

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第6921236号

(P6921236)

(45) 発行日 令和3年8月18日 (2021.8.18)

(24) 登録日 令和3年7月29日 (2021.7.29)

(51) Int. Cl. F I
GO 1 D 5/353 (2006.01) GO 1 D 5/353 B
GO 1 B 11/16 (2006.01) GO 1 B 11/16 G

請求項の数 13 (全 29 頁)

(21) 出願番号	特願2019-560464 (P2019-560464)	(73) 特許権者	519263660
(86) (22) 出願日	平成30年1月12日 (2018.1.12)		フォーカス センサーズ リミテッド.
(65) 公表番号	特表2020-508467 (P2020-508467A)		イギリス国, エスオー31 5エーイー
(43) 公表日	令和2年3月19日 (2020.3.19)		ネットリー アビー, ステーション ロード 77
(86) 国際出願番号	PCT/EP2018/050793	(74) 代理人	100107766
(87) 国際公開番号	W02018/134137		弁理士 伊東 忠重
(87) 国際公開日	平成30年7月26日 (2018.7.26)	(74) 代理人	100070150
審査請求日	令和2年11月9日 (2020.11.9)		弁理士 伊東 忠彦
(31) 優先権主張番号	1700994.5	(74) 代理人	100091214
(32) 優先日	平成29年1月20日 (2017.1.20)		弁理士 大貫 進介
(33) 優先権主張国・地域又は機関	英国 (GB)		

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 分散型音響センシング

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

n が 2 以上のパルスの個数であるとして、 n 個のタイムアライメントされた光学プローブパルスの組を生成し、各パルスが f_1 、 f_2 、 $\dots$ 、 f_n から選択された相異なる光学周波数にあり、各光学周波数とその隣から Δf だけ間隔をあけられている、よう構成されるソースジェネレータであり、前記光学プローブパルスを光感知ファイバ内に伝えるよう構成され、前記光学プローブパルスが前記光感知ファイバによって後方散乱され、該後方散乱された光の少なくとも一部が前記光学プローブパルスの伝播方向とは逆方向で前記光感知ファイバによって捕捉される、前記ソースジェネレータと、

前記光感知ファイバから前記後方散乱された光を受けるよう構成される受光システムであり、 f_m が Δf よりも小さい所定の周波数であるとして、前記後方散乱された光を遅延させたものを、前記後方散乱された光の周波数を $-(\Delta f + f_m)$ だけシフトさせた少なくとも 1 つの周波数シフトされたものと混合するよう構成される前記受光システムとを有する光感知システム。

【請求項 2】

前記光感知ファイバは、少なくとも 1 つの感知領域で起こる変化に対する当該システムの感度を高めるよう適応される前記少なくとも 1 つの感知領域を有する、

請求項 1 に記載の光感知システム。

【請求項 3】

検出される振幅が、前記光感知ファイバ沿いのひずみ変化の指標となるよう復号される

10

20

、請求項 1 に記載の光感知システム。

【請求項 4】

$\Delta f = v / T_d$ であり、 T_d は光学観測時間であり、 v は任意の非ゼロの整数である、請求項 1 に記載の光感知システム。

【請求項 5】

$\Delta f = (1 + 2w) / (2 \cdot T_I)$ 及び／又は $(1 + 2v) / (2 \cdot T_d)$ であり、 w 及び v は任意の整数であり、 T_d は光信号観測時間であり、 T_I は後方散乱遅延時間である、

請求項 1 に記載の光感知システム。

10

【請求項 6】

Δf はおよそ 100 MHz ～ 600 MHz である、請求項 1 乃至 5 のうちいずれか一項に記載の光感知システム。

【請求項 7】

n は 50 以上である、請求項 1 乃至 6 のうちいずれか一項に記載の光感知システム。

【請求項 8】

光感知ファイバにおけるひずみを検出する方法であって、

n が 2 以上のパルスの個数であるとして、 n 個のタイムアライメントされた光学プローブパルスの組を生成するステップであり、各パルスが f_1 、 f_2 、 $\dots$ 、 f_n から選択された相異なる光学周波数にあり、各光学周波数がその隣から Δf だけ間隔をあけられている、前記生成するステップと、

20

前記光学プローブパルスを光感知ファイバ内に伝えるステップであり、前記光学プローブパルスが前記光感知ファイバによって後方散乱され、該後方散乱された光の少なくとも一部が前記光学プローブパルスの伝播方向とは逆方向で前記光感知ファイバによって捕捉される、前記伝えるステップと、

前記光感知ファイバから前記後方散乱された光を受けるステップであり、受光システムが前記光感知ファイバから前記後方散乱された光を受けるよう構成され、 f_m が Δf よりも小さい所定の周波数であるとして、前記受光システムが、前記後方散乱された光を遅延させたものを、前記後方散乱された光の周波数を $-(\Delta f + f_m)$ だけシフトさせた少なくとも 1 つの周波数シフトされたものと混合するよう構成される、前記受けるステップと

30

、検出される振幅の変化と、該振幅の変化を示すサンプルの時間とに基づき、前記光感知ファイバ沿いの位置での位相変化を決定するステップと

を有する方法。

【請求項 9】

$\Delta f = (1 + 2v) / T_d$ 及び／又は $\Delta f = (1 + 2w) / T_I$ であり、 T_d は光学観測時間であり、 T_I は後方散乱遅延時間であり、 v 及び w は整数である、

請求項 8 に記載の方法。

【請求項 10】

前記光学プローブパルスの組は、ソース光信号の組の変調によって生成され、各ソース光信号は、 f_1 、 f_2 、 $\dots$ 、 f_n から選択された相異なる光学周波数にある、

請求項 8 に記載の方法。

40

【請求項 11】

各光学プローブパルスの偏光は、隣接する光学周波数にある光学プローブパルスの偏光とは異なる、

請求項 8 乃至 10 のうちいずれか一項に記載の方法。

【請求項 12】

隣接する光学プローブパルスの偏光は直交しない、

請求項 11 に記載の方法。

50

【請求項 13】

Δf は 100 MHz から 600 MHz の間である、
請求項 8 乃至 10 のうちいずれか一項に記載の方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本願は、光センサ、特に、光ファイバに基づくセンサを利用した分散型音響センシングに関する。

【背景技術】

【0002】

光ファイバに基づくセンサは、ファイバにおけるひずみの変化により音響信号を含む様々なパラメータを検出するために知られている。システムは、離散的な又は分散されたセンサを利用するものと広く特徴付けられ得る。離散的なセンサは、通常は、必要とされるセンサ位置で光ファイバ内に光共振器 (optical cavity) を位置付ける。ファイバひずみの変化は、光共振器の物理長さの変化を引き起こし、よって、共振器の光学位相長さが、共振器を伝播する光信号に対して変化する。光共振器からの出力信号の検出は、位相長さの変化が推測されることを可能にし、従って、関心のあるパラメータが検出される。多数の感知位置が、夫々のファイバによって、複数の位置からの同時の測定を可能にするよう設けられ得る。離散的なセンサの欠点は、センサのポジション及びゲージ長さが固定されており、よって、柔軟性が低いことである。そのようなセンサの一般的な適用は、地震の発生を検出するために海底にあり、従って、特定の感知位置を変更するようセンサを再配置することは实际的ではない。

【0003】

分散型光センサは、定義されたゲージ長さ又はセンサポジションを有さないが、ファイバの長さに沿った位相変化を推測するために戻り信号の解析を使用し、従って、(通常は音響) 信号を検出する。例えば、レイリー後方散乱が戻り信号として使用され得る。

【0004】

図 1 は、分散型音響センサ (Distributed Acoustic Sensor) (DAS) として一般的に知られている従来の分散型光センサの概略図を示す。インタロゲータ 10 は、プローブ光パルス 11 を測定ファイバ 12 の第 1 端に投ずる。測定ファイバ 12 は、感知が必要とされるエリアに置かれている。光センサの利点は、光ファイバの低損失により、感知位置とは異なる位置にインタロゲータを位置付ける能力である。従って、インタロゲータ 10 から測定が行われない測定領域への引き込みを提供するよう測定ファイバ 12 の長さは十分にある。

【0005】

パルス 11 が光ファイバを通して伝播するにつれて、光の一部は、光ファイバ内の散乱部で散乱される。その散乱された光の部分は、光ファイバの開口数 (numerical aperture) によって捕捉され、インタロゲータ 10 の方へ戻る。関心のある主な散乱メカニズムは、散乱部 (“散乱体”) との弾性衝突により伝播光と同じ周波数での後方散乱をもたらすレイリー散乱である。

【0006】

インタロゲータで、後方散乱パルス 14 が受け取られる。インタロゲータに到着する時間は、インタロゲータからファイバ沿いの点までの往復距離に比例する。パルスは、距離が長くなるにつれて、損失の増大により、時間とともに減衰する。特定の時点でパルス 14 をサンプリングすることによって、ファイバ沿いの特定の位置からの後方散乱は決定され得る。光ファイバの乱れは、(微小レベルで) その物理構造及び伝播光の速度に影響を及ぼし、よって、後方散乱パルス 14 に影響を及ぼす。そのような変化は、ファイバに支障を来す信号を推測するために使用され得る。典型的な DAS は、1 ~ 40 km のファイバに沿って 1 ~ 20 m の分解能を有し得る。

【0007】

典型的なシステムでは、プローブパルスは10 ns コヒーレントパルスであることができ、典型的な光ファイバは、およそ2 mの物理長さを有する。

【0008】

図2は、典型的なインタロゲータ10の概略図を示す。送信器20は、プローブパルスを放出し、受信器21は、後方散乱パルスを検出する光センサ及びサンプリングシステムを有する。光サーキュレータ22は、送信器20からのプローブパルスを測定ファイバ12内に結合し且つ戻り後方散乱パルスを受信器21へ結合する。

【0009】

構成可能なゲージ長さ及びセンサ位置の利点にも関わらず、分散型光センサは有意な欠点を抱えている。それらの感度は、戻り信号が、強く定義された反射体ではなく、弱散乱イベントに依存するということで、離散的なセンサよりもずっと低い。このような感度の不足は、ひずみを決定し、ひいては、音響又は他のパラメータを検出するための感度が不十分であるほどであり得る。システムは、戻り後方散乱振幅に対する交差感受性(cross-sensitivity)を有し、位相測定、ひいては、測定されたひずみの非線形性及びゆがみをもたらす可能性がある。

【0010】

後方散乱は、多数の散乱体から起こり、各散乱体からの散乱光は、後方散乱パルスを形成するようコヒーレント加算される。散乱体の位置はランダムであるから、この加算は破壊的であって、戻り信号をもたらさない可能性がある。更には、散乱体の位置は、時間とともに変化して加算の変化をもたらし、よって、時間とともに信号のフェーディングを引き起こす可能性がある。フェーディングは、複屈折効果からも起こり得る。

【0011】

従って、改善された分散型光センサシステムが必要とされる。以下で記載される実施形態は、既知のシステムの欠点のいずれか又は全てを解決する実施に限られない。

【発明の概要】

【0012】

この概要は、詳細な説明において以下で更に記載される概念の選ばれた部分を簡単に紹介するために与えられている。この概要は、請求対象の重要な特徴又は必須の特徴を特定するよう意図されず、更には、請求対象の適用範囲を決定する助けとして使用される意図もない。

【0013】

光感知システムのための光学ソースジェネレータが提供される。当該光学ソースジェネレータは、 n がパルスの個数であるとして、各パルスが f_1 、 f_2 、 $\dots$ 、 f_n から選択された相異なる光学周波数にあり、各光学周波数 f_i がその隣から Δf だけ間隔をあけられている、 n 個のタイムアライメントされた光学プローブパルスの組と、 f_m が所定の周波数であり、 n が2以上であるとして、各光参照信号が $f_1 - (\Delta f + f_m)$ 、 $f_2 - (\Delta f + f_m)$ 、 $\dots$ 、 $f_n - (\Delta f + f_m)$ から選択された相異なる光学周波数にある n 個の光参照信号の組とを生成するよう構成される。

【0014】

前記光学プローブパルスの組は、ソース光信号の組の変調によって生成され得る。各ソース光信号は、 $f_1 - (\Delta f + f_m)$ 、 $f_2 - (\Delta f + f_m)$ 、 $\dots$ 、 $f_n - (\Delta f + f_m)$ から選択された相異なる光学周波数にある。

【0015】

前記ソース光信号は、 $(\Delta f + f_m)$ の周波数で前記パルスの周期中に駆動される音響光学変調器によって変調され得る。

【0016】

各光学プローブパルス及び各光参照信号の偏光は、隣接する光学周波数にある光学プローブパルス及び光参照信号の偏光とは夫々異なることができる。

【0017】

隣接する光学プローブパルス及び光参照信号の偏光は非直交であることができる。

10

20

30

40

50

【0018】

例として、 $\Delta f = (2v + 1) / (2 \cdot T_d)$ であり、 v は何らかの正の整数であり、 T_d は光学観測時間である。

【0019】

例として、 $\Delta f = 1 / (2 \cdot T_d)$ である。

【0020】

Δf はおよそ $100\text{ MHz} \sim 600\text{ MHz}$ であることができる。

【0021】

前記光参照信号は CW 信号であることができる。

【0022】

n は 50 以上であることができる。

10

【0023】

更には、1本の光感知ファイバと、上記の光学ソースジェネレータと、受光システムとを有し、前記光学プローブパルスが、前記光感知ファイバ内に結合され、前記光学プローブパルスが伝えられる方向とは逆方向で前記光感知ファイバから戻るパルスが、前記受光システム内に結合され、前記光参照信号が、前記光感知ファイバを通らずに前記受光システム内に結合される、光感知システムも提供される。

【0024】

前記受光システムは、前記光感知ファイバから戻るパルスを前記光参照信号と混合し、結果として得られる混合信号を検出するよう構成され得る。

20

【0025】

前記光感知ファイバは、少なくとも1つの感知領域で起こる変化に対する当該システムの感度を高めるよう適応される前記少なくとも1つの感知領域を有することができる。

【0026】

n が 2 以上のパルスの個数であるとして、 n 個のタイムアライメントされた光学プローブパルスの組を生成し、各パルスが f_1 、 f_2 、 $\dots$ 、 f_n から選択された相異なる光学周波数にあり、各光学周波数とその隣から Δf だけ間隔をあけられている、よう構成されるソースジェネレータであり、前記光学プローブパルスを光感知ファイバ内に伝えるよう構成され、前記光学プローブパルスが前記光感知ファイバによって後方散乱され、該後方散乱された光の少なくとも一部が前記光学プローブパルスの伝播方向とは逆方向で前記光感知ファイバによって捕捉される、前記ソースジェネレータと、前記光感知ファイバから前記後方散乱された光を受けるよう構成される受光システムであり、 f_m が Δf よりも小さい所定の周波数であるとして、前記後方散乱された光を遅延させたものを、前記後方散乱された光の周波数を $-(\Delta f + f_m)$ だけシフトさせた少なくとも1つの周波数シフトされたものと混合するよう構成される前記受光システムとを有する光感知システムが提供される。

30

【0027】

更には、 n が 2 以上のパルスの個数であるとして、 n 個のタイムアライメントされた光学プローブパルスの組を生成し、各パルスが f_1 、 f_2 、 $\dots$ 、 f_n から選択された相異なる光学周波数にあり、各光学周波数とその隣から Δf だけ間隔をあけられている、よう構成されるソースジェネレータであり、前記光学プローブパルスを光感知ファイバ内に伝えるよう構成され、前記光学プローブパルスが前記光感知ファイバによって後方散乱され、該後方散乱された光の少なくとも一部が前記光学プローブパルスの伝播方向とは逆方向で前記光感知ファイバによって捕捉される、前記ソースジェネレータと、前記光感知ファイバから前記後方散乱された光を受けるよう構成される受光システムであり、前記後方散乱された光の振幅を検出するよう構成される前記受光システムとを有する光感知システムも提供される。

40

【0028】

前記光感知ファイバは、少なくとも1つの感知領域で起こる変化に対する当該システムの感度を高めるよう適応される前記少なくとも1つの感知領域を有することができる。

50

【0029】

前記検出された振幅は、前記光感知ファイバ沿いのひずみ変化の指標となるよう復号され得る。

【0030】

例として、 $\Delta f = v / T_d$ であり、 T_d は光学観測時間であり、 v は何らかの非ゼロの整数である。

【0031】

例として、 $\Delta f = (1 + 2w) / (2 \cdot T_l)$ 及び／又は $(1 + 2v) / (2 \cdot T_d)$ であり、 w 及び v は何らかの整数であり、 T_d は光信号観測時間であり、 T_l は後方散乱遅延時間である。

【0032】

Δf はおよそ100MHz～600MHzであることができる。

【0033】

n は50以上であることができる。

【0034】

光感知ファイバにおけるひずみを検出する方法が提供される。当該方法は、 n が2以上のパルスの個数であるとして、 n 個のタイムアライメントされた光学プローブパルスの組を生成するステップであり、各パルスが f_1 、 f_2 、 $\dots$ 、 f_n から選択された相異なる光学周波数にあり、各光学周波数がその隣から Δf だけ間隔をあけられている、前記生成するステップと、前記光学プローブパルスを光感知ファイバ内に伝えるステップであり、前記光学プローブパルスが前記光感知ファイバによって後方散乱され、該後方散乱された光の少なくとも一部が前記光学プローブパルスの伝播方向とは逆方向で前記光感知ファイバによって捕捉される、前記伝えるステップと、前記光感知ファイバから前記後方散乱された光を受けるステップと、前記後方散乱された光の振幅を検出するステップと、前記検出された振幅の変化と、該振幅の変化を示すサンプルの時間とに基づき、前記光感知ファイバ沿いの位置での位相変化を決定するステップとを有する。

【0035】

例として、 $\Delta f = v / T_d$ であり、 T_d は光学観測時間であり、 vw は非ゼロの整数である。

【0036】

各光学プローブパルスの偏光は、隣接する光学周波数にある光学プローブパルスの偏光とは異なることができる。

【0037】

隣接する光学プローブパルスの偏光は非直交であることができる。

【0038】

更には、光感知ファイバにおけるひずみを検出する方法であって、 n が2以上のパルスの個数であるとして、 n 個のタイムアライメントされた光学プローブパルスの組を生成するステップであり、各パルスが f_1 、 f_2 、 $\dots$ 、 f_n から選択された相異なる光学周波数にあり、各光学周波数がその隣から Δf だけ間隔をあけられている、前記生成するステップと、前記光学プローブパルスを光感知ファイバ内に伝えるステップであり、前記光学プローブパルスが前記光感知ファイバによって後方散乱され、該後方散乱された光の少なくとも一部が前記光学プローブパルスの伝播方向とは逆方向で前記光感知ファイバによって捕捉される、前記伝えるステップと、前記光感知ファイバから前記後方散乱された光を受けるステップであり、受光システムが前記光感知ファイバから前記後方散乱された光を受けるよう構成され、 f_m が Δf よりも小さい所定の周波数であるとして、前記受光システムが、前記後方散乱された光を遅延させたものを、前記後方散乱された光の周波数を $-(\Delta f + f_m)$ だけシフトさせた少なくとも1つの周波数シフトされたものと混合するよう構成される、前記受けるステップと、検出される振幅の変化と、該振幅の変化を示すサンプルの時間とに基づき、前記光感知ファイバ沿いの位置での位相変化を決定するステップとを有する方法も提供される。

10

20

30

40

50

【0039】

例として、 $\Delta f = (1 + 2v) / T_d$ 及び／又は $\Delta f = (1 + 2w) / T_l$ であり、 T_d は光学観測時間であり、 T_l は後方散乱遅延時間であり、 v 及び w は整数である。

【0040】

前記光学プローブパルスの組は、ソース光信号の組の変調によって生成され得る。各ソース光信号は、 f_1 、 f_2 、 $\dots$ 、 f_n から選択された相異なる光学周波数にある。

【0041】

各光学プローブパルスの偏光は、隣接する光学周波数にある光学プローブパルスの偏光とは異なることができる。

【0042】

隣接する光学プローブパルスの偏光は非直交であることができる。

10

【0043】

例として、 Δf は 100 MHz から 600 MHz の間である。

【0044】

光感知方法も提供される。当該方法は、 n がパルスの個数であるとして、各パルスが f_1 、 f_2 、 $\dots$ 、 f_n から選択された相異なる光学周波数にあり、各光学周波数がその隣から Δf だけ間隔をあけられている、 n 個のタイムアライメントされた光学プローブパルスの組と、 f_m が所定の周波数であり、 n が 2 以上であるとして、各光参照信号が $f_1 - (\Delta f + f_m)$ 、 $f_2 - (\Delta f + f_m)$ 、 $\dots$ 、 $f_n - (\Delta f + f_m)$ から選択された相異なる光学周波数にある n 個の光参照信号の組とを生成するステップと、前記光学プローブパルスを光感知ファイバ内に伝えるステップと、前記光参照信号を、前記光感知ファイバから戻る後方散乱された光と光学的に混合するステップと、前記混合された光信号を検出するステップと、前記光感知ファイバにおけるひずみ変化を決定するよう前記検出された信号を復号するステップとを有する。

20

【0045】

前記光学プローブパルスの組は、ソース光信号の組の変調によって生成され得る。各ソース光信号は、 $f_1 - (\Delta f + f_m)$ 、 $f_2 - (\Delta f + f_m)$ 、 $\dots$ 、 $f_n - (\Delta f + f_m)$ から選択された相異なる光学周波数にある。

【0046】

各光学プローブパルス及び各光参照信号の偏光は、隣接する光学周波数にある光学プローブパルス及び光参照信号の偏光とは夫々異なることができる。

30

【0047】

隣接する光学プローブパルス及び光参照信号の偏光は非直交であることができる。

【0048】

例として、 $\Delta f = (1 + 2v) / (2 \cdot T_d)$ であり、 T_d は光学観測期間であり、 v は整数である。

【0049】

例として、 Δf は 100 MHz から 600 MHz の間である。

【0050】

n が周波数の個数であるとして、相異なる光学周波数 f_1 、 f_2 、 $\dots$ 、 f_n で複数の光信号を生成する光学ソースジェネレータも提供される。各光学周波数は、その隣から Δf だけ間隔をあけられている。当該光学ソースジェネレータは、第 1 の相異なる光学周波数で光シード信号を生成する光源と、光学ループとを有し、前記光学ループは、周波数 Δf で RF 信号によって CW モードにおいて駆動される音響光学変調器と、前記光学ループ内の光損失を補償するよう構成される光増幅器と、光学周波数 f_1 、 f_2 、 $\dots$ 、 f_n を通すよう定義された光学通過帯域を有する光学バンドパスフィルタと、前記光シード信号を受け、該光シード信号を前記光学ループ内に結合するよう構成される光入力カップラと、前記光学ループから光出力部へ前記光学ループを回って伝播する光の部分とを結合するよう構成される光出力カップラとを有する。

40

【0051】

50

例として、 $\Delta f = (1 + 2v) / (2 \cdot T_d)$ であり、 v は整数であり、 T_d は光学観測期間である。

【0052】

例として、 $\Delta f = 1 / (2 / T_d)$ であり、 T_d は光学観測期間である。

【0053】

例として、 $\Delta f = (2v + 1) / (2 \cdot T_d)$ 及び／又は $\Delta f = (2w + 1) / (2 \cdot T_I)$ であり、 v 及び w は整数であり、 T_d は光学観測期間であり、 T_I は光センサユニットの後方散乱遅延である。

【0054】

例として、 $\Delta f = v / T_d$ であり、 b は非ゼロの整数であり、 T_d は光学観測期間である。 10

【0055】

Δf は 100 MHz から 600 MHz の間であることができる。

【0056】

一例として、 n は 50 以上であることができる。

【図面の簡単な説明】

【0057】

本発明の実施形態は、例として、次の図面を参照して記載される。

【図1】光感知システムの概略図を示す。

【図2】光感知システムの概略図を示す。 20

【図3】光感知ファイバに投入されるパルス及び光感知ファイバから後方散乱されるパルスの概略図を示す。

【図4】プローブパルス及び参照パルスを使用した光感知を示す。

【図5】光学周波数の組を例示する。

【図6】後方散乱信号を示す。

【図7】光学散乱部の概略図を示す。

【図8】ある範囲の散乱部に対する光学位相のチャートを示す。

【図9】光感知システム及び受信器アーキテクチャの概略図を示す。

【図10】後方散乱信号と周波数シフトされた後方散乱信号との混合を使用する光感知システムの概略図を示す。 30

【図11】図10のシステムのための受信器を示す。

【図12】図10のシステムのための受信器を示す。

【図13】例となる処理プロセスを示す。

【図14】例となる処理プロセスを示す。

【図15】例となる処理プロセスを示す。

【図16】インターパルスコヒーレントフェーディングに関して散乱成分を示す。

【図17】偏光成分を示す。

【図18】図10のシステムのための受信器の例を示す。

【図19】図10のシステムのための受信器の例を示す。

【図20】図10のシステムのための受信器の例を示す。 40

【図21】図10のシステムのための受信器の例を示す。

【図22】例となる光源を示す。

【図23】例となる光源を示す。

【図24】例となる光源を示す。

【図25】例となる光源を示す。

【図26】例となる光源を示す。

【図27】例となる光源を示す。

【図28】例となる光源を示す。

【図29】例となる光源を示す。

【図30】オフセットパルスを使用するシステムを示す。 50

【図 3 1】複数の受信器を使用する感知システムを示す。

【図 3 2】複数の受信器を使用する感知システムを示す。

【図 3 3】直接検出を使用するシステムを示す。

【図 3 4】復調アルゴリズムを示す。

【発明を実施するための形態】

【0058】

本発明の更なる詳細、態様及び実施形態が、これより、単に例として、図面を参照して記載される。図中の要素は、簡単さ及び明りょうさのために表されており、必ずしも実寸通りではない。同じ参照番号が、理解を容易にするよう各々の図に含まれている。

【0059】

図 3 は、図 1 及び 2 と同様であるが、以下で記載されるようにプローブパルスを伝えるよう構成されるシステムにおいて、インタロゲータ 10 によって投入されるプローブパルス及びインタロゲータ 10 へ戻される後方散乱パルスの概略図を示す。

【0060】

送信器は、異なる光学周波数でプローブパルス 1010、1020、10n0 の組を送信する。各周波数は、その隣から Δf だけ間隔をあけられている。パルス幅は T_p と示されており、繰り返し周波数は T_r と示されている。受信器では、一連の後方散乱パルス 1011、1021、10n0 が、やはり Δf だけ間隔をあけて受信される。典型的なシステムでは、数百の周波数が利用され得る。 T_r 及び T_p は、必要とされる感知周波数及び性能を提供するよう選択される。 T_r はまた、ファイバの端部からの後方散乱信号と、測定ファイバの先頭でのその後のプローブパルスからの後方散乱信号との間のオーバーラップを回避するよう、感知されるべき最大距離に応じて選択される。それらの戻り後方散乱信号は、以下で記載されるように、先行技術の DAS システムを改善するよう多数のシステムで使用され得る。

【0061】

図 4 は、図 3 に関連して記載されたプローブ信号を使用するシステムの概略図を示す。システムは、周波数領域反射率計 (frequency domain reflectometer) と呼ばれることがある。ソース 300 の出力は光カプラ 301 へ接続される。光カプラ 301 からは、1 つの出力が測定ファイバへ接続され、もう 1 つの出力が受信器 42 へ接続されて参照信号を供給する。カプラ 301 が 50 : 50 カプラであってよく、あるいは、信号対雑音比を最適化するために、より多くの光の部分を測定ファイバ又は受信器に向けるよう選択されてよい。

【0062】

ソース 300 は、複数の周波数で CW 光信号を生成する。CW 光信号は、夫々その隣接周波数から Δf だけ間隔をあけられた f_1 、 f_2 、 $\dots$ 、 f_n でプローブパルス 1010、1020、10n0 を生成するよう、音響光学変調器 (Acousto-Optic Modulator) (AOM) 302 によって変調される。 n は数百になると期待される。例えば、システムの特定の要件に応じて、 n は 50 又は 100 よりも大きくなり得る。

【0063】

AOM は、媒質を通して伝播する光を回折するよう RF 信号を用いて光を変調し、結果として、出力光の周波数は、RF 周波数によってシフトされる。AOM のための RF 周波数 (f_{RF}) は、通常は、200 MHz の範囲にあり、 Δf は、 $f_{RF} = (\Delta f + f_m)$ であるように選択され得る。ここで、 f_m は、所望のヘテロダイン周波数である。ソース 300 によって出力される光学周波数は、このようにして、 $f_1 - (\Delta f + f_m)$ 、 $f_2 - (\Delta f + f_m)$ 、 $\dots$ 、 $f_n - (\Delta f + f_m)$ によって与えられる。 f_m は、通常は、 Δf と比べて小さく、例えば、数 kHz である。 f_m は、ホモダインシステムを前提として、ゼロであるよう選択され得る。

【0064】

f_m は、 $< 1 / (T_r)$ であるよう選択され、よって、測定ファイバ沿いの点に対して別個のヘテロダイン搬送波を可能にすることができる。

10

20

30

40

50

【0065】

プローブパルス1010、1020、10n0は、光サーキュレータ2を介して測定ファイバ1に投入される前に、増幅303され、フィルタ処理304され得る。戻り後方散乱は、サーキュレータ2によって、任意に増幅器305及びフィルタ306を通して、光カプラ307へ結合される。カプラ307で、後方散乱光は、ソース300からの変調されていない光と混合され、受信器42へ向けられる。

【0066】

図5で図表として示されるように、受信器42で、 f_1 、 $f_2 \cdots f_n$ の後方散乱パルスは、ソースからの（カプラ301、307を介して伝えられる）、 $f_1 - (\Delta f + f_m)$ 、 $f_2 - (\Delta f + f_m) \cdots f_n - (\Delta f + f_m)$ のCW光信号と混合する。夫々の戻り周波数は、 f_m のヘテロダイン周波数を生成するソースからのその隣接したより高い周波数と混合し、位相は、位相が、後方散乱を引き起こす散乱体における変化によって引き起こされた後方散乱光の位相変化によって変調される。

【0067】

発射パルスに対して遅延 t_1 を有してインタロゲータへ戻る後方散乱に対応する試験ファイバにおけるゲージ長さを考える。図6に示されるように、このゲージからの後方散乱のスナップショットは、夫々の発射パルスによってサンプリングされる。局所ソースと戻される後方散乱との間の位相差は周波数 f_m で 2π だけ増大し、よって、 f_m の周波数で建設的及び破壊的干渉を周期的に繰り返すので、図示されるように、その後のサンプルはヘテロダイン周波数 f_m で搬送波を確立する。時間 t_1 までの試験ファイバ内の全体的な光学位相の変化は、この全体的な位相差を増大又は低減し、建設的又は破壊的干渉が起こる時点を変化させ、従って、搬送波で位相変調を引き起こす。このようにして、シフト f_m （ $\phi(t_1)$ ）に対するヘテロダイン搬送波の位相は、 t_1 に対応するファイバ沿いの距離までの試験ファイバにおける積分されたひずみ変化の指標である。ゲージ長さ（すなわち、時間 Δt の間に移動されるファイバの長さ）内の位相変化を計算するよう、我々は $\phi(t_1) - \phi(t_1 - \Delta t)$ を計算する。

【0068】

上述されたように、後方散乱された光は、複数の散乱体からコヒーレント加算され、よって、測定され得る戻り信号が存在しないように破壊的に足し合わされる可能性がある。以下で詳細に説明されるように、相異なる周波数にある多数のプローブパルスの使用は、破壊的加算が起こる可能性を下げ得る。

【0069】

コヒーレントフェーディングは、複数の散乱体からの散乱が光検出器で全く又はほとんど後方散乱信号を生成しないよう重ね合う場合に起こる。後方散乱がファイバのある区間から受け取られない場合に、測定は行われ得ず、あるいは、SNRは低減される。この効果は、明らかに好ましくない。

【0070】

図7は、左から右へ伝わるプローブ光70、及び右から左へ戻る後方散乱71とともに、測定ファイバのある区間を示す。プローブパルスは、通常は10～100ns程度の持続期間 T_p を有する。後方散乱は、周期 T_d にわたってサンプリングされ得る。散乱体72は、 T_d よりも相当に短い散乱体間の平均遅延を有して、ファイバを通してランダムに分布する。各部は反射を提供し、夫々がコヒーレント加算される。各サンプルは、ウィンドウ時間 T_d の間に長さ T_p のパルスによって照射される全ての反射の重ね合わせを表す。このようにして、 $T_p + T_d$ に対応するファイバの長さ内の散乱体は、 T_d の間にサンプリングされる全体的な光出力に寄与する。しかし、パルスの始まり及び終わりでの持続期間 $T_d/2$ に対応する散乱体は、観測時間中ずっと照射されないので無視可能である。

【0071】

図8は、散乱部pからの光学周波数qについて基準に対する光学位相 ϕ^q_p を概略的に示す。本議論のために、全ての散乱体が同じ電力で戻ると仮定される。図8は、2つの周波数1、2及び6つの散乱体1～6を表す。図8を見て明らかなように、特定の散乱体か

らの夫々の周波数の位相は、予想通りに異なっており、その差は、時間（ファイバ沿いの距離）とともに増大する。基準に対する夫々の反射の時間遅延は d_p であり、それにより：

【数 1】

$$\phi_p^2 = \phi_p^1 + 2 \cdot \pi \cdot d_p / \Delta f$$

【0072】

レーザは T_p にわたってコヒーレントであるから、夫々の散乱位相遅延内の 2π の数は無視可能であり、それにより、 $-\pi < \phi_p^1 \leq \pi$ である。従って、1つのプローブ周波数が完全にフェードされる（すなわち、戻り信号なし）ために、散乱体 p ごとに、 $-\phi_p^1$ 10

【数 2】

$$\sum_p \phi_p^1 = 0$$

であるように、反対の位相を有するもう 1 つの散乱体 j が存在すべきである。

【0073】

Δf は、 f_1 及び f_2 の光の間の位相差が T_d 内で 2π 未満で変化するように選択される（すなわち、 $\Delta f < (1/T_d)$ ）。その場合に、 f_2 及び f_1 の両方からの後方散乱が同時に完全に相殺することになる可能性は、更に低くなる。 ϕ_p^1 が十分に小さく、 $\phi_p^2 > \phi_p^1$ である散乱体の場合に、 $\phi_j^2 = -\phi_p^2$ となるような j は存在し得ない。すなわち、

【数 3】

$$\sum_p \phi_p^2 - \sum_p \phi_p^1 = \sum_p \left(\phi_p^1 + 2 \cdot \pi \cdot d_p / \Delta f \right) - \sum_p \phi_p^1 = \sum_p 2 \cdot \pi \cdot d_p / \Delta f \neq 0$$

【0074】

ϕ_p^1 が発振を包み込むほど十分に大きく、 $\phi_{2p} < \phi_p^1$ である散乱体の場合に、状況はより複雑である。両方の周波数でコヒーレントフェーディングを達成する散乱体の組は小さいことが示され得る。 30

【0075】

散乱体が、平均して、 T_p 内で、照射される区間 T_d を通して等しく分配されると仮定される場合に、平均して後方散乱は、 f_1 と f_2 との間の位相が時間 T_d にわたって π であるならば（すなわち、 $\Delta f = 1 / (2 \cdot T_d)$ ）、 f_1 での後方散乱がほとんどフェーディングされるときに、 f_2 で強くなる。このようにして、 f_1 では光を生成しないよう重ね合わされる、 T_d の早い時期と遅い時期との散乱体の対は、 f_2 では強い光を生成するよう重ね合わされる。このようにして、適切な差分周波数を有する 2 つのコヒーレント周波数を使用するシステムは、コヒーレントフェーディングに広く影響され得ない。 40

【0076】

典型的なシステムにおいて、約 4 ns の T_d によれば、最適な $\Delta f = 1 / (2 \cdot T_d)$ は 125 MHz である（100～600 MHz の範囲が特定の例について適切であることができる）。いくつかの場合に、 T_d は、受信器での SNR を改善するよう、相当により大きくなり得る。これは、所望の検出帯域内に入る、より低い最適な Δf 値をもたらし、光ファイバ上の隣接する乱れを区別することを不可能にし得る。この場合に、 $\Delta f = (2v + 1) / (2 \cdot T_d)$ の設定が使用され得る。ここで、 v は、測定を可能にするように、 f_1 がフェーディングされる場合に f_2 からの強い後方散乱を提供する可能性が高い何らかの整数である。

【0077】

実際に、 T_d にわたるサンプリングウィンドウは矩形でなくてもよいので、 Δf 及び T_d のいくつかの調整が、フェーディングを最小限にするために必要とされ得る。

【0078】

同じ原理は、 $\Delta f = v / T_d$ をセットすることによって、単周波数パルスよりも、イントラパルスコヒーレントフェーディングに苦しむ可能性が高いコンジットパルスを生成するよう反転され得る。ここで、 v は、（例えば）何らかの非ゼロの整数である。これは、図33に示されるように、直接に復号されるファイバ上の各点からの後方散乱の大きさの変化をファイバひずみの変化が引き起こすところの分散型センサを構成するために、有用であり得る。本明細書で開示される他のシステムと対照的に、戻り後方散乱パルスは、（305、306での任意のフィルタリング及び増幅の後に）309で直接検出される。

10

【0079】

戻りパルスの振幅の変化は、このようにして決定され得るが、位相情報は取り出され得ない。位相情報がない場合に、ひずみと振幅との間の非線形な関係は復号され得ず、従って、ひずみ変化の定量的な測定は行われ得ない。しかし、システムは、ひずみが特定の位置（往復時間から決定される位置）で変化したとの指標を提供する。何らかの形の変化が起こったとの情報は、特定の用途で、特に、変化の頻度を示す時間にわたる測定と組み合わせて、有用であり得る。

【0080】

最小限のフェーディングの実施形態に戻ると、完全な相殺のために、夫々の反射からの同じ出力がファイバによって捕捉されるべきである。完全コヒーレントフェーディングの可能性は小さいが、起こる可能性がある。しかし、任意量のフェーディングが信号レベルを下げ、従って信号対雑音比を低減するので、完全なフェーディングは性能を劣化させるために求められない。

20

【0081】

上記の例では、2つの周波数が考えられてきたが、完全なフェーディングの可能性は、光学周波数の数を増やすことで更に下げられ得る。

【0082】

受信器では、同じ偏光での光のみが、コヒーレント加算して必要な信号を与えるために干渉する。従って、後方散乱信号とソースからの参照信号との間には、偏光アライメントが必要とされる。ファイバ及びコンポーネントにおける複屈折は、伝播する光の偏光の変化をもたらし得る。たとえ偏光が、後方散乱全体に影響を及ぼすゆっくりとした変化に適応するよう調整され得るとしても、偏光も、（例えば、夫々の後方散乱軌跡内で）適応され得るようにより急速に変化して、受信される信号の偏光フェーディングをもたらし得る。温度及びひずみは、複屈折の変動を引き起こして、温度変化、更には、測定される容易とされるひずみ変化に対する測定SNRの望ましくない交差感受性をもたらし得る。

30

【0083】

図9は、上記の同じ原理を使用するが、偏光フェーディングを緩和する手段を含むシステムの概略図を示す。ソース300は、上述されたように、 Δf で間隔をあけられている周波数のアレイを生成するが、本例では、隣接する周波数は異なる（が直交しない）偏光を有する。図4で見られるのと同じ参照番号により図9で示されるコンポーネントは、同等の機能を提供する。複屈折が円偏光を発生させない場合に、隣接する周波数は直交し得る。

40

【0084】

受信器91で、ソース300からの光は、カプラ310によってカプラ311、314へ分割される。夫々のカプラ311、314の出力は検出器313、316へ接続される。測定ファイバからの後方散乱信号は、カプラ318によってカプラ311、314へ分割される。経路の1つは、方向散乱光の偏光を90°回転させる偏光コントローラ317を含む。例となる偏光コントローラ317は、残り3つの経路のいずれかにも位置付けられてよい。

【0085】

50

隣接する周波数成分（上述されたように受信器で干渉する。）は直交偏光されないので、複屈折がない場合に、313及び316の両方で干渉が現れることになる。ソースジェネレータがあらゆる偏光（円偏光成分を含む。）の成分を有する光を生成する限り、その場合に、たとえコンポーネント及び試験ファイバの複屈折があっても、313若しくは316又はその両方で常に干渉が現れ、測定は常に行われ得る。直線偏光及び円偏光は両方とも、ソースジェネレータによって伝えられる。複屈折は、ファイバ長さに沿ってある点で直線偏光を円偏光に変換するよう4分の1波長板（quarter wave plate）を形成することが可能である。直線偏光しか発射されない場合に、これは（円偏光に対して直線偏光をぶつけることにより）干渉を妨げ得る。直線偏光及び円偏光の両方の伝送は、この制限を回避する。

10

【0086】

上述されたように、図4を参照して記載されたシステムは、周波数領域反射率計として動作して、後方散乱光を直接ソースからの基準と比較する。そのようなシステムは簡単であり、高い空間分解能を有するが、欠点もある。システムは、安定したソース周波数に依存し、後方散乱期間にわたるその周波数の変化は、測定されているひずみ変化と区別できない。また、夫々のゲージ長さの測定は、特定のゲージ長さの始めまでのファイバの全長に沿った積分されたひずみと、特定のゲージ長さの終わりまでの積分されたひずみとの間の差から、決定される。例えば、ファイバに沿ったいずれかの点での、復調可能な最大瞬時周波数を超える位相変化によるいずれかの測定の誤差は、誤った測定につながる。すなわち、ファイバに沿ったいずれかの点での過度の変化は、それより長い距離での誤差をもたらす。

20

【0087】

図10は、図4のシステムと同様の原理を利用するが、周波数領域システムの上記のいくつかの課題を解決し得る時間領域システムの図を示す。特に、ゲージ長さを境界する2つの点の間のひずみ変化は、測定ファイバに沿った他の位置でのひずみ変化と無関係に計算される。

【0088】

ソース201はソース300に相当し、 Δf で間隔をあけられているCW光学周波数（少なくとも2つであるが、通常は数百ある。）のアレイを出力する。CW出力は、変調器202によって変調される。変調器202はAOMであってよい。なお、この例では、先に利用された周波数シフトは不要であり、故に、如何なるタイプの変調も利用され得る。変調器202からのプローブパルス1010、1020、10n0は、 T_p の存続期間及び繰り返し周期 T_r を有する。プローブパルスは、サーキュレータ2によって測定ファイバ内に結合される。サーキュレータ2はまた、戻り後方散乱光を受信器208へ結合する。任意の増幅器203、205及びバンドパスフィルタ204、207は、信号対雑音比を改善するように利用されてよい。

30

【0089】

ファイバ209の基準コイルは、ゼロ信号基準を供給するよう温度及び振動制御され得る。

【0090】

40

図11は、図10のシステム内の受信器208として使用される受信器モジュールを例示する。入力部110での入来する後方散乱は、光カプラ111によって3方向に分けられる。第1光学経路は、遅延素子213において時間 T_d で遅延される。第2光学経路は、光学周波数を $(\Delta f + f_m)$ だけダウンシフトするダウンシフタ211を有し、第3光学経路内のアップシフタ212は、周波数を $(\Delta f + f_m)$ だけシフトする。アップシフタ212及びダウンシフタ211は、周波数変調を提供するようCWモードで実行されるAOMであることができるが、振幅変調は提供しない。

【0091】

ダウンシフトされた信号及び遅延された信号は、光カプラ115で結合され、検出器214によって受信される。同様に、アップシフトされた信号及び遅延された信号は、光カ

50

プラ 1 1 7 で結合され、検出器 2 1 5 によって受信される。

【0092】

検出器 2 1 4 では、 f_{k+1} の遅延された後方散乱光が、 f_k の遅延されていない（しかし、光学周波数がダウシフトされている）後方散乱光と干渉し、 f_m のヘテロダイン搬送波が生成される。周波数の各対は、このようにして、搬送波を形成するよう結合する。同様に、検出器 2 1 5 では、 f_{k-1} の遅延された後方散乱光が、 f_k の遅延されていない（しかし、光学周波数がアップシフトされている）後方散乱光と干渉し、同じく f_m のヘテロダイン搬送波が生成される。生成された組み合わせは、図 1 1 の下半分で示されている。

【0093】

任意の偏光コントローラ 2 0 9、2 1 0 は、受信器の光学部品内の複屈折を考慮するよう含まれ得る。ダウシフタ 2 1 1 又はアップシフタ 2 1 2 は、検出器 2 1 4、2 1 5 からの信号間に任意の位相差が存在するように信号の位相差を与えるよう構成され得る。これは、復号プロセスに利点をもたらす得る。

【0094】

図 1 1 の受信器システムは、測定誤差をもたらすことになる相対的な経路長の変化を回避するよう安定化される振動及び温度から分離されてよい。

【0095】

図 1 2 は、シフトされていない経路にではなく、アップシフトされた経路及びダウシフトされた経路の両方に遅延が適用される、図 1 1 の受信器構造に代わる受信器構造を示す。図 1 2 の受信器の動作は、図 1 1 に関連して記載された通りである。

【0096】

先に説明されたように、イントラパルスフェーディングは、隣接する周波数がいずれもフェーディングされる可能性が低いように Δf 及び観測時間 T_d をセットすることによって、最小限にされ得る。このようにして、検出器 2 1 4 で現れる 1 0 1 1 + 1 0 2 2 がフェーディングされる場合に、1 0 1 1 又は 1 0 2 2 はゼロに重なっているため、検出器 2 1 5 に集まる 1 0 2 1 及び 1 0 1 2 はフェーディングされる可能性が非常に低い。従って、信号は、検出器 2 1 4 又は 2 1 5 のいずれか一方に常にあるはずである。

【0097】

しかし、時間領域の実施形態では、遅延された後方散乱と遅延されていない後方散乱とを結合しているため、インターパルスコヒーレントフェーディングも考慮しなければならない（図 1 6）。時間領域反射率計は、後方散乱を、更に試験ファイバに沿って遅延された後方散乱と重ね合わせるため、遅延された後方散乱及び遅延されていない後方散乱からの成分が破壊的に干渉して、光を生成しない可能性がある。この可能性は、差分周波数 Δf 及び遅延時間 T_I を最適化することによって最低限にされ得る。検出器 2 1 4 での組み合わせ 1 0 1 1 + 1 0 2 2 を考えるとすると、この組み合わせが破壊的な干渉を生成する場合に、1 0 1 1 からの後方散乱は、 T_I を通して周波数 f_2 の光が受ける遅延によって可能にされる 1 0 2 2 からの遅延された後方散乱と破壊的に加算され得る。検出器 2 1 5 での同等の組み合わせ 1 0 1 2 + 1 0 2 1 の場合に、遅延 T_I は周波数 f_1 の光に適用される。周波数差 Δf が、 $\Delta f = 1 / (2 \cdot T_I)$ のようにセットされる場合に、検出器 2 1 5 での組み合わせ 1 0 1 2 + 1 0 2 1 は建設的に加算すべきである。このように、インターパルスコヒーレントフェーディングは最小限にされ得る。これまでのように、 w が整数であるとして、 $\Delta f = (1 + 2w) / (2 \cdot T_I)$ であるやや次善の設定が必要となり得る。

【0098】

数百の周波数トーンが生成される場合に、 f_1 、 f_3 、 f_5 などの組み合わせが一度に全てフェーディングすることがないように、この設定からわずかに離調することが望ましい。

【0099】

図 1 3 は、図 1 1 及び 1 2 の受信器に示されている検出器からの信号を用いて測定を行

10

20

30

40

50

うための復調アルゴリズムを示す。この例となるアルゴリズムは、検出器 2 1 4 及び 2 1 5 で観測される搬送波間に 1 8 0 ° 位相差を配置することに基づく。それにより、2 つの検出器 2 1 4 及び 2 1 5 からの信号が減算される場合に、最大搬送波信号が達成される。これは、コモンモードノイズ、例えば、アップシフタ／ダウンシフタ駆動エレクトロニクスでの周波数ノイズの影響を小さくするという利点を与える。5 0 2 からの減算された信号は、分割され、1 つ以上のサンプル捕捉モジュール (5 0 8、5 1 0、5 1 3、5 1 6) に入る。それらのモジュールは、試験ファイバ上の関心のある領域と一致する時点からの後方散乱 (プローブパルスに対して遅延 t_x で検出器に到着する。) を取り出し、残りを捨てる。サンプル捕捉モジュールはまた、必要に応じて、平均化又はフィルタ処理も実行してよい。 f_m の搬送波基準に対する、サンプル捕捉モジュールに存在する信号の位相は、モジュール 5 0 9、5 1 1、5 1 4 及び 5 1 7 によって計算される。

10

【0 1 0 0】

逆正接関数 ($\arctan$) を使用する標準的な直交位相復調モジュールの例が、図 1 4 に示されている。復調された位相は、試験ファイバ上の点での時間 T_d 内の位相の変化を表す。遅延 t_0 を有して戻る後方散乱は、感度の悪い基準ファイバに対応するので、レーザノイズは、この信号をファイバ上の他の点から復調された信号から離すことによって低減され得、最終的な位相信号 5 1 2、5 1 5 及び 5 1 8 が得られる。明らかに、最大 T_r / T_I までの任意数の関心のある点 q が、このようにして、更なるサンプル捕捉及び位相復調モジュールを加えることによって復調され得る。

20

【0 1 0 1】

時間とともに、インタロゲータ内の光ファイバ、コンポーネント及びソースの位相遅延及び複屈折はゆっくりとドリフトするので、継続的な最良動作のためにシステム動作パラメータの微調整を行うことが必要である。 ϕ_{AOM} 、すなわち、受信器内のアップシフタ及びダウンシフタモジュールによって課される位相差は、検出器 2 1 4 及び 2 1 5 で逆位相 f_m 搬送波を保つよう調整される。これは、基準コイルから受け取られるコモンモード搬送波を最小限にすることによって達成される。加算ユニット 5 0 3 は、検出器 2 1 4 及び 2 1 5 からの光を加算する。サンプル捕捉器 5 0 4 は、基準コイルに関連した後方散乱を取り出す。搬送波周波数 f_m の出力の大きさがモジュール 5 0 5 によって取り出される。

【0 1 0 2】

上述されたように、同様の偏光の光成分のみが干渉を生成するよう重なり合う。従って、光学試験ファイバ 1 及び相互接続部品における複屈折は、干渉光が検出器 2 1 4 及び 2 1 5 で生成されないように図る可能性がある。これは、受信器干渉計において如何なる残留複屈折も補償するように偏光コントローラ 2 0 9 及び 2 1 0 を設定することによって解決可能である。ソースジェネレータは、隣接する光成分の周波数が 4 5 度の相対偏光を有するように設定可能であり、初期偏光は、あらゆる偏光状態の光成分がコンポジットパルスにおいて発射されるように設定される。図 1 7 に示されるように、1 つの周波数成分の対について、試験ファイバの複屈折に関係なく、少なくとも 1 つの検出器で干渉が観測される。

30

【0 1 0 3】

図 1 5 は、例となる搬送波振幅測定モジュールを示す。受信される搬送波の強さは、5 0 6 によってローパスフィルタをかけられる。フィードバックモジュール 5 0 7 は、最小信号がモジュール 5 0 6 から出力されるようにアップシフタ及びダウンシフタによって化される位相差 ϕ_{AOM} を調整して、搬送波が逆位相で 2 つの検出器において現れることを確かにする。

40

【0 1 0 4】

図 3 4 は、検出器からの信号を別々に結合する代替の復調アルゴリズムを示す。ここで、試験ファイバ上の各点に対応する後方散乱は、検出器の夫々から別々に決定され、試験ファイバ上の関心のある各点について 2 つの捕捉されたサンプルストリームもたらす。捕捉されたサンプルストリームの夫々の中の搬送波の強さがその場合に決定される。組み合

50

わせステップは、単一の位相符号化された搬送波を供給するよう、2つ（以上）の結果として現れる搬送波サンプルストリームから後方散乱を選択又は結合する。例えば、組み合わせステップは、最大搬送波振幅と一致する捕捉されたサンプルストリームを選択してよい。単一の結合された位相符号化搬送波は、次いで、試験ファイバ上の特定の点でのひずみの変化を表すよう復調される。

【0105】

要約すると、これらの配置は、多数の利点を有している：

1. 成分周波数の多くの組み合わせは搬送波 f_m に夫々寄与する。これは、次の理由により感度を改善する：

i. 単周波数で発射され得る電力は、一般的に、誘導ブリルアン散乱及び他の非線形効果によって制限される。コンポジットパルスは多くの異なる周波数から成るので、本明細書で記載されるシステムによって発射され得る総出力は、単周波数システムによって発射され得た出力をはるかに上回る。これは、より高い後方散乱出力及びより良い S N R をもたらす。

i i. 光検出帯域の大部分が希望信号によって占有されるので、検出 S N R は、単周波数システムと比較して改善される。

i i i. 差動検出は、検出器に対するコモンモード信号の影響、例えば、周波数シフトノイズ、電氣的干渉、及び光学ノイズの一部を除去する。

2. 先に説明されたように、 Δf を適切な値に設定することによって、隣接する周波数からの後方散乱がいずれもフェーディングされる可能性は小さくされ得る。異なる後方散乱の対は夫々の検出器 214 及び 215 で搬送波を形成するので、実際面では、両方の検出器からの光がいずれもフェーディングされ得ることは起こり得ない。

3. 隣接する周波数を 45° 又はほぼ相対的な偏光状態で発射することによって、214 及び 215 からの光は、遅延時間 T_1 の間のソースファイバにおける複屈折に関わらず、干渉を含むべきである。複屈折が（例えば）1011からの光を1022と直交させる場合に、検出器 214 でその組み合わせから干渉光は生じず、その場合に、その同じ回転は、1021+1012に215で干渉光を生成させるべきである。（約 Δf の周波数差の光が受ける複屈折は極めて相似である。）

4. 214 及び 215 で受信される搬送波 f_m が任意の位相差を有することができるように、周波数シフト 211 及び 212 によって位相差が課され得る。フィードバックシステムは、受信器オプティクスの変化を補償し、検出器 214 及び 215 で必要とされる位相差を保つために必要とされる。この位相差は、2つの方法で使用され得る。

i. フェーディングに対する最小の感受性及び最小の雑音が必要とされる場合に、 180° の位相差は、214 が 215 から取られるときに強い搬送波が形成されることを可能にし、従って、上記で詳細に説明されるように雑音を低減する。

i i. 最高のダイナミックレンジが必要とされる場合に、 90° の位相差は、直交検波による前のサンプルへの参照を必要とせずファイバの各部分内のひずみ変化が復号されることを可能にする。

【0106】

代替的に、遅延されない光が、図 12 に示されるように、遅延及びダウンシフトされた又は遅延及びアップシフトされた光と重ね合わされ得る。

【0107】

図 18 は、図 11 及び 12 に関連して先に機能的に記載された時間領域受信器の物理的実装を例示する。

【0108】

受け取られた後方散乱光はカプラ 210 によって分割され、夫々の出力部は、光を夫々反対の方向にシステムに通す。カプラ 211、221 は各々の光を分割し、第 1 部分はバイパス経路 180 をたどる。バイパス経路 180 は、電力レベルを調整するよう任意の減衰器 212 を含むことができる。カプラ 211、221 の他方の出力部は、光をカプラ 214、219 の更なる対に結合する。カプラ 214、219 は、2つの指向性経路の間で

光を分ける。光アイソレータ 217、218 は、各経路において必要とされる方向で伝播するように光を制限する。アイソレータは、夫々の経路において他の構成要素とともに如何なる適切な順序でも位置付けられ得る。例えば、周波数シフタ 215、216 又は変更コントローラ 226、227 からの反射を回避するよう各経路の入力端に夫々のアイソレータを位置付けることが好まれ得る。周波数シフタ 215、例えば、AOM は、 $\Delta f + f_m$ だけ信号の光学周波数をアップシフトし、周波数シフタ 216、例えば、AOM は、 $\Delta f + f_m$ だけ光学周波数をダウンシフトする。

【0109】

アップシフトされた光及びダウンシフトされた光は、逆方向でカプラ 211、214、219、221 を通って伝播し、受信器 223、225 で受光される。受信器 223、225 で、光は、バイパス経路 180 を通過した光とコヒーレントに混合する。

10

【0110】

図 19 は、時間領域受信器の更なる物理的実装を示す。受け取られた後方散乱光は、 3×3 カプラ 231 によって 3 つの成分に分けられる。1 つの成分は、遅延 ($T_1 / 2$) を有する遅延コイル 232 を通ってファラデーミラー 233 上に向けられる。カプラ 231 に戻る光は、このようにして T_1 だけ遅延されている。ファラデーミラーは、遅延コイル 232 における如何なる複屈折効果も緩和する。

【0111】

カプラ 231 からの残り 2 つの出力は夫々、アップシフタ 238 及びダウンシフタ 234 へ向けられる。アップシフタ 238 及びダウンシフタ 234 の夫々は、上記の AOM であってよい。アップシフトされた光及びダウンシフトされた光は、遅延された光とカプラ 235、240 で結合され、検出のために受信器 237、242 へ向けられる。任意の偏光コントローラ 239、241 は、遅延及びシフトされた信号の偏光のアライメントを検出器 237、242 で確かにするために含まれてもよい。図 19 の受信器は、このようにして、検出器で信号の必要とされる組み合わせを生成する。

20

【0112】

図 20 は、時間領域受信器の更なる物理的実装を示す。受け取られた後方散乱光は、カプラ 250 によって分割される。カプラ 250 の 1 つの出力は、カプラ 251 へ結合される。カプラ 251 は、光を遅延経路 254 及びダウンシフト経路に分ける。カプラ 250 の残りの出力は、カプラ 257 へ結合される。カプラ 257 は、光を遅延経路 254 及びアップシフト経路に分ける。

30

【0113】

ダウンシフト経路は、AOM 252 及びファラデーミラー 253 を有する。光は、ダウンシフト経路に入り、ダウンシフタ 252 を 2 回通って光学周波数がダウンシフトされ、カプラ 251 に戻る。AOM 252 は、 $(\Delta f + f_m) / 2$ の RF 周波数で作動し、 $(\Delta f + f_m)$ の総周波数シフトを提供する。ダウンシフトされた光は、遅延された光とカプラ 251 で混合され、検出器 261 へ送られる。検出器 261 で、それはコヒーレントに混合し、検出される。同様に、光は、AOM 256 でアップシフトされ、遅延された光と受信器 259 で混合し、それによって、必要とされる成分が生成される。任意の偏光コントローラ 262 が、受信器システムにおいて複屈折を除くために含まれてもよい。

40

【0114】

図 21 は、ただ 1 つの周波数シフトを利用する受信器の更なる例を示す。受け取られた後方散乱光はカプラ 270 へ結合され、その 1 つの出力は第 1 バイパス経路 281 へ接続される。カプラ 270 の残りの出力は AOM 271 へ接続され、AOM 271 は周波数を $\Delta f + f_m$ だけシフトする（アップシフト又はダウンシフトのいずれか一方）。更なるカプラ 272 は、シフトされた光をファラデーミラー 273 に方向付け、ファラデーミラー 273 は、光を AOM 271 に通し、カプラ 270 を介して第 2 バイパス経路 283 へ反射する。カプラ 272 の残りの出力は、光を遅延素子 274 に通して、次いでカプラ 275、276、277 を介して検出器 279、281 へ結合する。検出器 279 で、遅延され、シフトされた光は、バイパス経路 282 を通るシフトも遅延もされなかった光と混合

50

される。検出器 281 で、遅延され、2 回シフトされた光は、一度シフトされた光と混合される。両方の検出器で、従って、1 つの Δf が間に存在する成分の混合がある。任意の偏光コントローラ 283 及び 282 は、光学システムにおいて複屈折を補償するために設定される。図 22 は、例となる 2 成分周波数ソースジェネレータを示す。低周波ノイズレーザ 101 からの光は、カップラ 111 によって 2 つの成分に分割される。一方の経路は、AOM 112 によって Δf だけ周波数シフトされる。111 からの残りの光は、成分振幅のバランスをとるための任意の減衰器 115 と、2 つの周波数ソース成分の偏光間の差をセットするために使用され得る任意の偏光コントローラ 116 とを通る。2 つの経路は、カップラ 117 によって再結合され、任意のアイソレータ 118 を通って、次いで出力部へ向かう。

10

【0115】

図 23 は、3 つの周波数成分を生成する代替のソースジェネレータを示す。レーザソース 131 からの光は、 3×3 カプラ 132 によって分割される。出力光の部分は、FRM 133 によりシフトされずに反射される。残りの部分は、アップシフト AOM 137 を通され、偏光シフタ 138 を経由して、FRM 139 によって反射されてカップラ 132 へ戻る。このようにして、3 つの光成分が出力部で現れる。 Δf で成分を検出することによって、検出器 133 での光は、3 つの成分からの電力のバランスをとるために使用され得る。偏光回転子 138 及び 135 は、3 つの成分の相対的な偏光をセットするために使用され得る。

【0116】

20

図 24 は、3 つの成分周波数を生成するための第 2 の例となる構成を示す。ここで、低周波ノイズレーザ源 141 からの光はカップラ 142 によって分割される。光の部分は更に、カップラ 143 によって分割される。光のシフトされていない部分は、カップラ 146 及び 149 を通り、そして任意のアイソレータ 152 を通り、出力部へ続く。光の更なる部分は、AOM 144 によってシフトされ、コントローラ 145 によって偏光調整され、次いで再結合されて出力部に届く。更なる経路は、カップラ 142 及び AOM 147 (AOM 144 とは反対方向に光をシフトするよう選択される。)、そして偏光制御 148 を通って、出力部で現れる。偏光コントローラは、成分間の如何なる所望の相対的な偏光も生成するために使用され得る。150 及び 151 での Δf 成分は、3 つの周波数で出力の大きさのバランスをとるよう監視され得る。

30

【0117】

図 25 は、3 つの周波数成分を生成するための更なるオプションを示す。レーザ 161 からの光はカップラ 162 によって分割される。新生のシフトされていない光の部分は、170 によって反射され、カップラ 162 に戻り、光アイソレータ 171 を経由して出力部に現れる。170 は、光成分における複屈折の影響を取り除くよう、ファラデー回転子ミラーであってよい。162 からの残りの光はカップラ 163 へ向けられ、カップラ 163 でそれは更に分割される。光の部分は 164 によってアップシフトされ、残りの部分は 167 によってダウンシフトされ、それらは、そして、166 及び 169 によって出力部へ反射される。166 及び 169 は FRM であってよい。ファラデー回転子であることができる任意の偏光シフタ 165 及び 168 は、成分が望まれるように相対的な偏光を有することを可能にする。

40

【0118】

図 26 は、再循環ループに基づき複数の周波数を生成するための構成の例を示す。低周波ノイズレーザ 101 からの光は、カップラ 102 によってループに結合される。光の部分は、続けて AOM 103 を通り、AOM 103 で Δf だけシフトされる。増幅器 104 は、ループの損失を補償し、フィルタ 105 は、生成される周波数の数を制限し、且つ、SNR を改善する。カップラ 106 は、ループからの光の一部を任意のアイソレータ 110 を介して出力部に向けて分割する。残りの光は、任意のアイソレータ 107 によって、任意の偏光回転子 108 (45 度ファラデー回転子であってよい。) を通り、任意の減衰器 109 を通り、そしてカップラ 102 により再度ループに結合される。減衰器 109 は、ルー

50

プをチューニングし、複数の全ての成分の電力のバランスをとるために使用され得る。フィルタ105は、生成される周波数の数を制限するとともに、プリアンファシスを与えて周波数の夫々のS N Rのバランスを保つよう配置され得る。

【0119】

図27は、ソース181からの光がカプラ182によって分割され、次いでAOM183を通り、偏光コントローラ184、偏光回転段185、バンドパスフィルタ186を通り、カプラ187を通り、そして任意のアイソレータ190を通して出力部へ進む代替バージョンを示す。増幅器188は、複数の光成分が出力部で生成されるように、光を再循環する。フィルタ186は、成分のS N Rのバランスをとり且つ生成される成分の数を制限するために使用され得る。

10

【0120】

図28は、複数の周波数を生成するための代替の配置を示す。2又は3の周波数ソース142が143によって増幅される。高非線形 (highly non-linear) ファイバ (例えば、フォトニック結晶ファイバ) 144とともに増幅器ファイバは、4波混合によって更なる周波数成分を生成する。BPF145は、成分を、必要とされる数及び波長範囲に制限する。

【0121】

図29は、代替の構成を示す。ここで、コム・ジェネレータ (comb generator) の出力は、関心のある範囲へと帯域通過フィルタをかけられる。いくつかのコム・ジェネレータのタイプについて、生成される周波数の数は $T_I \cdot \Delta f$ によって与えられ、故に、より長い T_I は、十分な成分が発射されることを確かにするために必要とされ得ることに留意されたい。

20

【0122】

前述の記載では、定義された周波数の複数のプローブ信号が送信された。各周波数のアライメントされたパルスの連続が測定ファイバ内に伝えられる。システムの感度及びダイナミックレンジを改善するために、第2組のプローブ信号が、図30に示されるように伝送され得る。第2組の信号は、上記の同じ特性を有するが、第1信号が位置する波長とは分離した第2波長に位置する。すなわち、 λ_0 の複数の光信号と λ_1 の複数の光信号とが存在し、それらの信号の間には、周波数/波長領域においてオーバーラップがない。 λ_0 の信号及び λ_1 の信号はいずれも、上述されたような、時間領域における一連のパルスであるが、図30から分かるように、それら一連のパルスの間には時間オフセットが存在する。

30

【0123】

受信器では、2つの波長が分離され、独立して検出される。上記の受信器アーキテクチャは、両方の波長に対して利用可能であり、夫々の波長は、測定の波長のための検出器へ方向付けられる。例えば、複数の検出器の直前に、波長選択デマルチプレクサが利用される。

【0124】

このシステムは、サンプリングレートが2倍にされ、それによって位相のより高い最大瞬時変化率を可能にするということで、システムのダイナミックレンジを増大させる。感度も、サンプリングレートの倍増により高められる。

40

【0125】

2組よりも多い信号も、性能を更に改善するために用いられてよい。

【0126】

信号は、1つの広帯域幅ソースジェネレータからの光を分割することによって、又は2つのレーザから得られる2つの別個のソースジェネレータを有することによって、取得され得る。

【0127】

時間領域受信器での遅延長さは、試験ファイバ内の位相の変化が計算されるゲージ長さをセットする。様々な応用に対して、異なるゲージ長さが望まれ得る。これは、図31に

50

示されるよう、後方散乱光を夫々異なる時間により2以上の受信器へ分割することによって達成され得る。図31の配置は、異なるゲージ長さが同時に測定されること可能にする。更には、可変な遅延素子が、可変なゲージ長さを提供するために如何なる受信器でも使用され得る。

【0128】

受信器システムにおける周波数シフトは、搬送波を生成するよう、検出器に衝突する後方散乱の組み合わせを設定する。図32に示されるように、異なるアップシフト及びダウンシフトを有する第2組の受信器を導入することによって、周波数の異なる組み合わせが検出器へ方向付けられ得る。夫々の受信器は、 $n \cdot \Delta f + f_m$ に等しい周波数シフトを使用し、それにより、異なる組み合わせの搬送波が f_m で同じヘテロダイン搬送波を生成するよう混合する。

10

【0129】

これは、著しい複屈折又はフェーディングが観測される場合に利点がある。というのも、全ての検出器610～613での信号がフェードされる可能性が、611及び612の両方がフェードされる可能性と比べて減少するからである。

【0130】

上記は、主として、純粋に分散型のセンサを参照して、与えられてきた。しかし、技術及び装置は、ファイバに沿って定義された位置で特定の戻り信号を生成するよう反射体を備えたシステムにも適用され得る。これは、測定ファイバに沿って定義された位置で測定ファイバの感度を高めるために望ましい。更に、システムは、適切なトランスデューサを用いて事象を検出する十分な感度を提供し得る。例えば、ある長さのファイバが、加速度をファイバひずみに変換するトランスデューサに巻き付けられる。本明細書で記載されるシステムは、加速度を検出するようトランスデューサに関連する比較的短い長さのファイバ内の変化を感知することができる。この場合に、記載されるシステムは、変調されたファイバ長内から得られる後方散乱光が、トランスデューサの近くで感度の低いファイバを特に必要とせず、測定を行うために使用され得るという利点を有する。これは、システムがトランスデューサファイバ内のひずみ変化によって引き起こされるフェーディングの影響を受けないからである。

20

【0131】

本明細書で記載される光カプラのいずれも、同等のカプラであってよく、あるいは、夫々の出力に対して不均等な結合比を有して構成されもよい。必要とされる比率は、システムの性能を最適化するよう選択される。

30

【0132】

本発明は、いくつかの実施形態に関連して記載されてきたが、それは、本明細書で示されている具体的な形態に制限されるよう意図されない。むしろ、本発明の適用範囲は、添付の特許請求の範囲によってのみ制限される。その上、特徴は、特定の実施形態に関連して記載されているように思われ得るが、当業者は、記載されている実施形態の様々な特徴が本発明に従って組み合わされてよいと認識するであろう。特許請求の範囲において、語「有する」は、他の要素又はステップの存在を排除しない。

【0133】

更に、特許請求の範囲における特徴の順序は、特徴が実行されるべき如何なる特定の順序も示さず、特に、方法の請求項における個々のステップの順序は、ステップがこの順序で実行されるべきことを示すものではない。むしろ、ステップは、如何なる適切な順序でも実行されてよい。その上、単数参照は複数を排除しない。よって、「1つ」、「第1」、「第2」などは複数を排除しない。特許請求の範囲において、語「有する」又は「含む」は、他の要素の存在を排除しない。

40

【図 1】

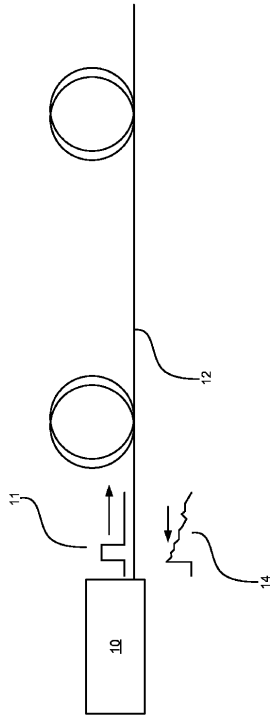


FIG. 1

【図 2】

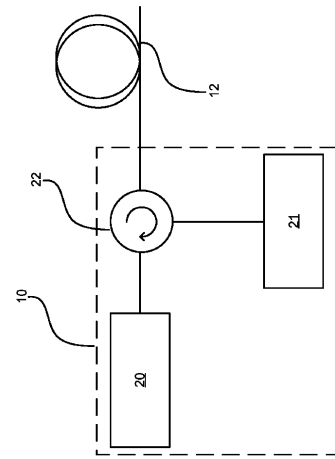
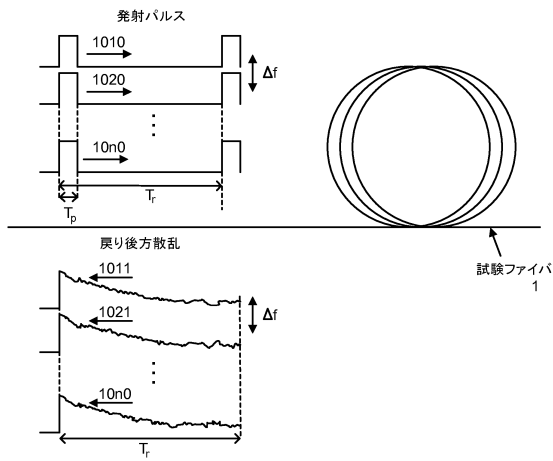
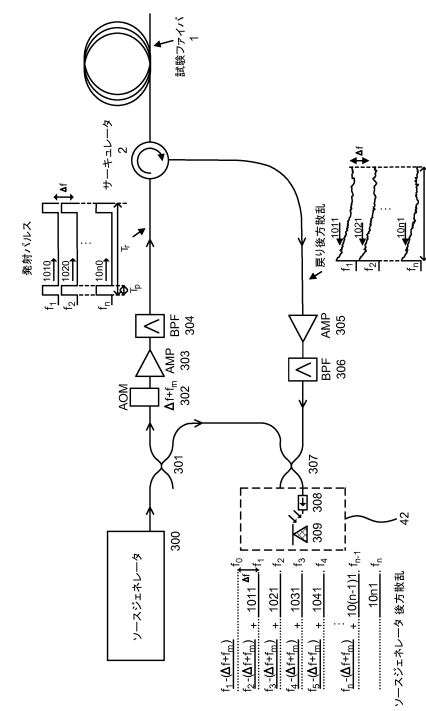


FIG. 2

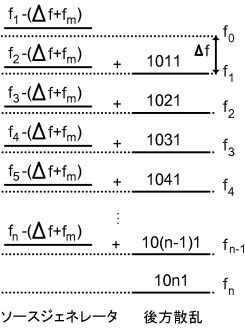
【図 3】



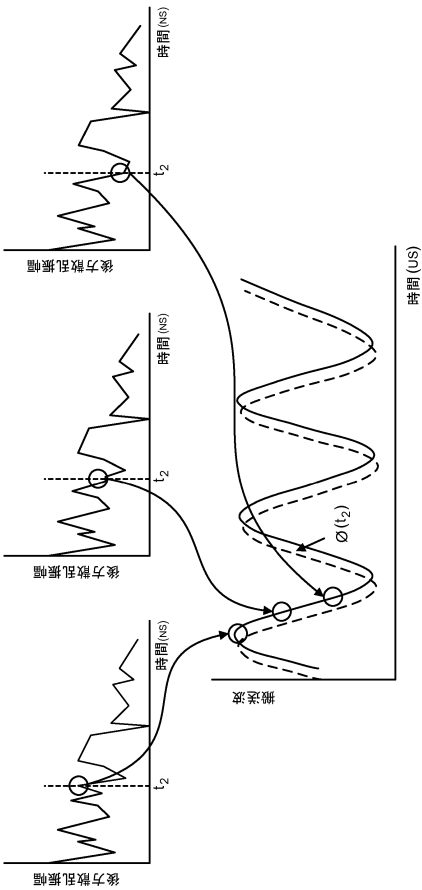
【図 4】



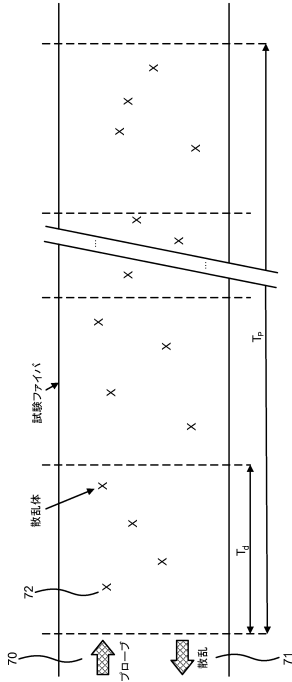
【図 5】



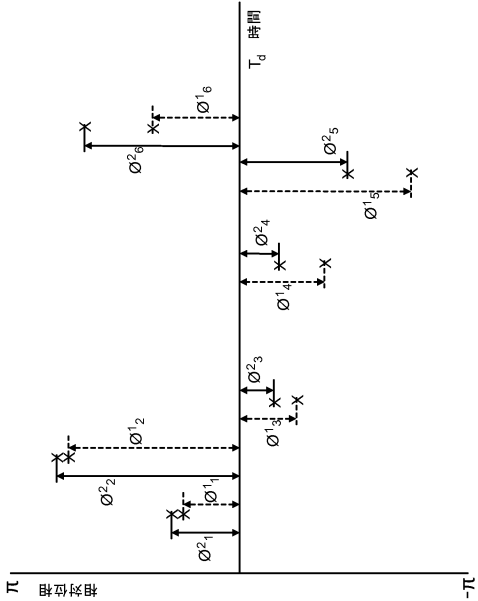
【図 6】



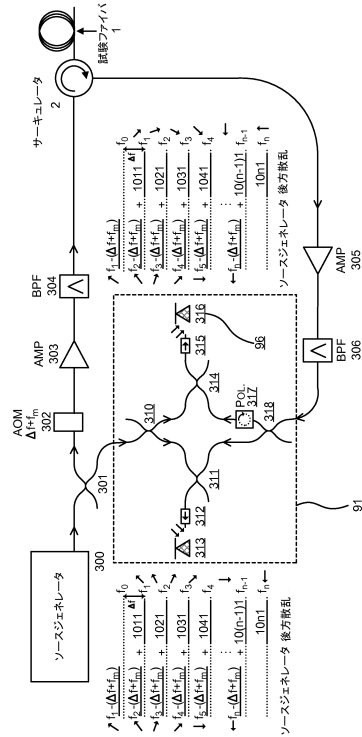
【図 7】



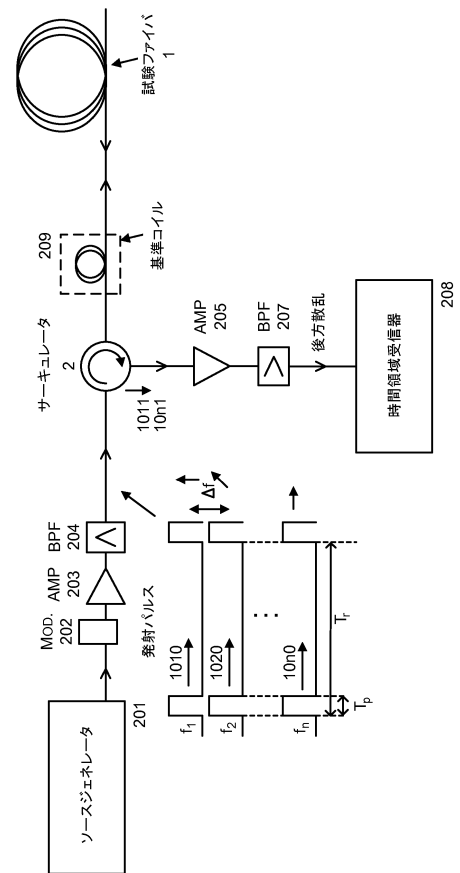
【図 8】



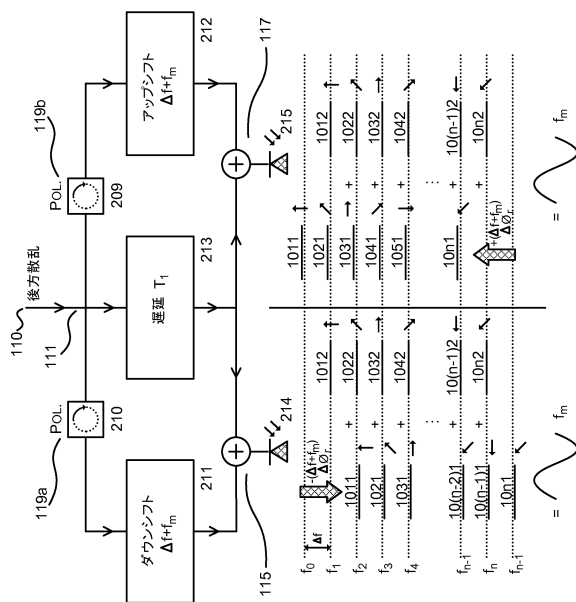
【図 9】



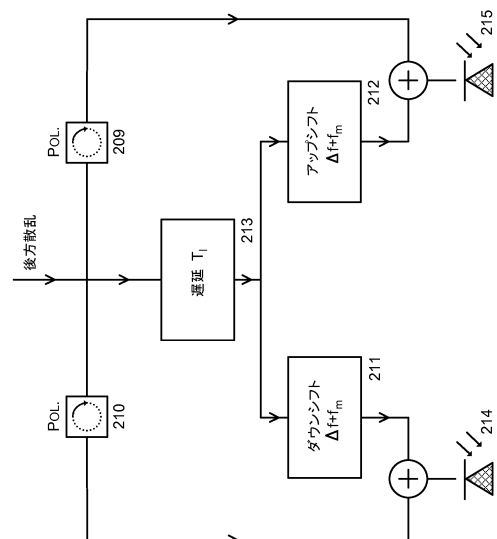
【図 10】



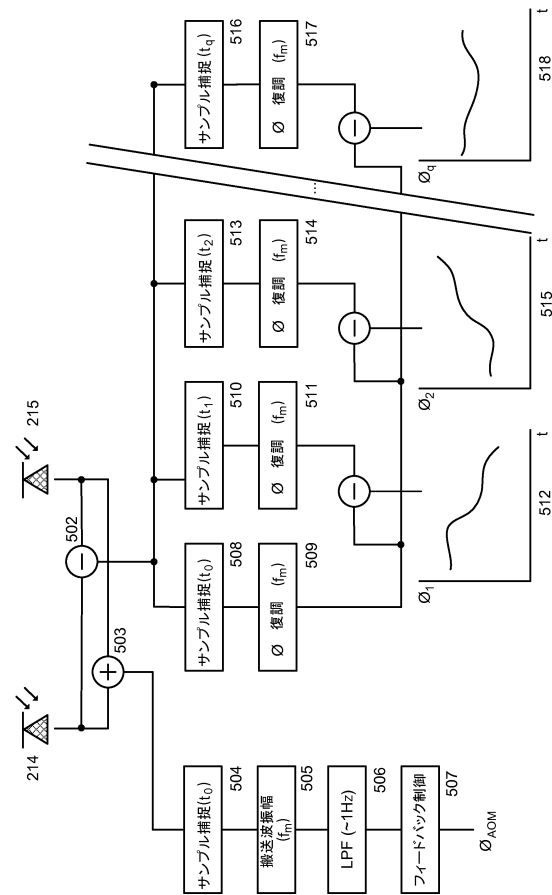
【図 1 1】



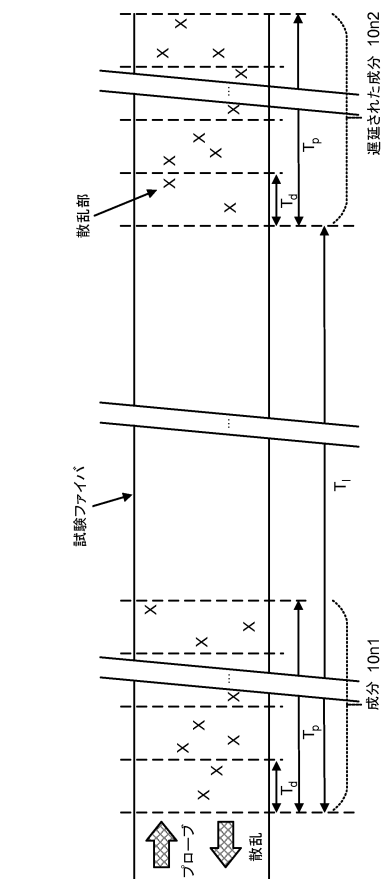
【图 1 2】



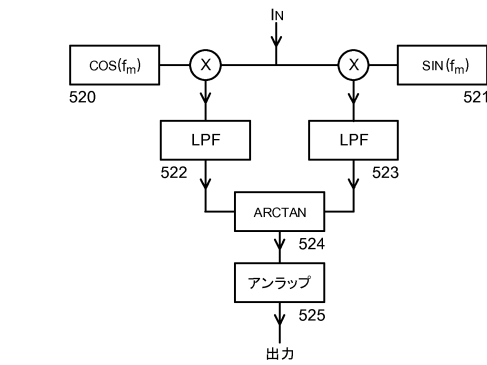
【図 1 3】



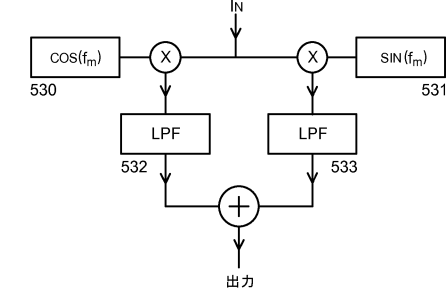
【図 1 6】



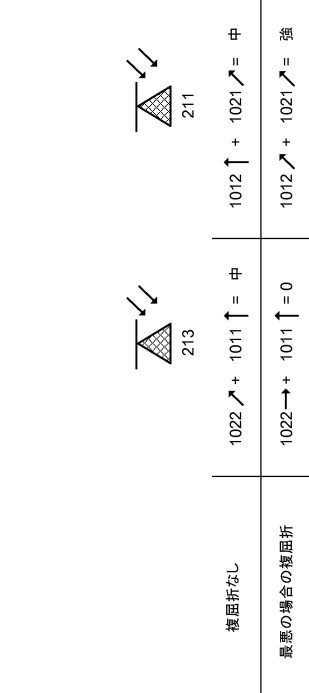
【図 1 4】



【図 1 5】

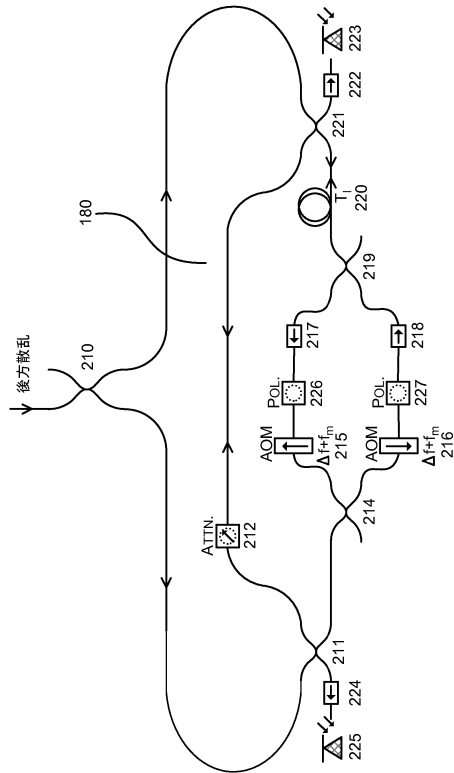


【図 1 7】

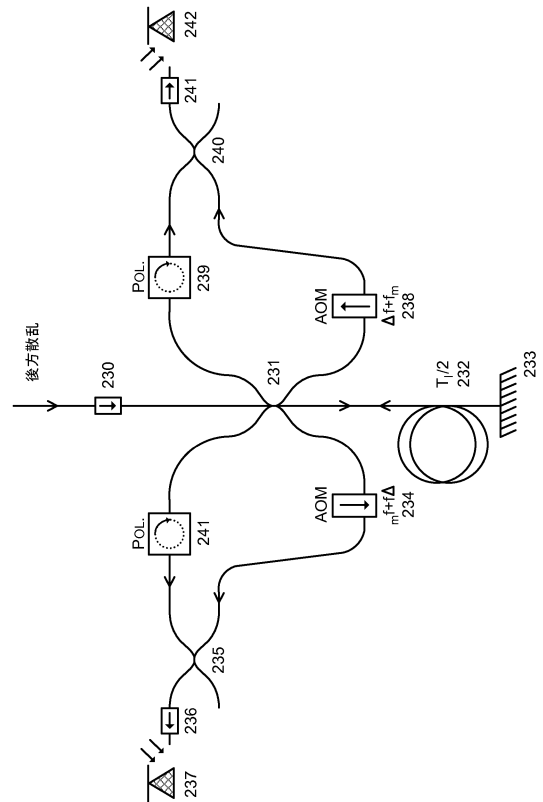


複屈折なし	1022 ↗ + 1011 ↑ = 中	1012 ↑ + 1021 ↗ = 中	1012 ↗ + 1021 ↗ = 強
最悪の場合の複屈折	1022 → + 1011 ↑ = 0	1012 ↑ + 1021 ↗ = 0	1012 ↗ + 1021 ↗ = 強

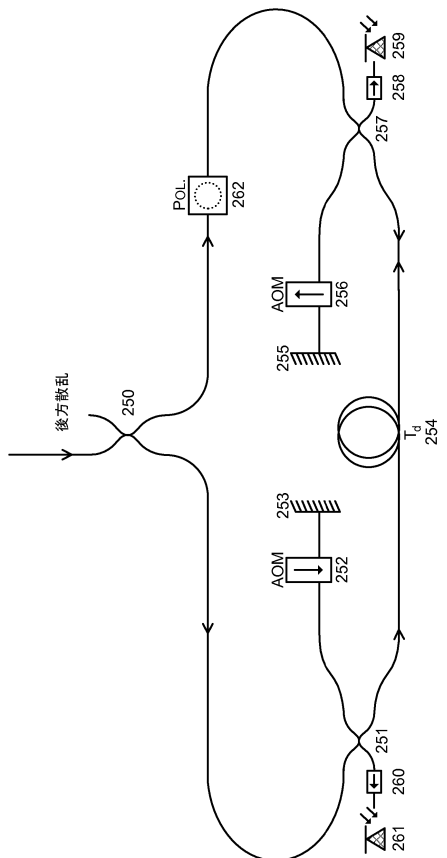
【図 18】



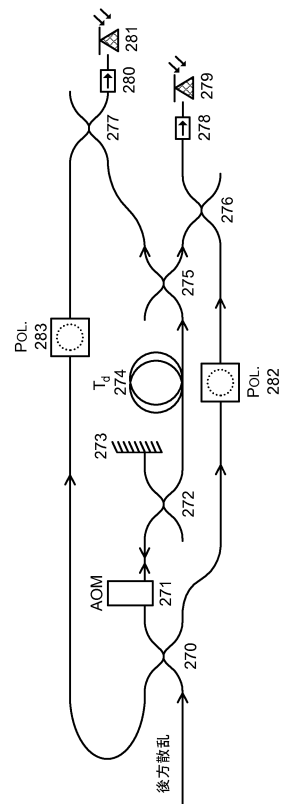
【図 19】



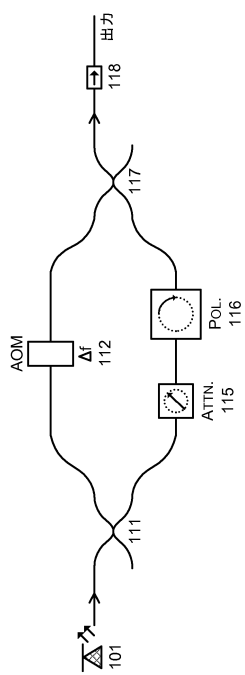
【図 20】



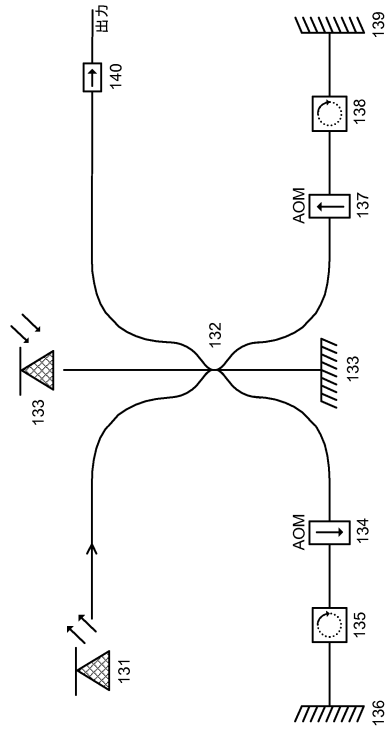
【图 2 1】



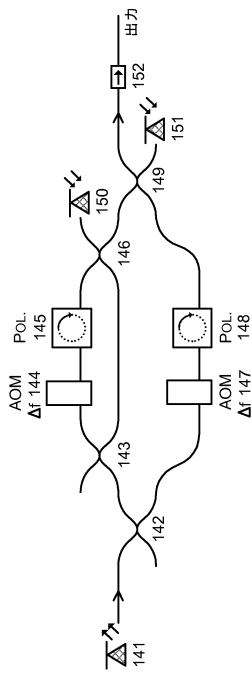
【図 2 2】



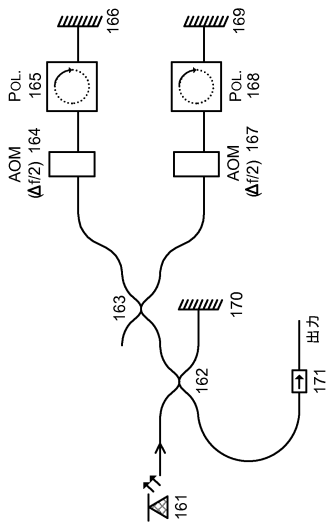
【図 2 3】



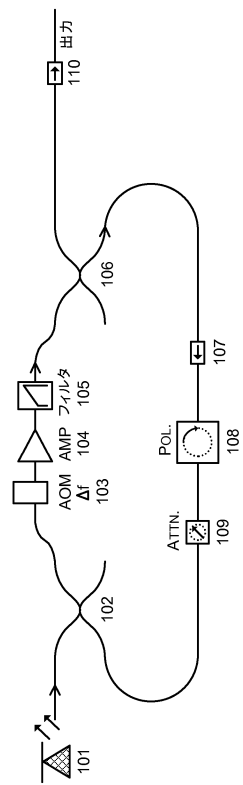
【図 2 4】



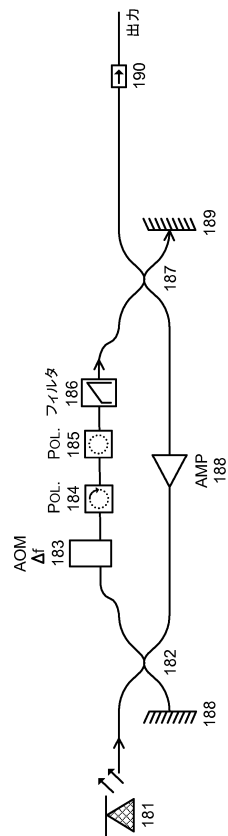
【図 2 5】



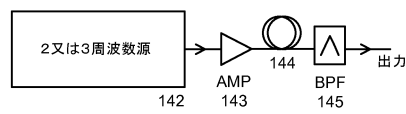
【図 2 6】



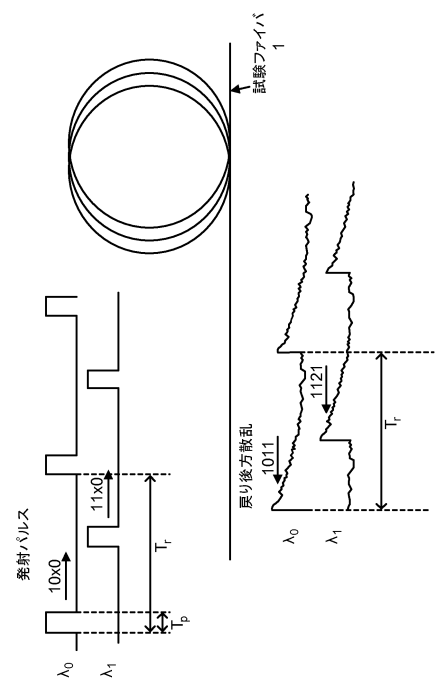
【図 2 7】



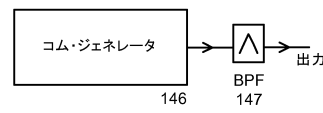
【図 2 8】



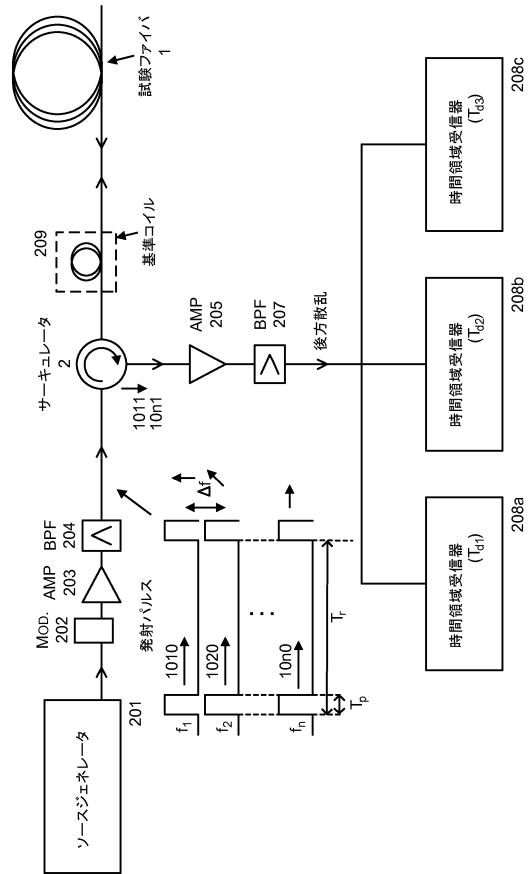
【図 3 0】



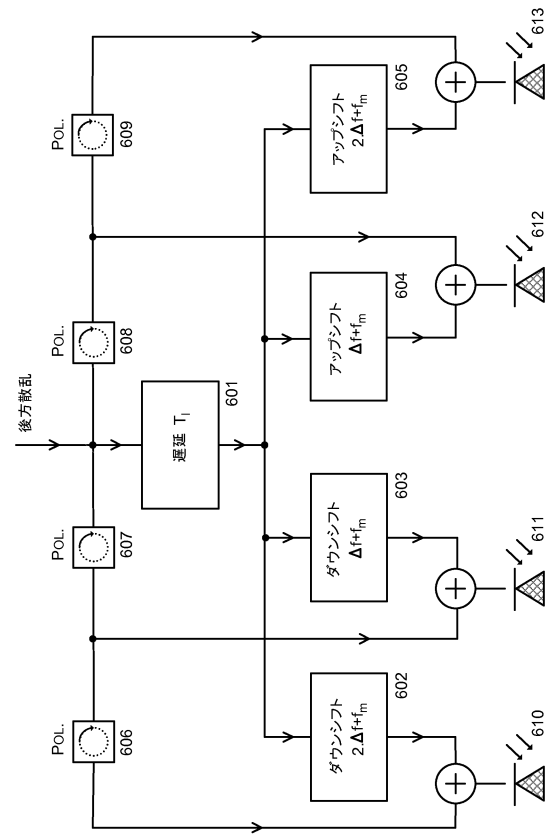
【図 2 9】



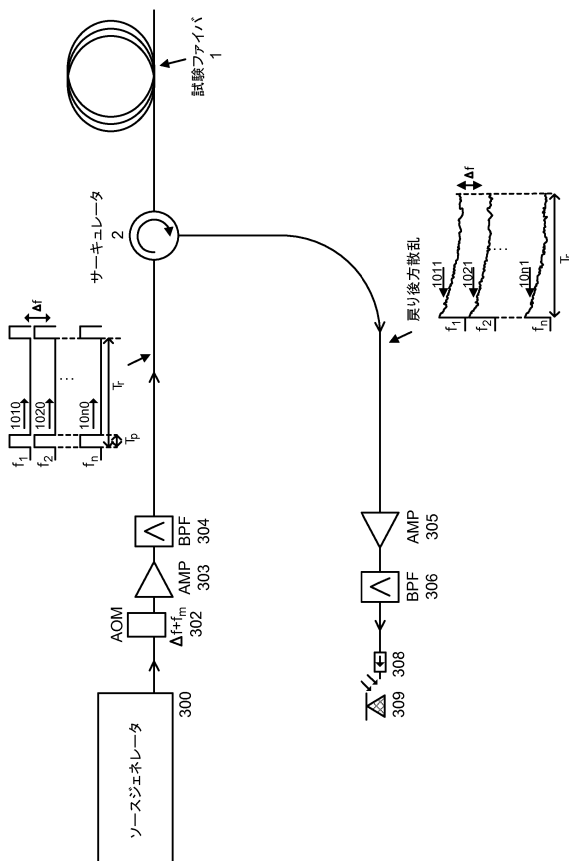
【図 3 1】



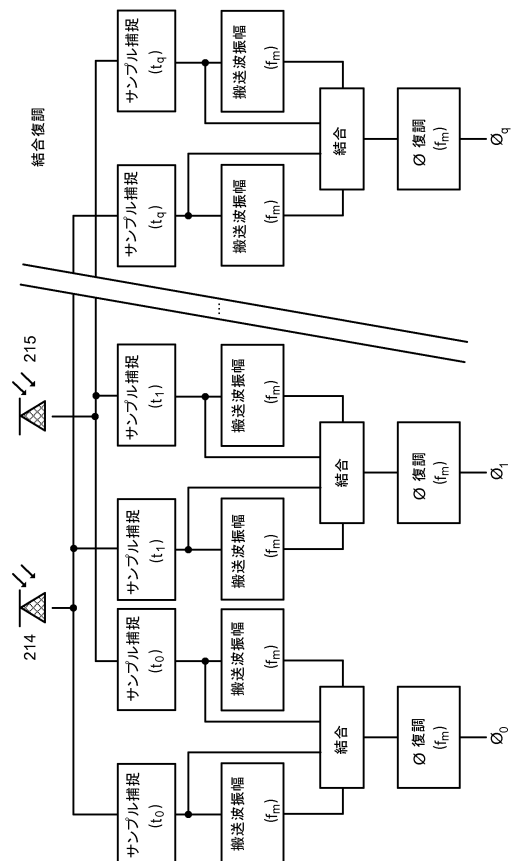
【図 3 2】



【図 3 3】



【図 3 4】



フロントページの続き

- (72)発明者 アルフレッド デンジル オースティン, エドワード
イギリス国, エスオー31 5エーイー ネットリー アビー, ステーション ロード 77
- (72)発明者 チョウ, ウェイゾン
イギリス国, ビーアール1 3ディーイー ケント ブロムリー, ザ チェイス 51

審査官 吉田 久

- (56)参考文献 特表2007-535674 (JP, A)
特開平2-242237 (JP, A)
特開2011-27649 (JP, A)
国際公開第2016/021689 (WO, A1)
特開平4-177190 (JP, A)
特開平10-82858 (JP, A)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
- | | |
|------|-----------|
| G01D | 5/26-5/38 |
| G01B | 11/16 |
| G02B | 6/00 |
| G01S | 13/34 |