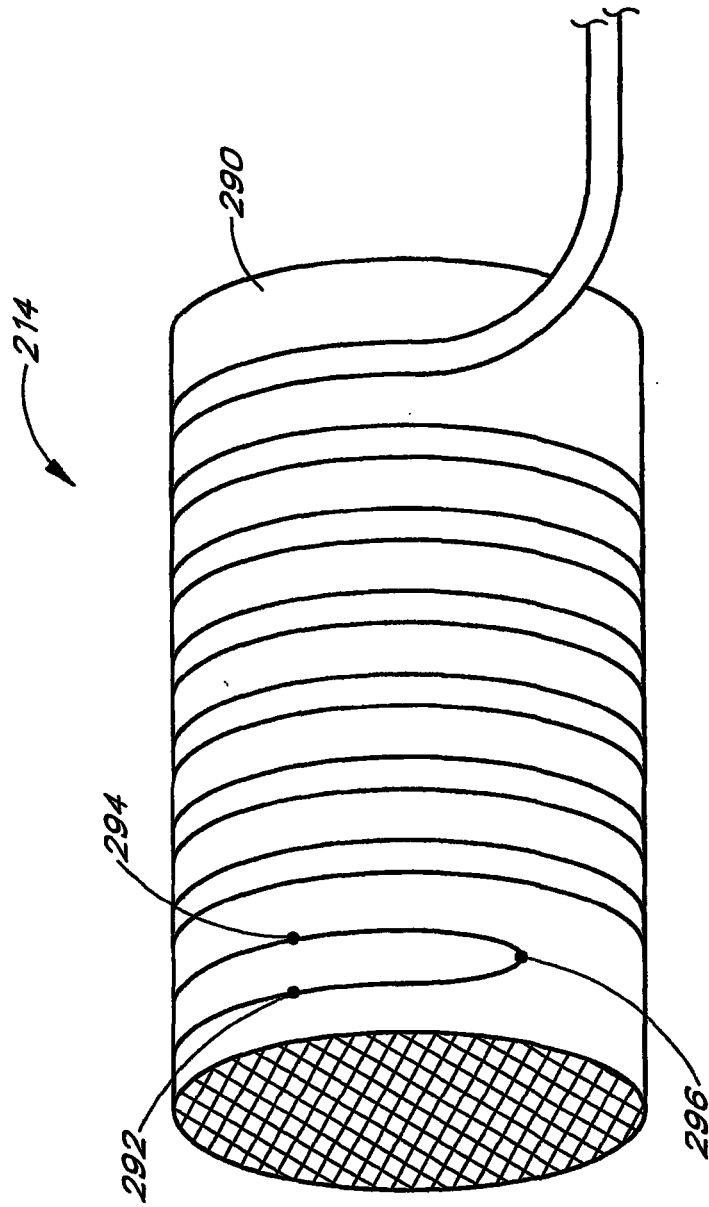


FIG. 11

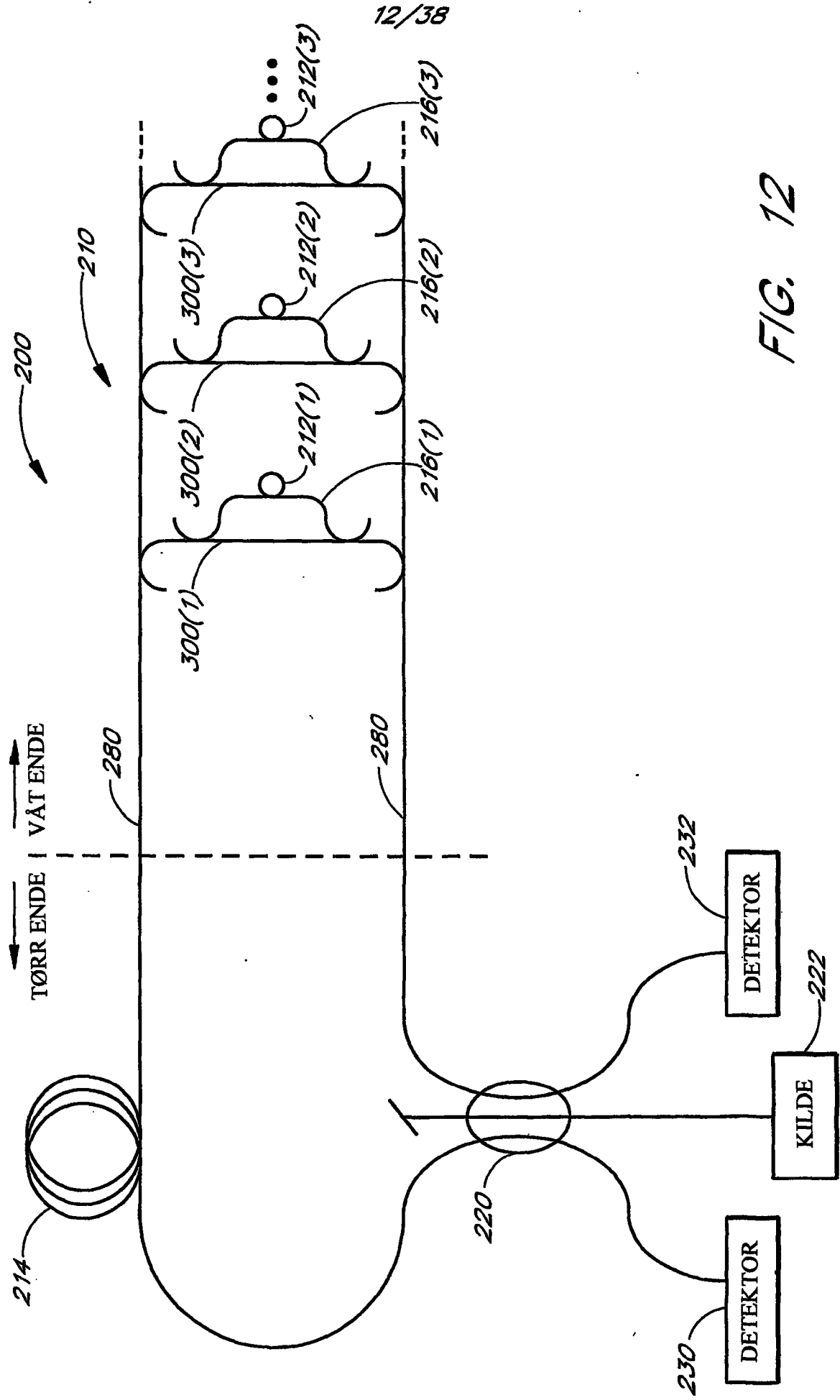


FIG. 12

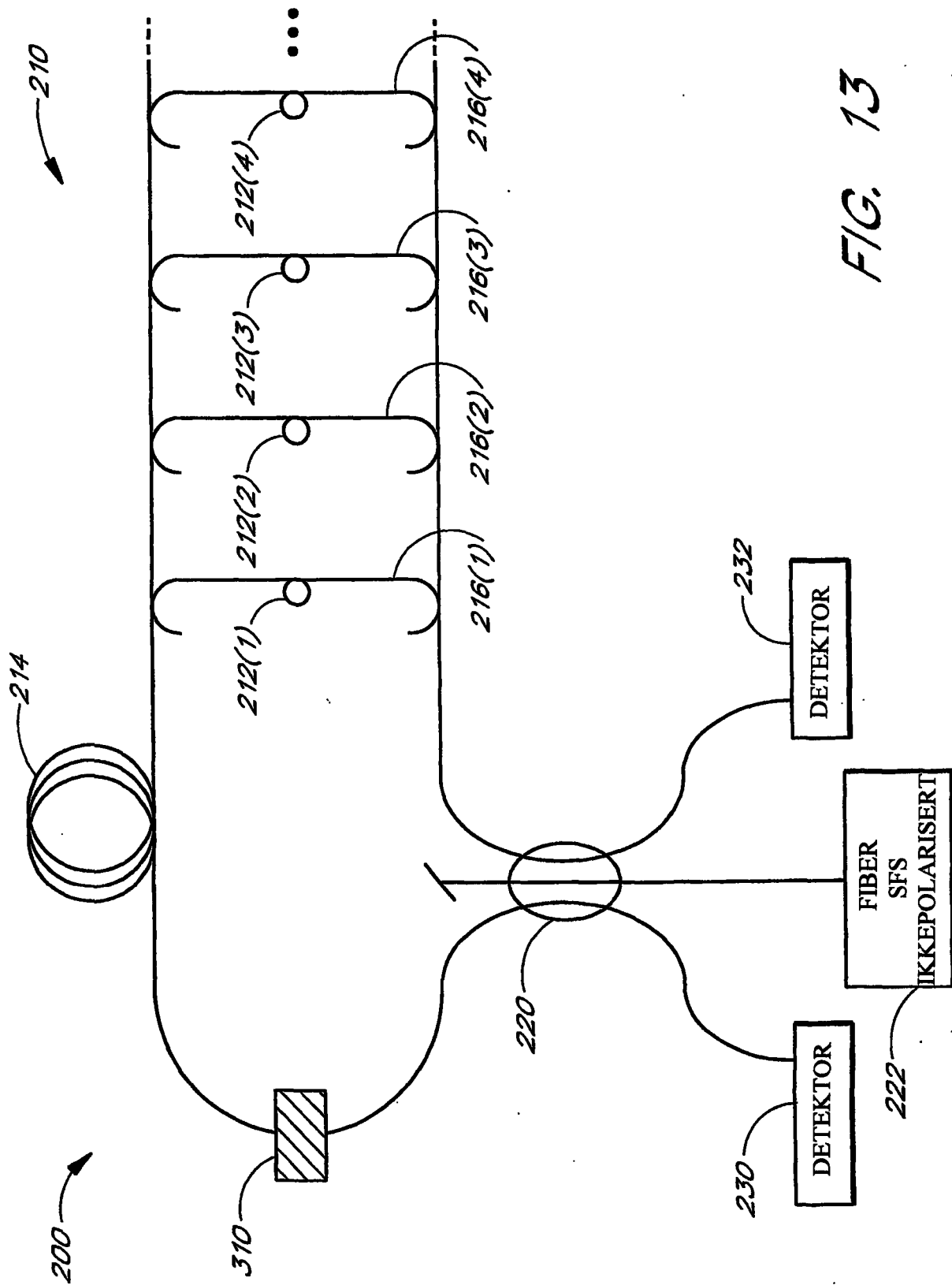


FIG. 13

14/38

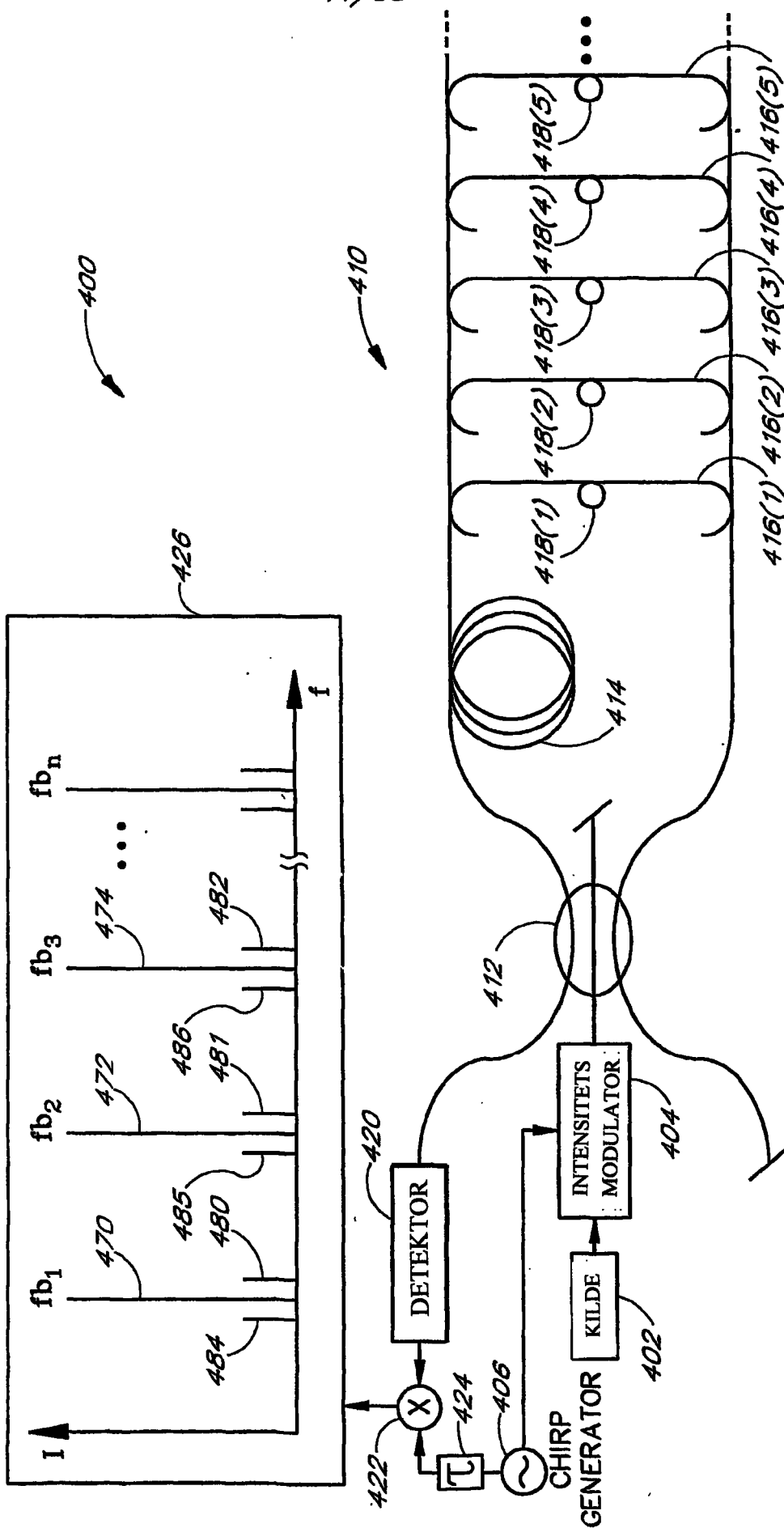


FIG. 14

15/38

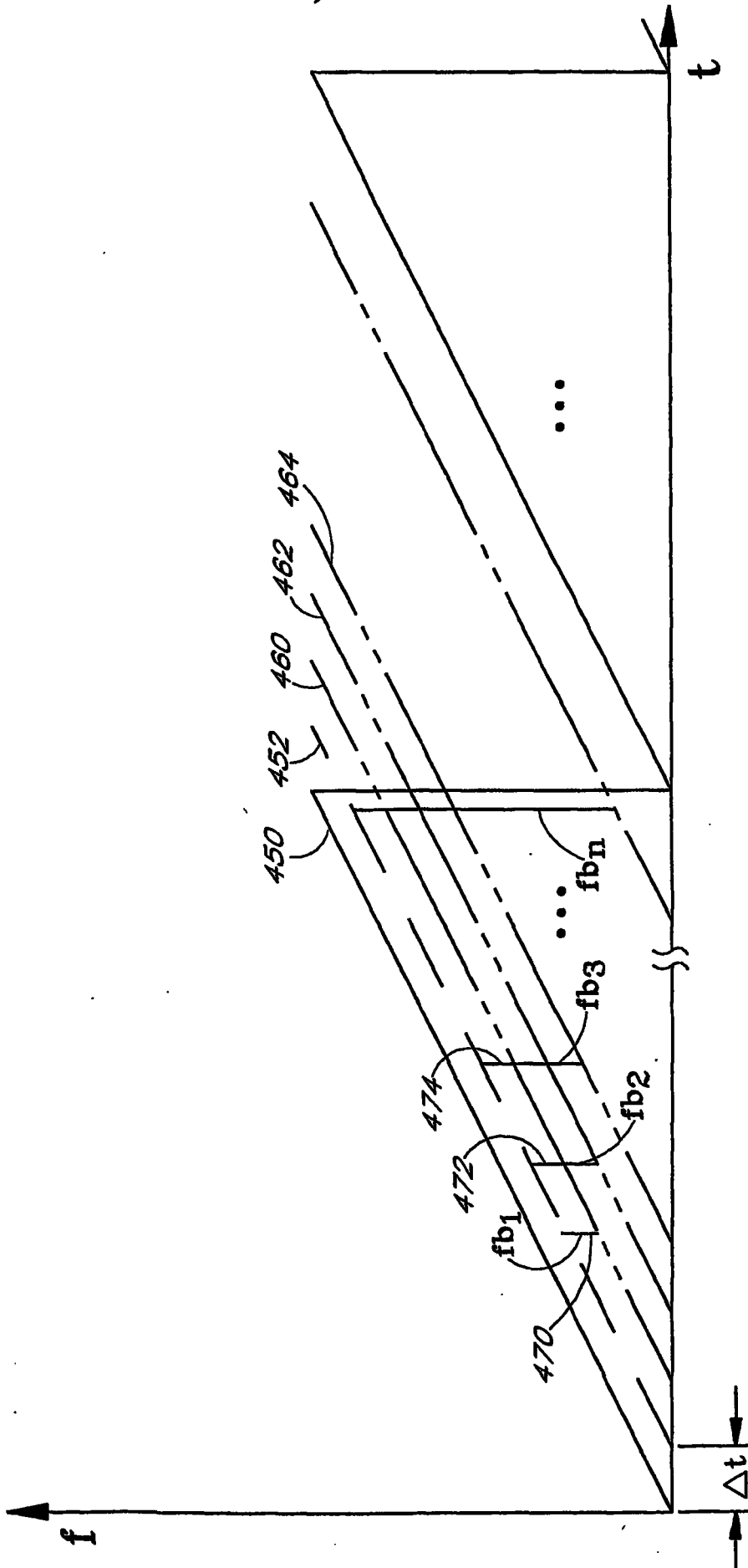


FIG. 15

16/38

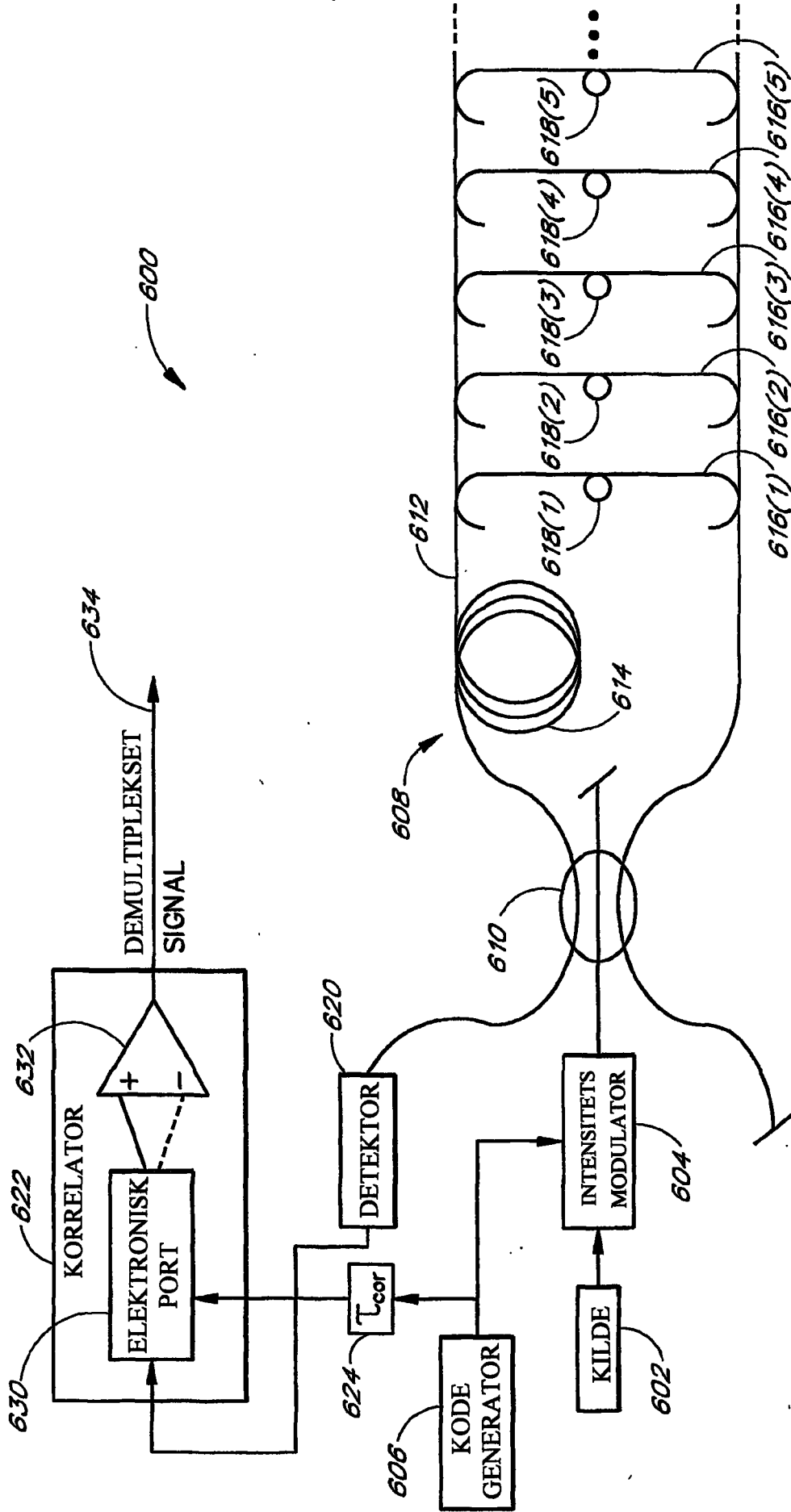


FIG. 16

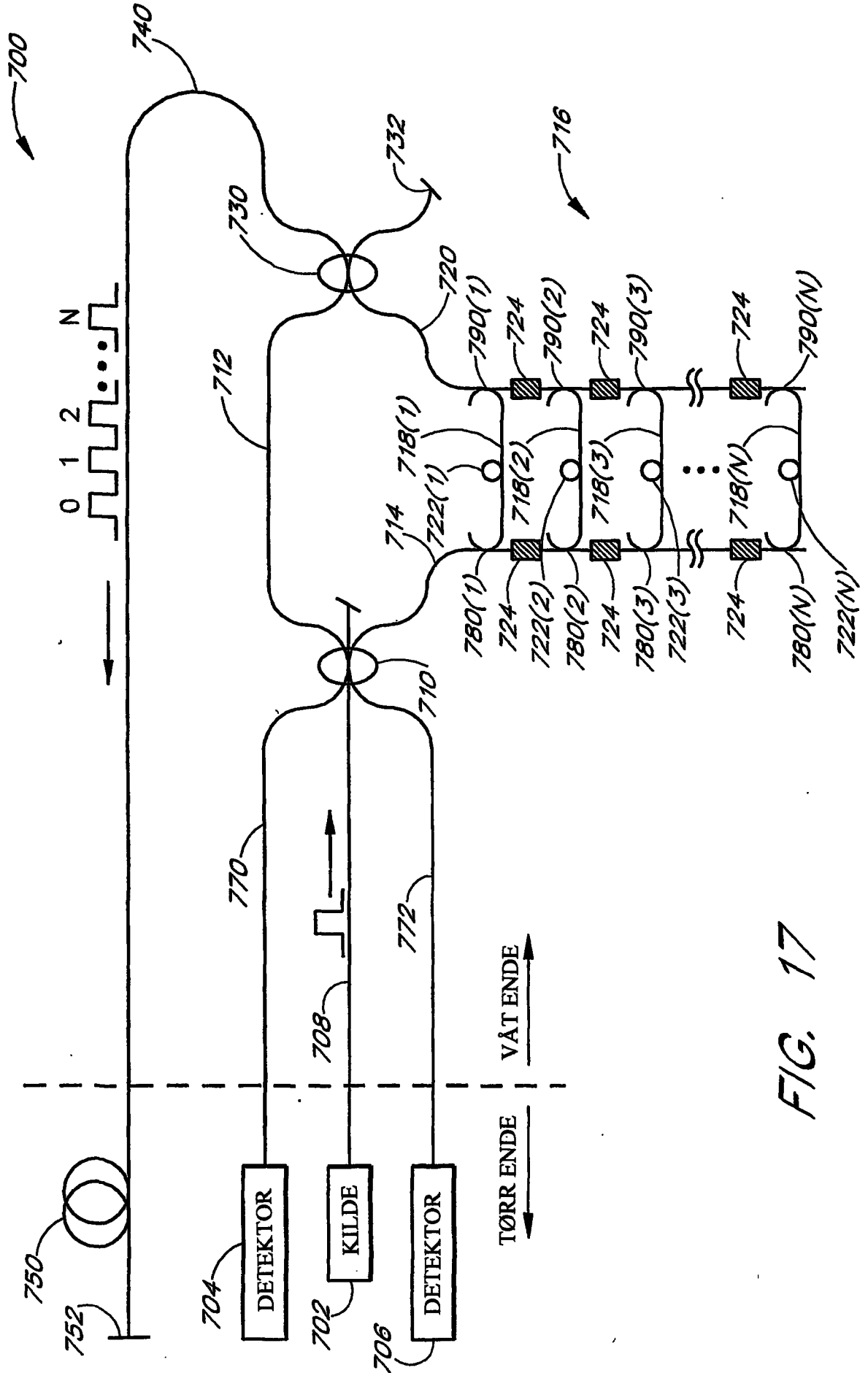


FIG. 17

18/38

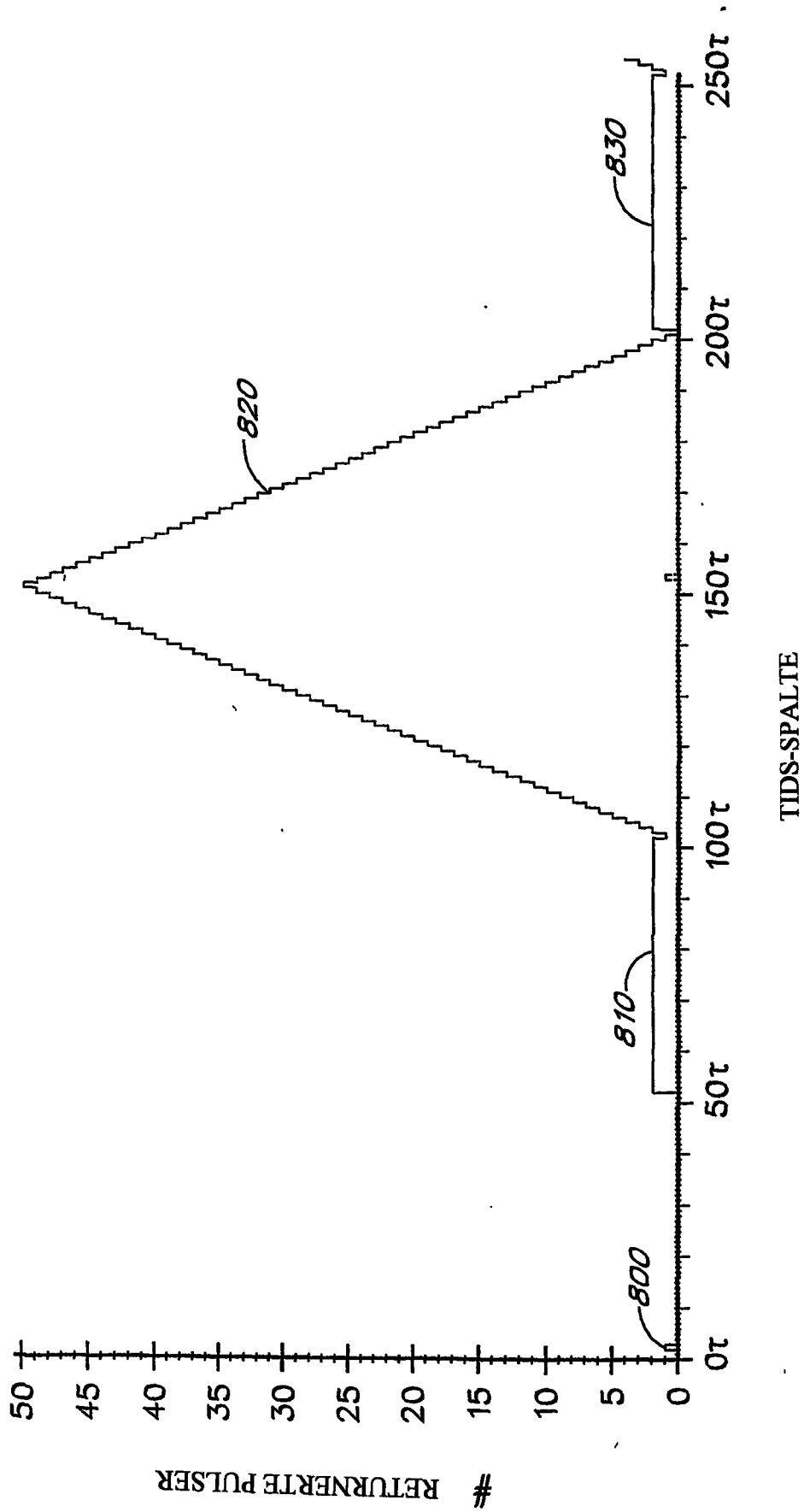


FIG. 18

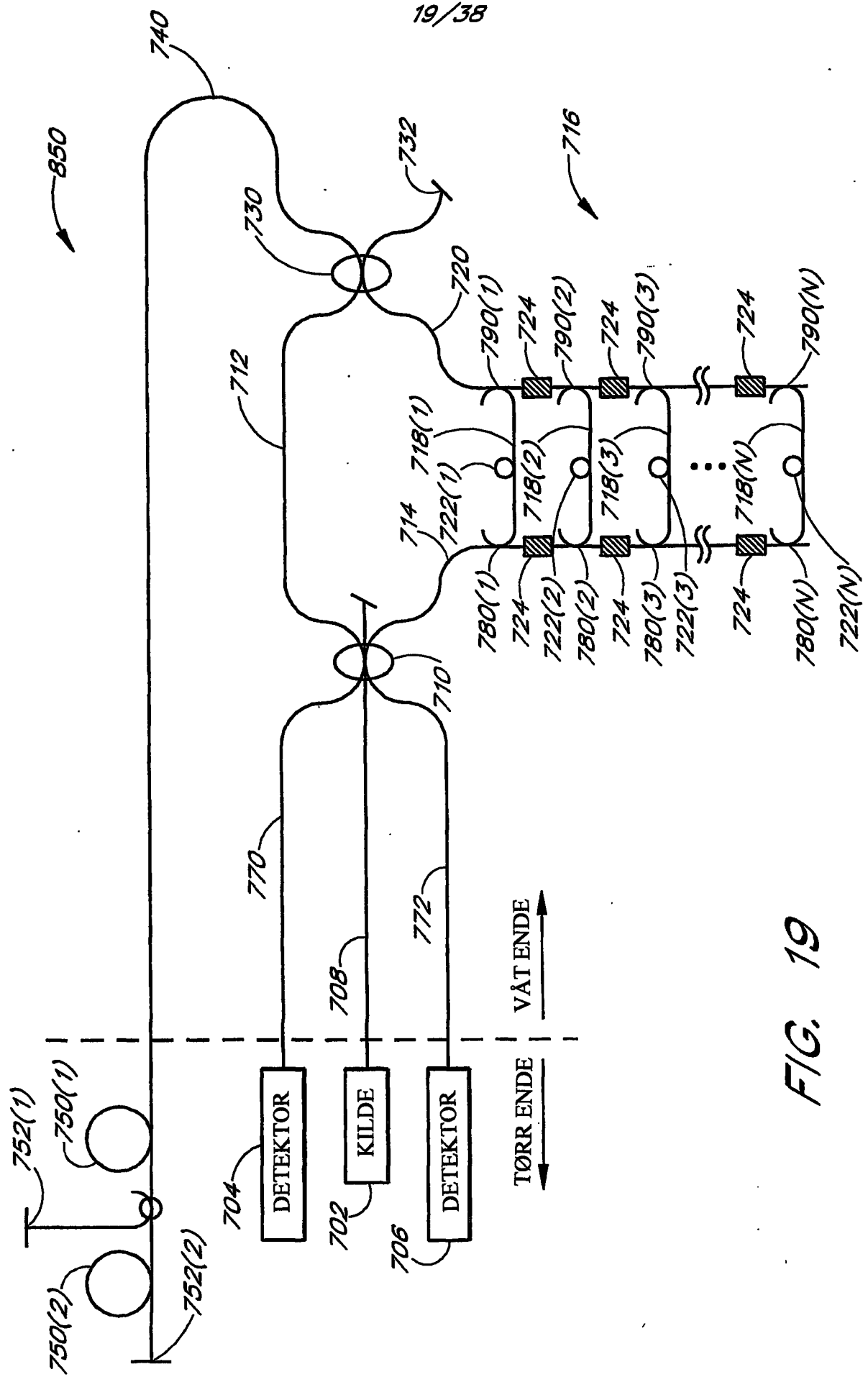


FIG. 19

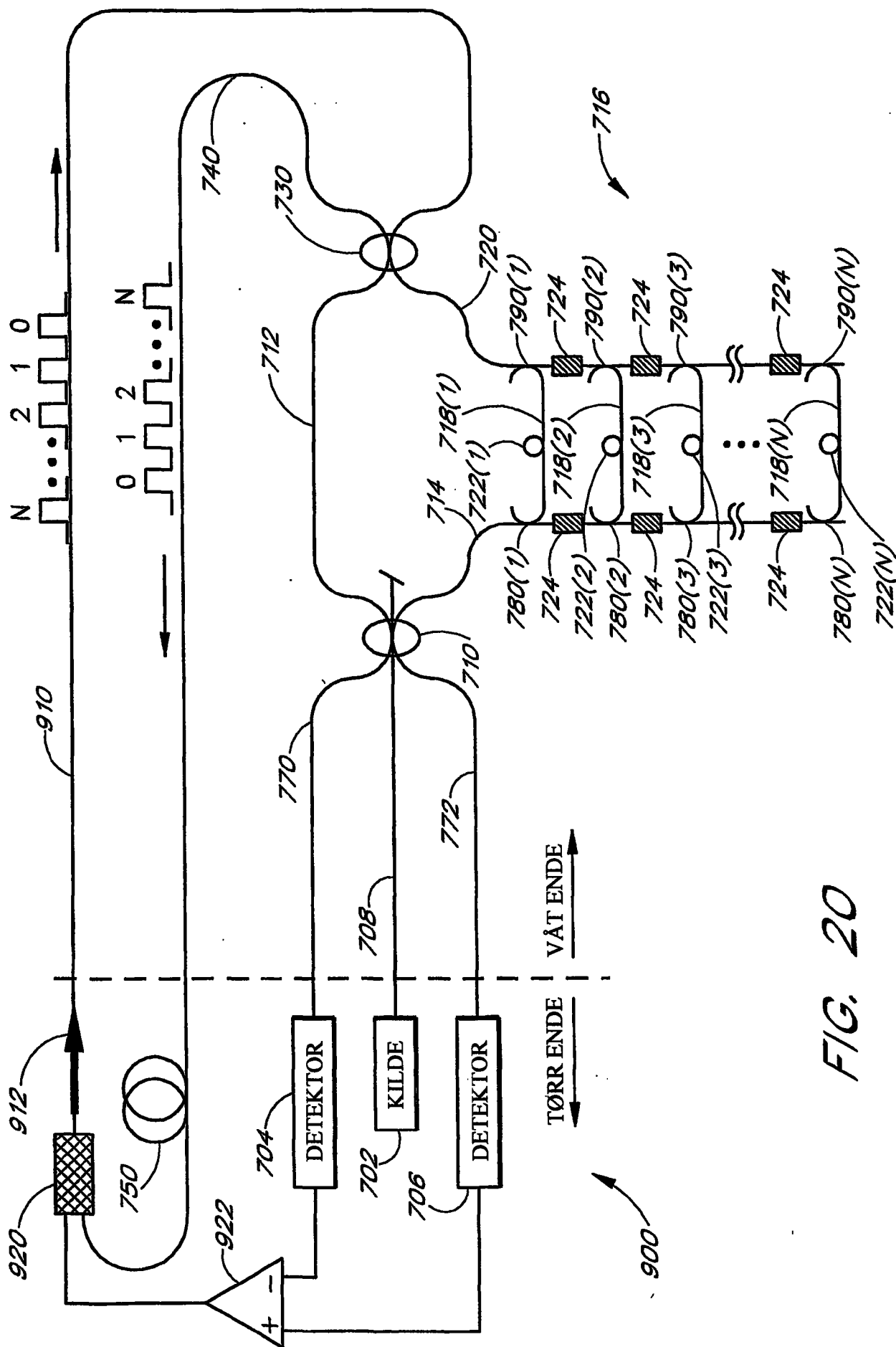


FIG. 20

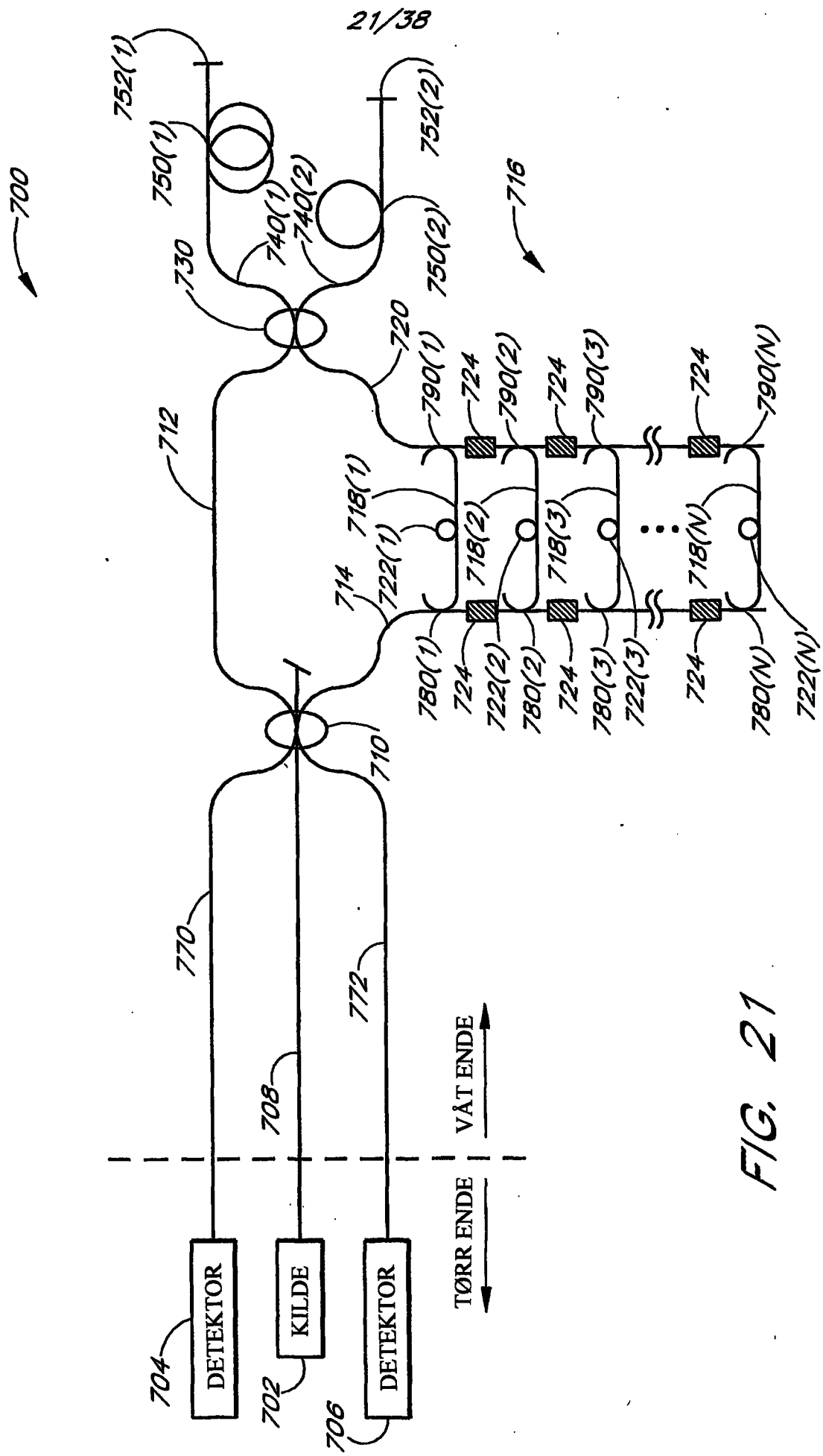


FIG. 21

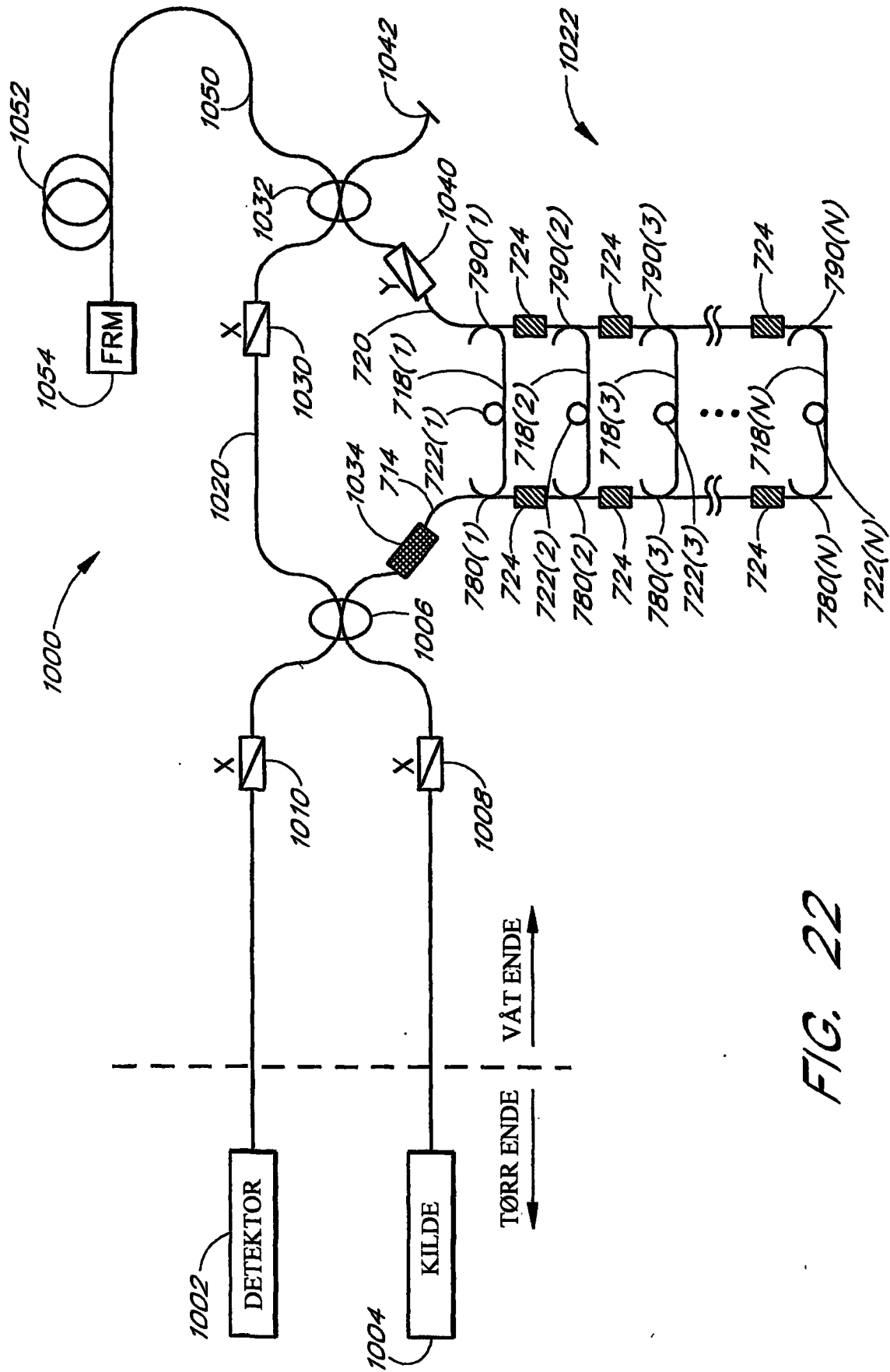


FIG. 22

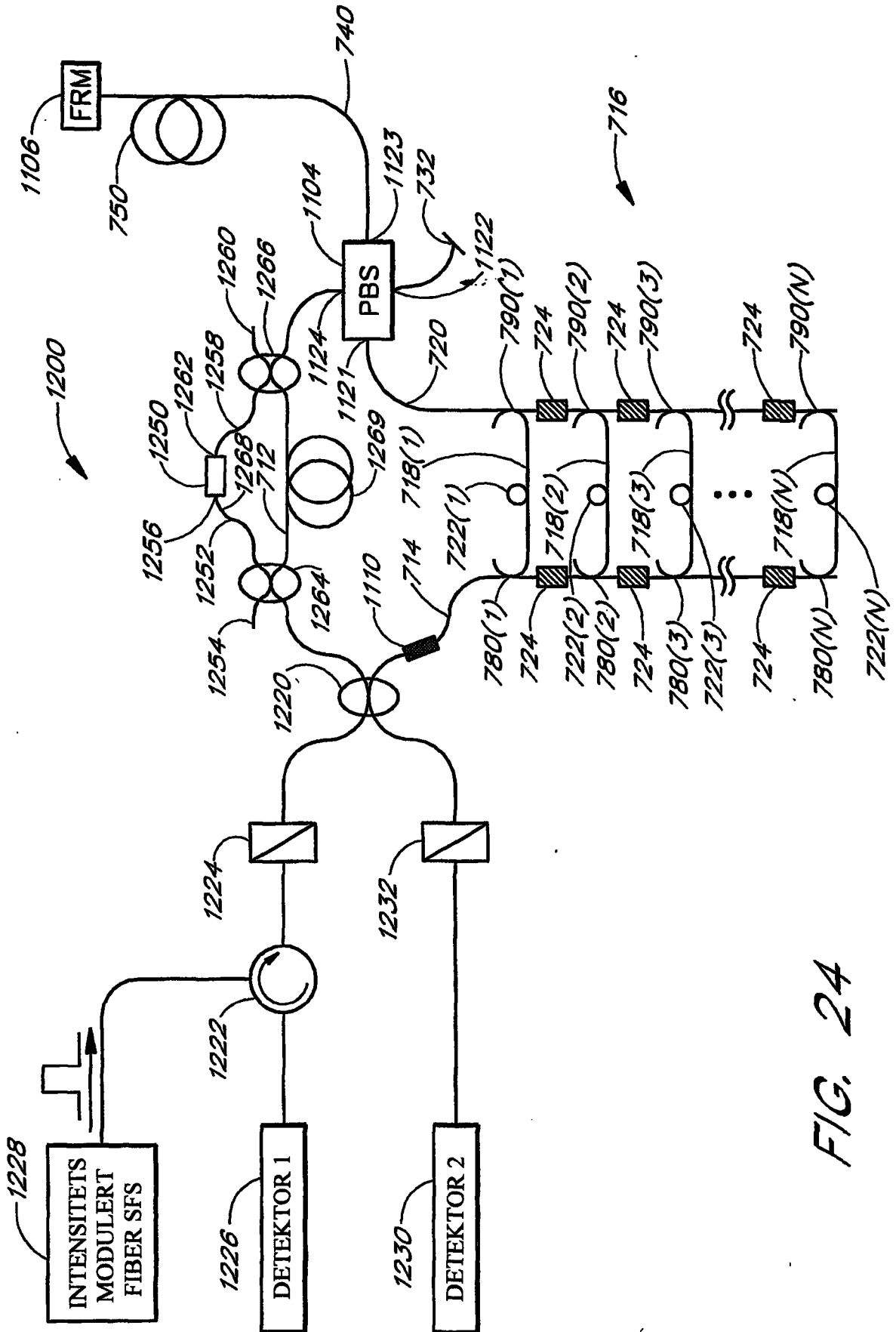


FIG. 24

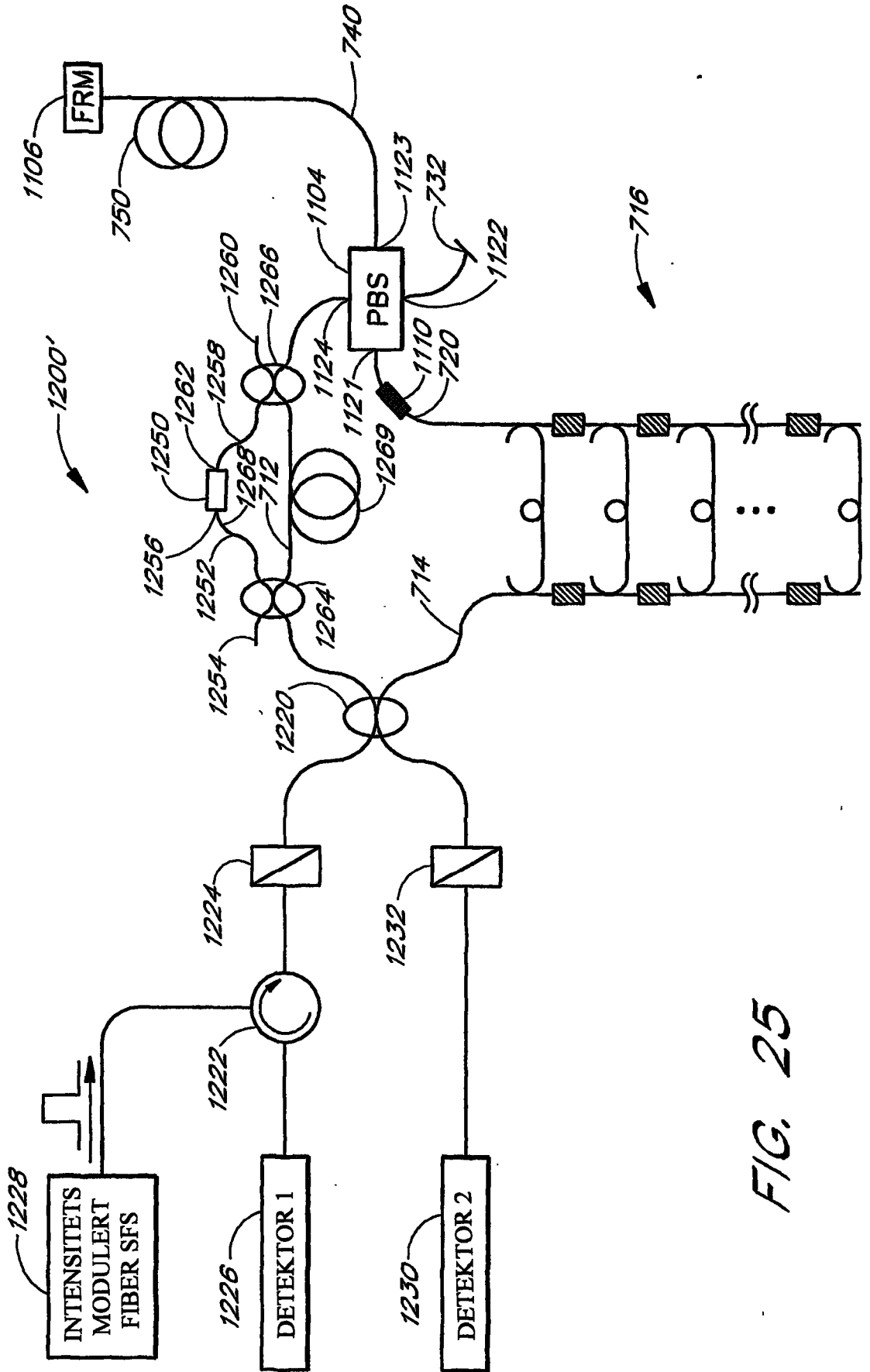


FIG. 25

FIG. 26

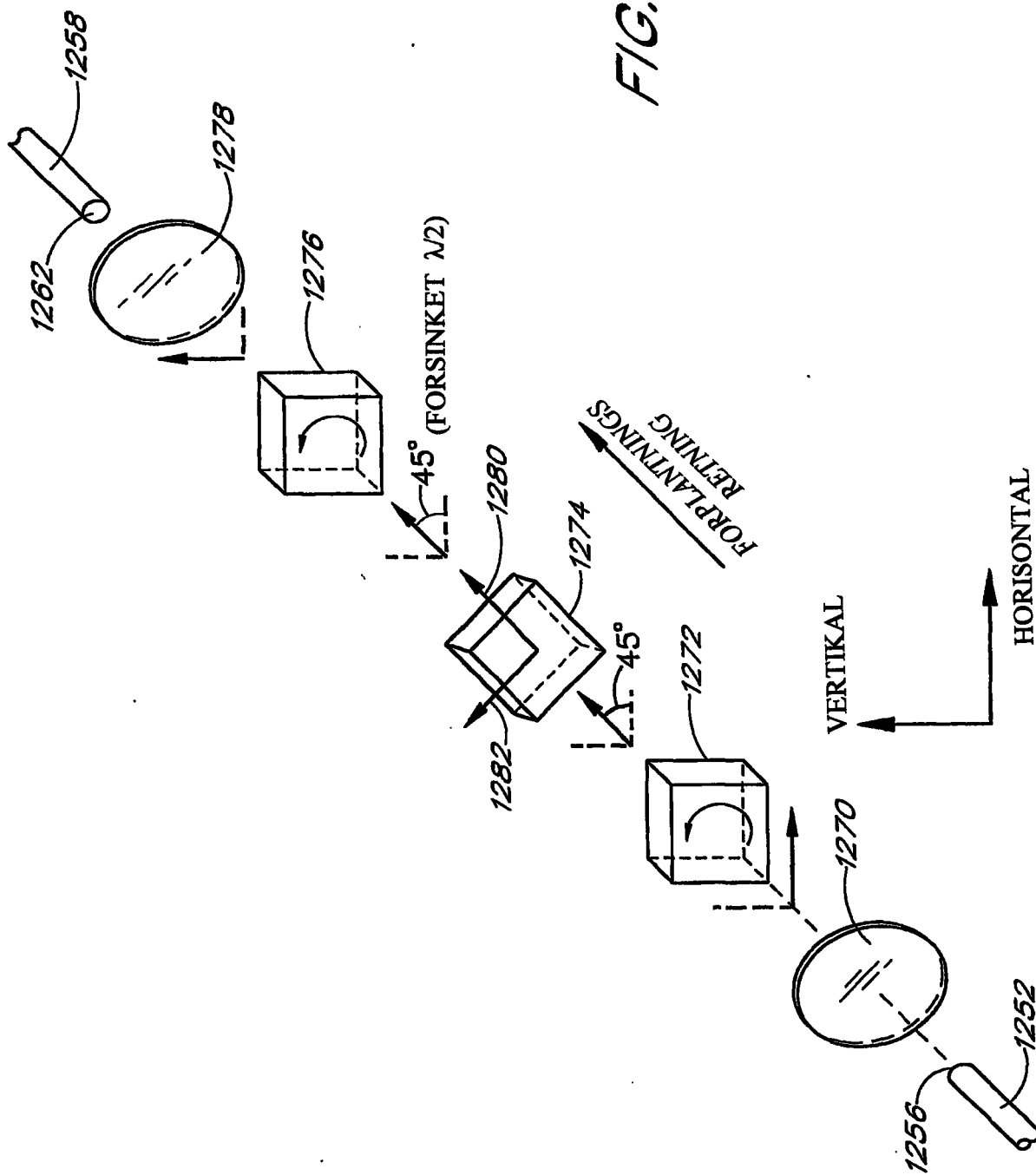


FIG. 27

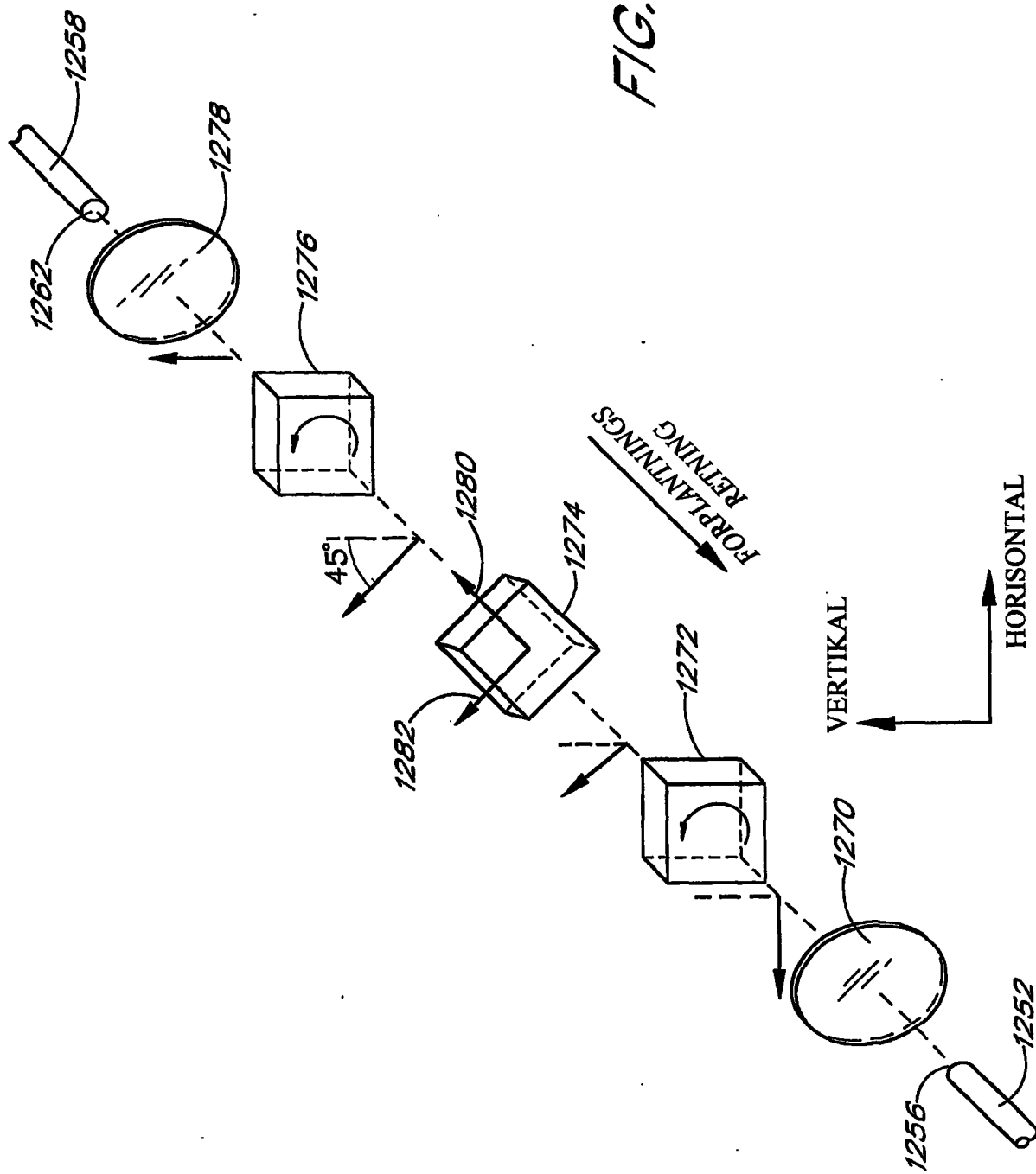


FIG. 28

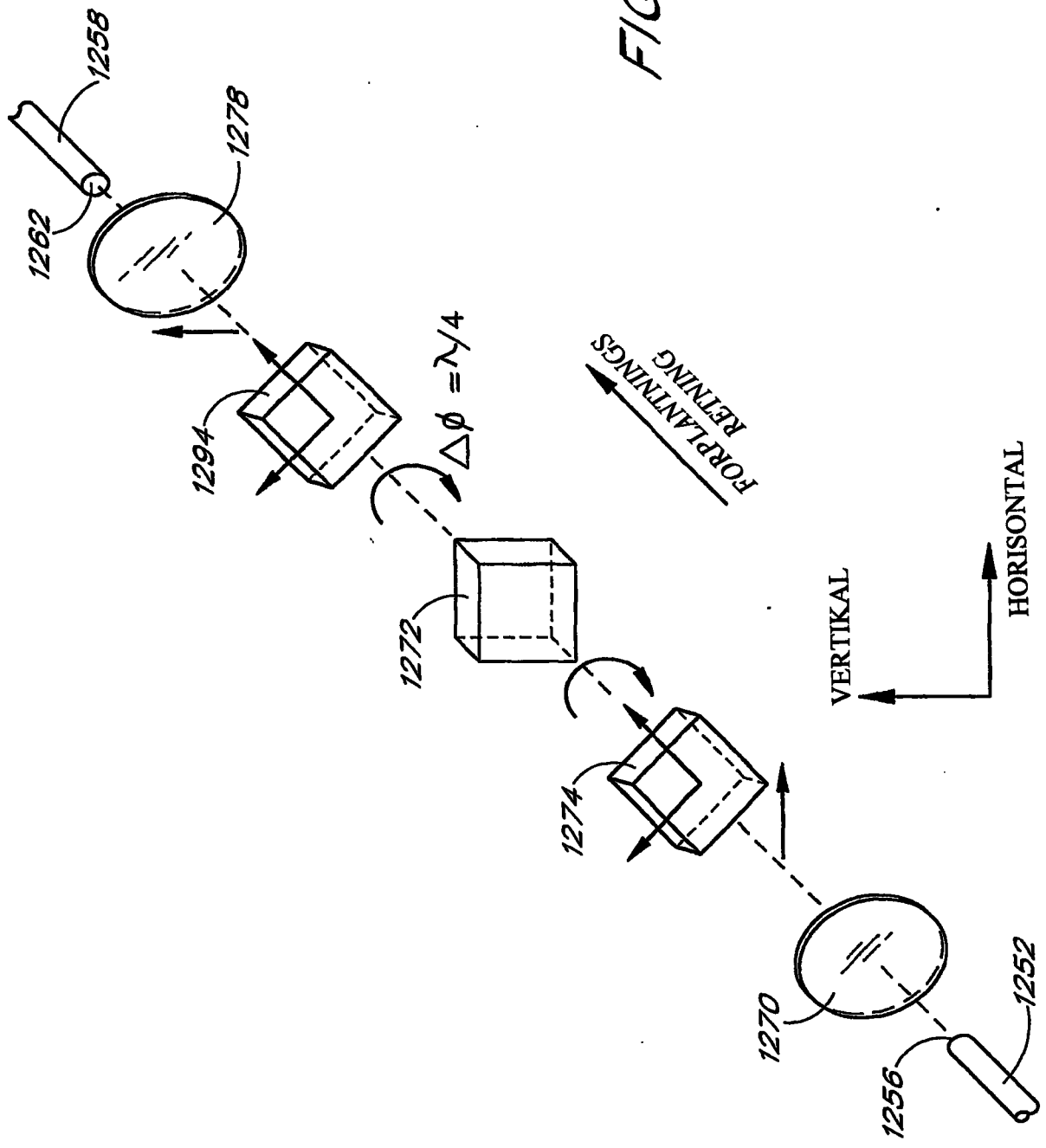
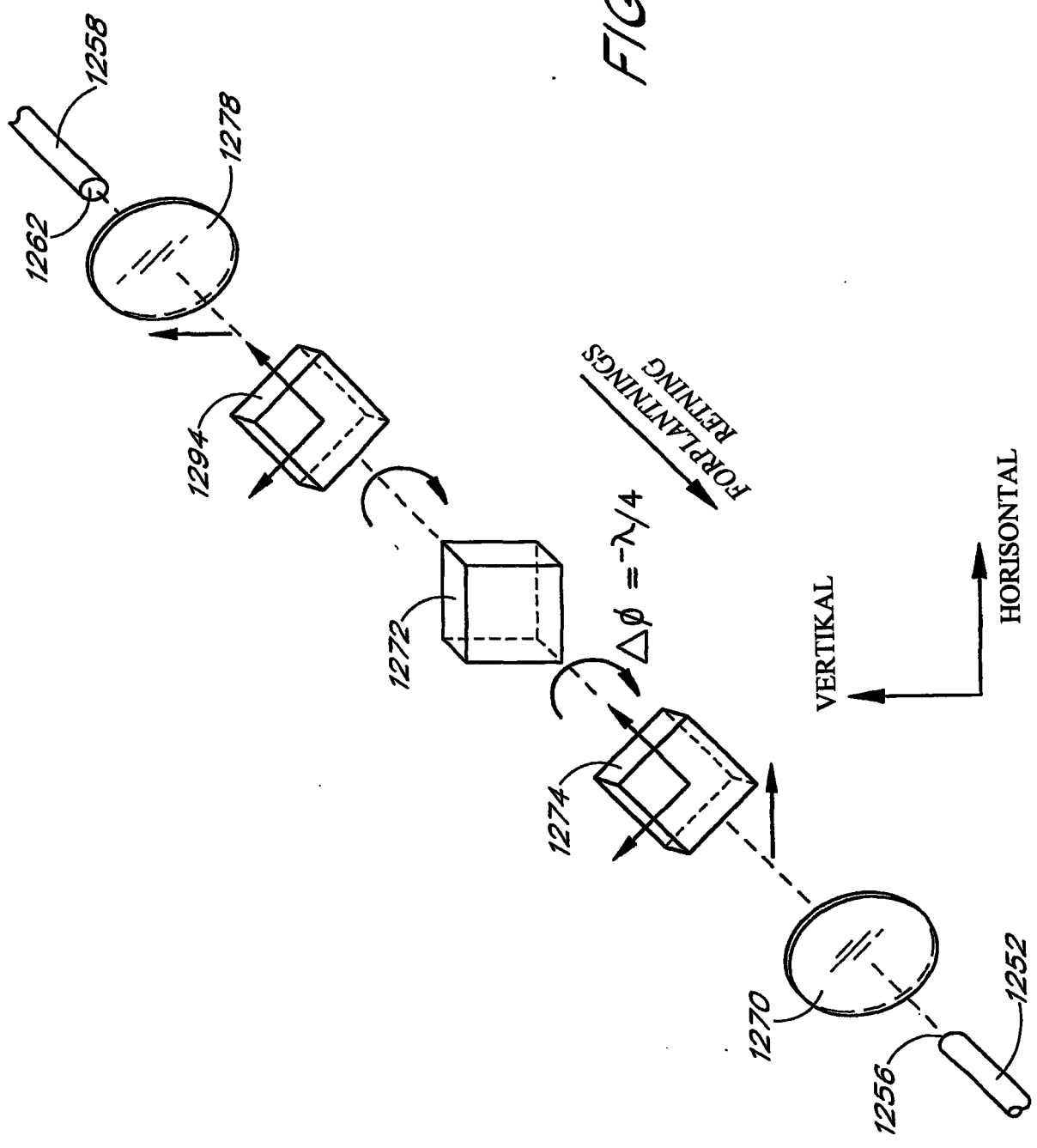


FIG. 29



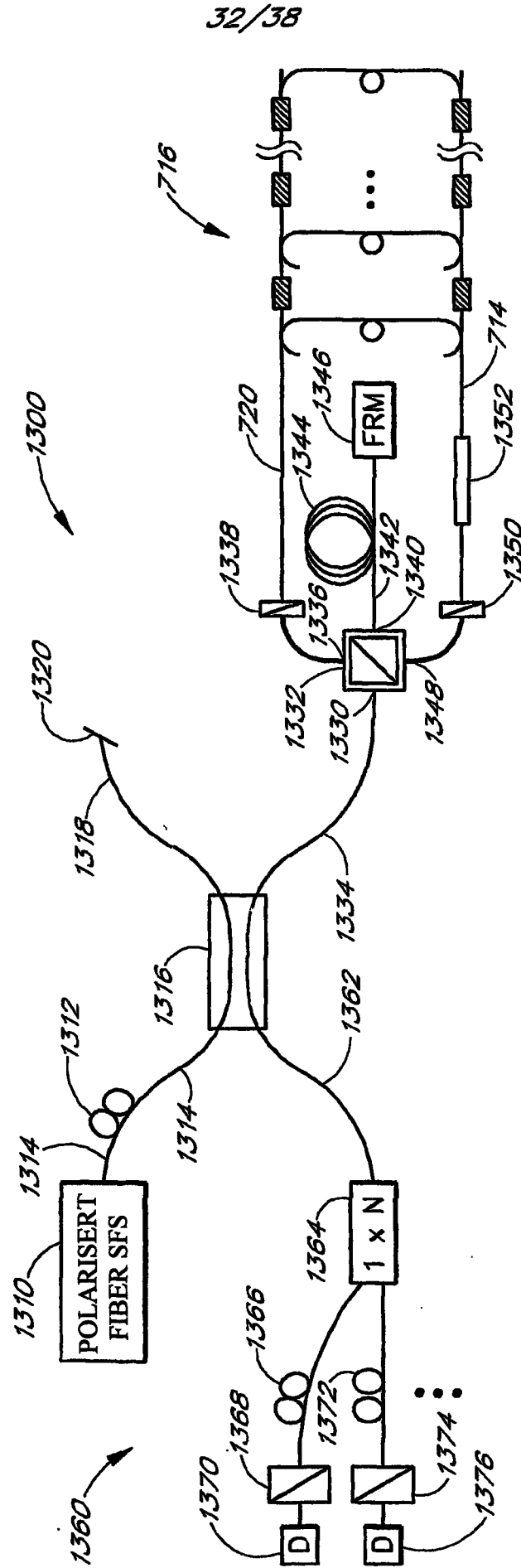


FIG. 30

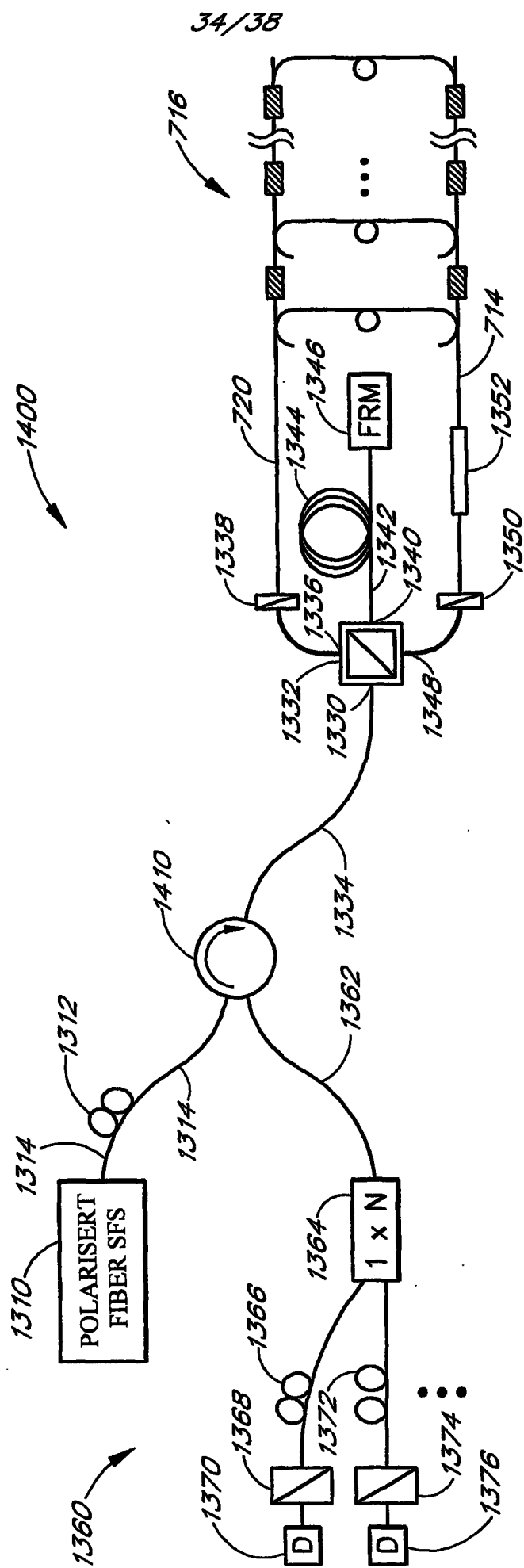


FIG. 32

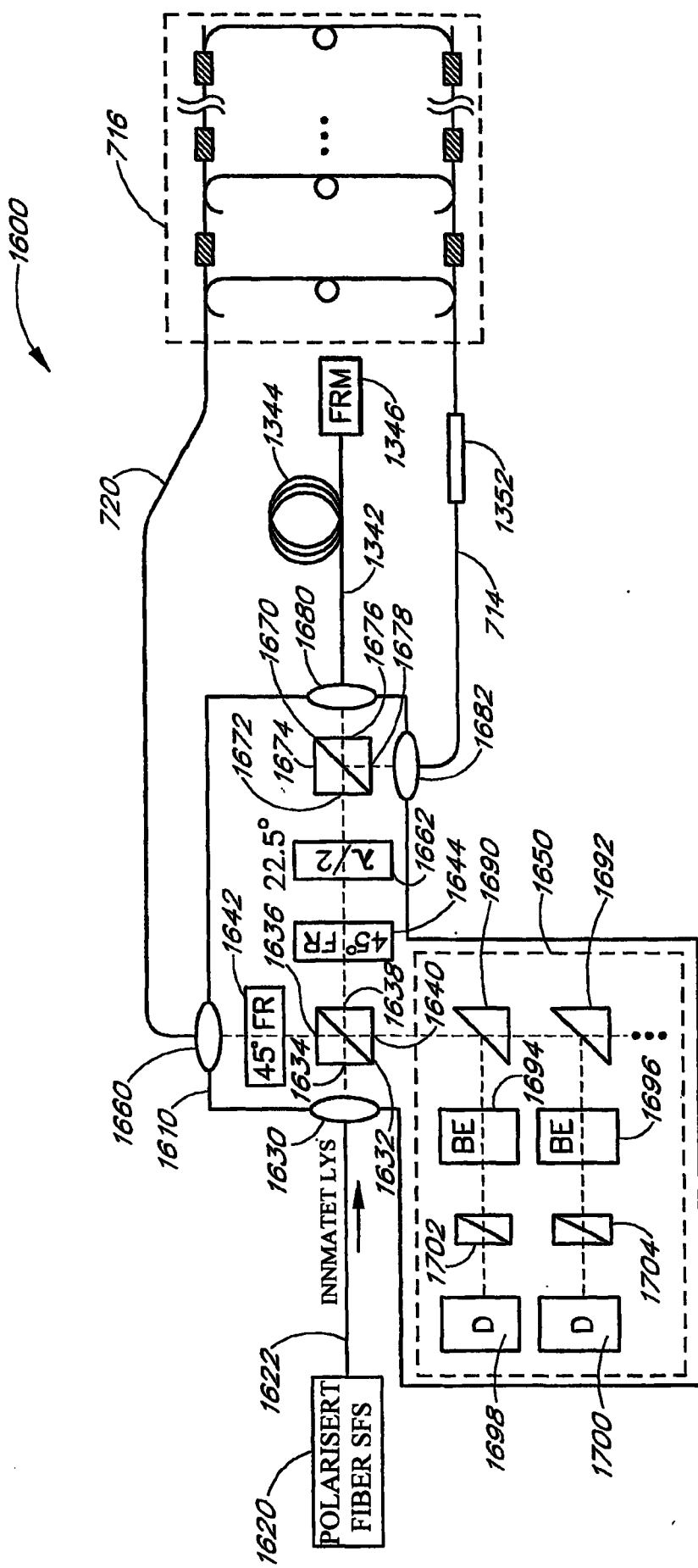


FIG. 34

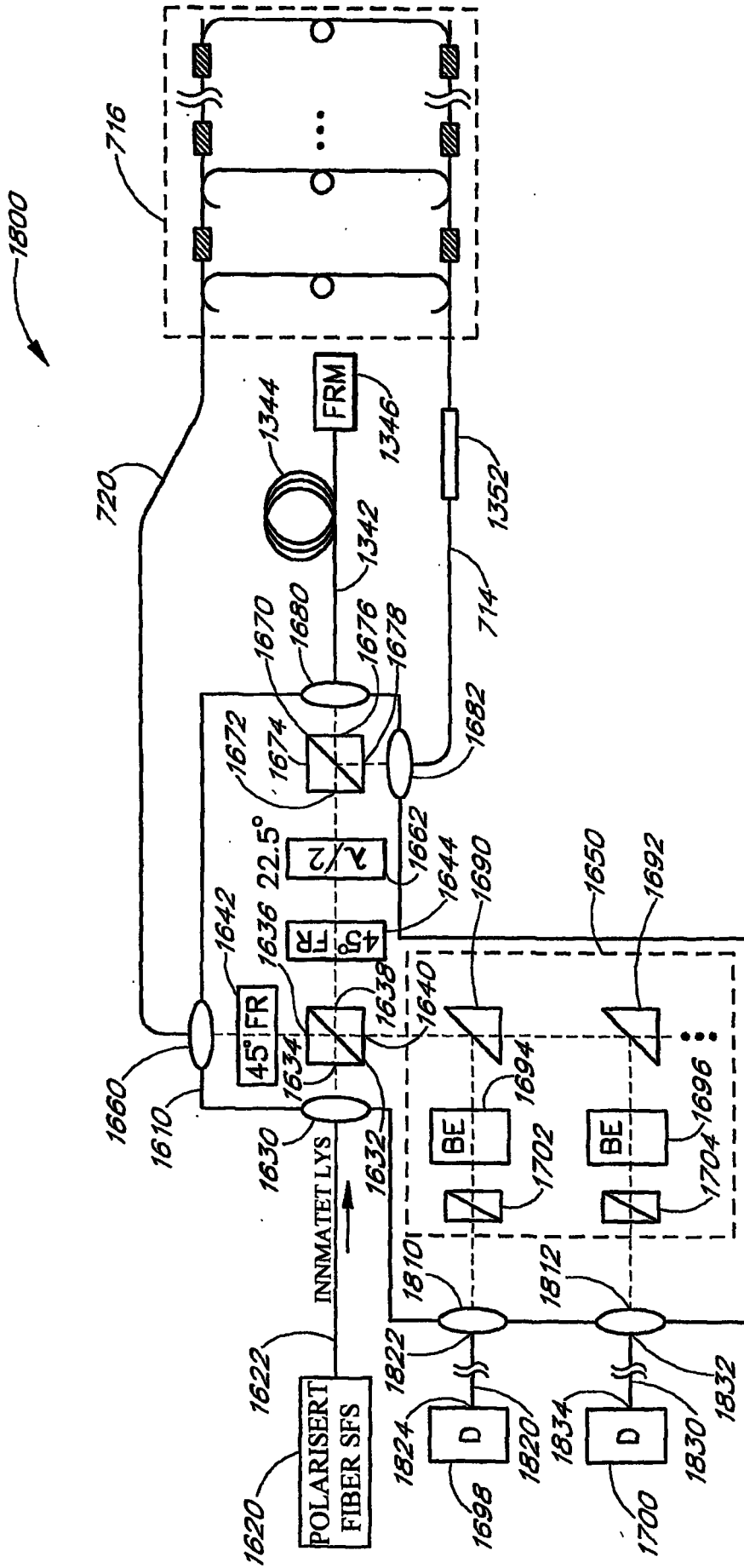


FIG. 36