

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6205680号  
(P6205680)

(45) 発行日 平成29年10月4日(2017.10.4)

(24) 登録日 平成29年9月15日(2017.9.15)

(51) Int. Cl. F I  
**GO 1 D 5/353 (2006.01)** GO 1 D 5/353 A  
**GO 1 B 9/02 (2006.01)** GO 1 B 9/02

請求項の数 5 (全 32 頁)

<p>(21) 出願番号 特願2012-44549 (P2012-44549)                  (22) 出願日 平成24年2月29日 (2012.2.29)                  (65) 公開番号 特開2013-181789 (P2013-181789A)                  (43) 公開日 平成25年9月12日 (2013.9.12)                  審査請求日 平成26年11月17日 (2014.11.17)</p> <p>前置審査</p>	<p>(73) 特許権者 000000295                  沖電気工業株式会社                  東京都港区虎ノ門一丁目7番12号                  (74) 代理人 110001461                  特許業務法人きさ特許商標事務所                  (72) 発明者 佐藤 陵沢                  東京都港区虎ノ門一丁目7番12号 沖電                  気工業株式会社内                  審査官 吉田 久</p>
--	---

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 干渉型光ファイバセンサ

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

パルス光を出力する光源と、  
 特定の周波数の信号を発生する変調信号発生器と、  
 前記変調信号発生器が接続され、前記光源から出力された前記パルス光を前記特定の周波数だけシフトする光周波数シフタと、  
 前記光周波数シフタでシフトされた複数のパルス光を同じ光ファイバに入力する第1光カプラと、  
 測定信号を検出する複数のセンシングファイバと、  
 複数の前記センシングファイバの各々に接続され、接続された前記センシングファイバ  
 で検出された信号を含むビートを発生させる複数の第2光カプラと、  
 複数の前記センシングファイバから出力された信号から、前記測定信号を検知する復調器と、  
 を備え、  
 前記変調信号発生器は、  
 1つの前記センシングファイバで検出された信号が、周波数の異なる複数のビートにそれぞれ含まれるように、互いに異なる周波数を発生させ、  
 前記光周波数シフタは、  
 前記変調信号発生器から出力された前記互いに異なる周波数に基づいて前記パルス光を前記特定の周波数だけシフトするものであり、

10

20

前記第 2 光カプラは、  
周波数の異なる複数のビートを同時に発生させるものであり、  
前記センシングファイバは、  
前記第 1 光カプラと何れかの前記第 2 光カプラとを通過したパルス光の位相を、前記測定信号に基づいて変調して出力することで、前記測定信号を検出するものであることを特徴とする干渉型光ファイバセンサ。

【請求項 2】

前記復調器は、  
前記複数のビートに基づいて演算された複数の信号を合成することを特徴とする請求項 1 に記載の干渉型光ファイバセンサ。

10

【請求項 3】

前記復調器は、  
前記センシングファイバから出力された信号をサンプリングする参照信号発生器を有し、  
前記参照信号発生器は、  
複数の周波数のビートに対応し、サンプリング間隔の異なる信号から成る複数の参照信号を生成することを特徴とする請求項 1 又は請求項 2 に記載の干渉型光ファイバセンサ。

【請求項 4】

前記復調器で復調に使わないビートと側波帯の帯域に折り返しで発生したビートと側波帯が重なるようにしたことを特徴とする請求項 1 ~ 3 の何れか一項に記載の干渉型光ファイバセンサ。

20

【請求項 5】

複数の前記センシングファイバで検出された複数の信号が 1 つの周波数のビートに交番して含まれることを特徴とする請求項 1 ~ 3 の何れか一項に記載の干渉型光ファイバセンサ。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は干渉型光ファイバセンサに関し、例えば、復調する帯域の雑音を低減する干渉型光ファイバセンサに関する。

30

【背景技術】

【0002】

干渉型光ファイバセンサは、センシングファイバを光ファイバ干渉計のアームとして用いたものである。具体的には、干渉型光ファイバセンサは、検出する物理量を、センシングファイバの歪みに変える。センシングファイバが歪むにつれ、干渉光は変化する。そこで、干渉型光ファイバセンサは、センシングファイバの歪みに応じて干渉光が変化することを利用することにより、物理量を検出する。これにより、干渉型光ファイバセンサは、さまざまな物理量を検出することが可能である。

【0003】

40

例えば、後述する非特許文献 1 及び非特許文献 2 には、音響信号を検出するセンサが記載されている。また、後述する非特許文献 3 には、磁気信号を検出するセンサが記載されている。

【0004】

図 16 は、非特許文献 1 に示された方式（以下、従来技術 1 と称する）の説明図である。図 16 には、従来技術 1 の干渉型光ファイバセンサの構成と、そのパルス波形とが図示されている。まず、従来技術 1 の干渉型光ファイバセンサの構成について説明する。従来技術 1 の干渉型光ファイバセンサは、オシレータ 1、パルス光源 2、光カプラ 3、光周波数シフタ 4、遅延補償ファイバ 5、光カプラ 6、光アンプ 7、光カプラ 8、センシングファイバ 9、ミラー 10、ミラー 11、O/E (Opto/Electronics) 変換

50

器 1 2、及び復調器 1 3 等を備えている。復調器 1 3 は、A / D 変換器 2 1、参照信号発生器 2 2、参照信号発生器 2 3、乗算器 2 4、乗算器 2 5、LPF (Low Pass Filter) 2 6、LPF 2 7、逆正接演算器 2 8、及び不連続点補償演算器 2 9 等を備えている。

#### 【 0 0 0 5 】

次に、従来技術 1 の干渉型光ファイバセンサ内でのパルス光の伝搬経路について説明する。まず、伝搬経路中にある各経路点について説明する。経路点 A は、パルス光源 2 と、光カプラ 3 との間のパルス波形の伝搬経路内に位置する経路点を示すものである。経路点 B は、光カプラ 3 と、光周波数シフタ 4 との間のパルス波形の伝搬経路内に位置する経路点を示すものである。経路点 C は、光カプラ 3 と、遅延補償ファイバ 5 との間のパルス波形の伝搬経路内に位置する経路点を示すものである。経路点 D は、光アンプ 7 と、光カプラ 8 との間のパルス波形の伝搬経路内に位置する経路点を示すものである。経路点 E は、ミラー 1 0 に位置するパルス波形の経路点を示すものである。経路点 F は、ミラー 1 1 に位置するパルス波形の経路点を示すものである。経路点 G は、光カプラ 8 と、O / E 変換器 1 2 との間のパルス波形の伝搬経路内に位置する経路点を示すものである。

10

#### 【 0 0 0 6 】

パルス光源 2 から出力される光周波数  $f$  のパルス光は、光カプラ 3 で 2 つに分岐される。光カプラ 3 で 2 つに分岐されたパルス光のうち、一方のパルス光は、光周波数シフタ 4 と光カプラ 6 とを通過する。そして、光カプラ 6 を通過したパルス光は、光アンプ 7 で増幅される。このとき、パルス光は、経路 A B D を伝搬したことになる。ここで、光周波数シフタ 4 は、オシレータ 1 から周波数  $f$  の信号を受けたとき、光の周波数を  $f$  シフトするものである。そのため、光カプラ 6 には、光周波数  $f + f$  のパルス光が入力される。

20

#### 【 0 0 0 7 】

光カプラ 3 で 2 つに分岐されたパルス光のうち、もう一方のパルス光は、遅延補償ファイバ 5 を通過する。このため、遅延補償ファイバ 5 を通過したパルス光は、経路 A B D を通過したパルス光よりも遅れて光カプラ 6 を通過する。そして、光カプラ 6 を通過したパルス光は、光アンプ 7 で増幅される。このとき、パルス光は経路 A C D を伝搬したことになる。

#### 【 0 0 0 8 】

経路点 D を通過したパルス光は、光カプラ 8 で 2 つに分岐される。光カプラ 8 で分岐されたパルス光のうち、一方のパルス光は、ミラー 1 0 で反射される。ミラー 1 0 で反射されたパルス光は、再び光カプラ 8 を通過する。そして、光カプラ 8 を再度通過したパルス光は、O / E 変換器 1 2 に入力される。このとき、パルス光は経路 D E G を伝搬したことになる。

30

#### 【 0 0 0 9 】

光カプラ 8 で分岐されたパルス光のうち、もう一方のパルス光は、センシングファイバ 9 を通過する。次に、センシングファイバ 9 を通過したパルス光は、ミラー 1 1 で反射される。ミラー 1 1 で反射されたパルス光は、再び、センシングファイバ 9 と、光カプラ 8 とを通過する。そして、光カプラ 8 を再度通過したパルス光は、O / E 変換器 1 2 に入力される。このとき、パルス光は経路 D F G を伝搬したことになる。ここで、パルス光がセンシングファイバ 9 を往復するとき、信号  $(t)$  で光の位相が変調されることとなる。

40

#### 【 0 0 1 0 】

次に、従来技術 1 の干渉型光ファイバセンサ内を伝搬するパルス光のパルス波形について説明する。図 1 6 に示すパルス波形 A は、経路点 A の位置を通過するパルス波形を示すものである。パルス波形 A に示されている数字は、パルス光源 2 から出力される順番を示すものであり、例えば、1、2、3、・・・のように昇順に番号が付与されている。

#### 【 0 0 1 1 】

図 1 6 に示すパルス波形 A B D E G は、O / E 変換器 1 2 に入力されるパルス光のうち、経路 A B D E G を伝搬したパルス光の成分を図示したパルス波形を示すものである。パ

50

ルス波形 A B D E G に示されている各記号に隣接して付与されている数字は、O / E 変換器 1 2 に到達する順番を示すものであり、例えば、a 1、a 2、a 3、・・・のように昇順に記号に数字が付与されている。このように、記号と数字とを合わせたものを各々のパルス光に付与することとした。同様に、図 1 6 に示すパルス波形 A B D F G、パルス波形 A C D E G、及びパルス波形 A C D F G は、それぞれ経路 A B D F G、経路 A C D E G、及び経路 A C D F G を伝搬したパルス光の成分を図示したパルス波形を示すものである。また、パルス波形 A B D F G、パルス波形 A C D E G、及びパルス波形 A C D F G の各々のパルス光には、パルス波形 A B D E G と同様のものが付与されている。

【 0 0 1 2 】

ここで、センシングファイバ 9 の往復伝搬時間を伝搬遅延 とする。伝搬遅延 と、遅延補償ファイバの往復伝搬時間とを等しくすると、パルス波形 A B D F G の各パルス光の周期と、パルス波形 A C D E G の各パルス光の周期とが等しくなる。つまり、パルス光  $b_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots$ ) と、パルス光  $c_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots$ ) とが同一周期になるため、パルス光  $b_i$  と、パルス光  $c_i$  とが同じタイミングで重なることになる。これにより、干渉パルス光  $b_i + c_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots$ ) が、経路点 G で発生する。

【 0 0 1 3 】

また、光周波数シフタ 4 を通過したパルス光の周波数と、遅延補償ファイバ 5 を通過したパルス光の周波数とは、周波数  $f$  の差がある。このため、干渉パルス光  $b_i + c_i$  が、O / E 変換器 1 2 を出力したときには、中心周波数が周波数  $f$  である。このとき、センシングファイバ 9 で検出された信号 ( $t$ ) で位相変調されたビートが発生する。

【 0 0 1 4 】

復調器 1 3 は、O / E 変換器 1 2 から出力される干渉パルス光  $b_i + c_i$  にタイミングを合わせてサンプリングすることにより、式 ( 1 ) で表される出力を得る。次いで、復調器 1 3 は、センシングファイバ 9 で検出した信号 ( $t$ ) を復調する。図 1 6 に示す ( $t$ ) はサンプリングを意味する式 ( 2 ) で表される関数である。

【 0 0 1 5 】

【 数 1 】

$$I = I_{inc}(1 + V \cos(2\pi \Delta f t + \phi_s(t))) \quad (1)$$

【 0 0 1 6 】

【 数 2 】

$$\Delta(t) = \sum_{i=0}^{\infty} \delta[t - (3i+1)\tau] \quad (2)$$

【 0 0 1 7 】

ここで、式 ( 2 ) に示す はディラックの関数を意味するものである。よって、所定の周期間隔で、関数と、干渉パルス光  $b_i + c_i$  とを乗算することで、干渉パルス光  $b_i + c_i$  は、サンプリングされることになる。また、復調器 1 3 の L P F 2 6 及び L P F 2 7 の遮断周波数は、ビート周波数と同じ  $f$  にする。このようにすることで、折り返しが重ならない範囲で、最も広い信号帯域を確保している。

【 0 0 1 8 】

図 1 7 は、非特許文献 2 に示された時分割多重する構成を利用し、従来技術 1 の方法で復調するように構成した一例 (以下、従来技術 2 と称する) を示す図である。パルス光源 2 から光アンプ 7 までのパルス光の伝搬経路は同一である。また、その区間においては、オシレータ 1、パルス光源 2、光カプラ 3、光周波数シフタ 4、遅延補償ファイバ 5、光カプラ 6、及び光アンプ 7 は、従来技術 1 と同様に動作する。従来技術 1 との相違点は、光アンプ 7 以降の構成と動作である。

10

20

30

40

50

## 【 0 0 1 9 】

具体的には、光アンプ7を出力したパルス光は、光カプラ41で分岐する。光カプラ41で分岐した一方のパルス光は、光カプラ31を通過後、センシングファイバ71に送られる。光カプラ41で分岐したもう一方のパルス光は、遅延ファイバ81でタイミングをずらされた後、光カプラ42で分岐する。光カプラ42で分岐した一方のパルス光は、光カプラ32を通過後、センシングファイバ72に送られる。光カプラ42で分岐したもう一方のパルス光は、遅延ファイバ82でタイミングをずらされた後、光カプラ33を通過し、センシングファイバ73に送られる。その後、パルス光は、光カプラ52、光カプラ51で1本の光ファイバに結合される。これにより、信号1～3が時分割多重で伝送されることになる。

10

## 【 0 0 2 0 】

図17に示された復調器13は、O/E変換器12から出力されるパルス列から、信号 $s_1(t)$ 、信号 $s_2(t)$ 、及び信号 $s_3(t)$ を含むパルス光を、別々にサンプリングし、そのサンプリング結果に基づいて位相復調する。図17においては、位相復調のリファレンスとなる $\sin 2\pi f t$ または $\cos 2\pi f t$ の乗算と、式(3)～(5)で表されるサンプリングとを同時に行う一例が示されている。

## 【 0 0 2 1 】

## 【数3】

$$\Delta_1(t) = \sum_{i=0}^{\infty} \delta[t - (9i+1)\tau] \quad (3)$$

20

## 【 0 0 2 2 】

## 【数4】

$$\Delta_2(t) = \sum_{i=0}^{\infty} \delta[t - (9i+4)\tau] \quad (4)$$

30

## 【 0 0 2 3 】

## 【数5】

$$\Delta_3(t) = \sum_{i=0}^{\infty} \delta[t - (9i+7)\tau] \quad (5)$$

## 【 0 0 2 4 】

図17に示されるように、従来技術2は、従来技術1に示された乗算器24、乗算25、LPF26、LPF27、逆正接演算器28、及び不連続点補償演算器29と同様の機能を有するものを3組用いることにより、信号 $s_1(t)$ 、信号 $s_2(t)$ 、及び信号 $s_3(t)$ を復調するものである。具体的には、従来技術2は、乗算器101～106、LPF111～116、逆正接演算器121～123、及び不連続点補償演算器131を用いることにより、信号 $s_1(t)$ 、信号 $s_2(t)$ 、及び信号 $s_3(t)$ を復調する。

40

## 【 0 0 2 5 】

図18は、従来技術2の干渉型光ファイバセンサ内を伝搬するパルス光のパルス波形の一例を示す図である。センシングファイバ71、センシングファイバ72、及びセンシングファイバ73の往復伝搬時間がそれぞれ $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ であるとする。このとき、遅延補償ファイバ5、遅延補償ファイバ81、及び遅延補償ファイバ82の片道伝搬時間が $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ であるとする。

50

る。また、パルス光源 2 のパルス繰返し周期が 9 であるとする。このように各パラメータが仮定されると、経路点 G では、信号  $s_1(t)$ 、信号  $s_2(t)$ 、及び信号  $s_3(t)$  を含むパルス列が得られることとなる。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0026】

【非特許文献 1】G. A. Cranch et al., "Acoustic performance of a large-aperture, seabed, fiber-optic hydrophone array," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 115, No. 6, pp. 2848 - 2858 (2004)

10

【非特許文献 2】佐藤陵沢、他 3 名、「光ファイバハイドロホンの開発」、電子情報通信学会技術研究報告、平成 7 年 5 月、OPE95-2、p. 7-12

【非特許文献 3】Ryotaku SATO et al., "Design of Fiber-Optic Magnetometer Utilizing Magnetostriction," *Japanese Journal of Applied Physics*, pp. 817 - 820 (2007)

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0027】

20

図 19 は、従来技術 1、2 の A/D 変換器 21 で A/D 変換した後のパワースペクトルの一例を示す概念図である。図 19 に示されるパワースペクトルは、O/E 変換器 12 の出力結果が、A/D 変換器 21 で A/D 変換されたものである。O/E 変換器 12 は、受光したパルス光が分別可能となる通過帯域を有する必要がある。例えば、従来技術 1 の O/E 変換器 12 は、サンプリング周波数  $1/(3)$  が通過帯域上限より低くなる必要がある。また、従来技術 2 の O/E 変換器 12 は、サンプリング周波数  $1/(9)$  が通過帯域上限より低くなる必要がある。

【0028】

ここで、パルス光がサンプリングされると、サンプリングによる折り返し現象が生じることがある。このため、ビートと側波帯（上側波帯及び下側波帯）や光アンプ等で発生した雑音が、O/E 変換器 12 の通過帯域全体にわたって多数発生することとなる。このとき、折り返しで発生するビートと側波帯は、光ファイバコイルの周波数特性による制限で、復調する帯域までは影響しにくい。これに対して、光アンプ等で発生した雑音は、周波数帯域が広い。よって、O/E 変換器 12 の通過帯域全体にわたって、折り返しが多数重なることとなる。これにより、復調する帯域の雑音を増加させていた。

30

【0029】

また、従来技術 2 に示すように時分割多重した場合、多重化する信号が多くなるにつれ、サンプリング周波数を低くすることになる。そのため、サンプリング周波数が低くなった分だけ折り返し雑音が増加してしまう。このような場合には、使用上許容できる雑音レベルを超えないように多重化の数が制限を受けており、復調する帯域の雑音も増加させていた。

40

【0030】

以上のことから、従来技術 1、2 では、折り返し雑音を低減することにより、復調する帯域の雑音を低減することができないという問題点があった。

【0031】

本発明は、上記のような問題点を解決するためになされたもので、折り返し雑音を低減することにより、復調する帯域の雑音を低減することができる干渉型光ファイバセンサを提供するものである。

【課題を解決するための手段】

【0032】

50

本発明の干渉型光ファイバセンサは、パルス光を出力する光源と、特定の周波数の信号を発生する変調信号発生器と、前記変調信号発生器が接続され、前記光源から出力された前記パルス光を前記特定の周波数だけシフトする光周波数シフタと、前記光周波数シフタでシフトされた複数のパルス光を同じ光ファイバに入力する第1光カプラと、測定信号を検出する複数のセンシングファイバと、複数の前記センシングファイバの各々に接続され、接続された前記センシングファイバで検出された信号を含むビートを発生させる複数の第2光カプラと、複数の前記センシングファイバから出力された信号から、前記測定信号を検出する復調器と、を備え、前記変調信号発生器は、1つの前記センシングファイバで検出された信号が、周波数の異なる複数のビートにそれぞれ含まれるように、互いに異なる周波数を発生させ、前記光周波数シフタは、前記変調信号発生器から出力された前記互いに異なる周波数に基づいて前記パルス光を前記特定の周波数だけシフトするものであり、前記第2光カプラは、周波数の異なる複数のビートを同時に発生させるものであり、前記センシングファイバは、前記第1光カプラと何れかの前記第2光カプラとを通過したパルス光の位相を、前記測定信号に基づいて変調して出力することで、前記測定信号を検出するものである。

10

【発明の効果】

【0033】

本発明は、折り返し雑音を低減することにより、復調する帯域の雑音を低減することができるという効果を有する。

【図面の簡単な説明】

20

【0034】

【図1】本発明の実施の形態1における干渉型光ファイバセンサの構成の一例を示すブロック図である。

【図2】本発明の実施の形態1におけるパルス光の光周波数とそのタイミングの一例について説明する図である。

【図3】本発明の実施の形態1における干渉型光ファイバセンサの動作を説明するパルス波形を示す図である。

【図4】本発明の実施の形態1における  $I_A$ 、 $I_B$ 、 $I_C$  を A/D 変換した後のパワースペクトルの概念図である。

【図5】本発明の実施の形態2における干渉型光ファイバセンサの構成の一例を示すブロック図である。

30

【図6】本発明の実施の形態3における干渉型光ファイバセンサの構成の一例を示すブロック図である。

【図7】本発明の実施の形態3におけるパルス光の光周波数とそのタイミングの一例について説明する図である。

【図8】本発明の実施の形態3における干渉型光ファイバセンサの動作を説明するパルス波形を示す図である。

【図9】本発明の実施の形態3における  $I_A$ 、 $I_B$ 、 $I_C$  を A/D 変換した後のパワースペクトルの概念図である。

【図10】本発明の実施の形態4における干渉型光ファイバセンサの構成の一例を示すブロック図である。

40

【図11】本発明の実施の形態4におけるパルス光の光周波数とそのタイミングの一例について説明する図である。

【図12】本発明の実施の形態4における干渉型光ファイバセンサの動作を説明するパルス波形を示す図である。

【図13】本発明の実施の形態5における干渉型光ファイバセンサの構成の一例を示すブロック図である。

【図14】本発明の実施の形態5におけるパルス光の光周波数とそのタイミングの一例について説明する図である。

【図15】本発明の実施の形態5における干渉型光ファイバセンサの動作を説明するパル

50

ス波形を示す図である。

【図16】非特許文献1に示された方式(以下、従来技術1と称する)の説明図である。

【図17】非特許文献2に示された方式(以下、従来技術2と称する)を示す図である。

【図18】従来技術2の干渉型光ファイバセンサ内を伝搬するパルス光のパルス波形の一例を示す図である。

【図19】従来技術1、2のA/D変換器21でA/D変換した後のパワースペクトルの一例を示す概念図である。

【発明を実施するための形態】

【0035】

以下、本発明の実施の形態について、図面を用いて詳細に説明する。

10

【0036】

実施の形態1.

(構成の説明)

図1は、本発明の実施の形態1における干渉型光ファイバセンサの構成の一例を示すブロック図である。まず、干渉型光ファイバセンサの構成について説明する。干渉型光ファイバセンサは、パルス光源2、光カプラ3、変調信号発生器201、変調信号発生器202、光周波数シフタ211、光周波数シフタ212、遅延補償ファイバ5、光カプラ6、光アンプ7、光カプラ8、センシングファイバ9、ミラー10、ミラー11、O/E(Opto/Electronics)変換器12、及び復調器13等を備えている。復調器13は、A/D変換器21、参照信号発生器91、参照信号発生器92、参照信号発生器93、参照信号発生器94、参照信号発生器95、参照信号発生器96、乗算器101、乗算器102、乗算器103、乗算器104、乗算器105、乗算器106、LPF(Low Pass Filter)111、LPF112、LPF113、LPF114、LPF115、LPF116、逆正接演算器121、逆正接演算器122、逆正接演算器123、不連続点補償演算器131、不連続点補償演算器132、不連続点補償演算器133及び加算器221を備えている。

20

【0037】

パルス光源2は、一定波長のパルス光を生成し、光カプラ3に入射させるものである。光カプラ3、6、8は、入射したパルス光を分岐したり、一つに重畳したりするものである。変調信号発生器201、202は、特定の周波数の信号を発生させるものである。光周波数シフタ211、212は、変調信号発生器201、202から入力された特定の周波数の信号に基づいて、周波数をシフトするものである。遅延補償ファイバ5は、遅延時間差を補償するものである。

30

【0038】

光アンプ7は、入力されたパルス光を増幅し、光カプラ8に入力するものである。センシングファイバ9は、加わる物理量により歪みが生じるものであり、これによりセンシングファイバを通過する光が位相変調される。このため、センシングファイバ9は、測定する物理量に応じて、その物理量の変動を検知することができる。ミラー10、11は、入射光を反射するものである。O/E変換器12は、パルス光の信号を光電変換することで、電気信号を生成するものである。復調器13は、入力される電気信号に基づいて復調を行うものであり、位相(t)を算出するものである。すなわち、復調器13は、センシングファイバ9からの干渉光に基づいて、物理量に対応する測定信号を検知するものである。

40

【0039】

A/D変換器21は、アナログ信号をデジタル信号に変換するものである。参照信号発生器91~96は、関数に基づいて、A/D変換されたデジタル信号を所定の間隔でサンプリングするタイミング信号と位相復調のための参照信号を発生するものである。乗算器101~106は、A/D変換器21の出力信号と、参照信号発生器91~96の出力信号とを乗算することにより、必要な信号をサンプリングすると同時に位相復調のための参照信号を乗算するものである。LPF111~116は、乗算器101~106の出力

50



信号の高周波成分をカットするものである。逆正接演算器 1 2 1 ~ 1 2 3 は、位相を求めるものである。不連続点補償演算器 1 3 1 ~ 1 3 3 は、逆正接演算で発生する不連続点を補間するものである。加算器 2 2 1 は、不連続点補償演算器 1 3 1 ~ 1 3 3 を加算することにより、 $[ A(t) + B(t) + C(t) ] (t)$  を出力するものである。

#### 【 0 0 4 0 】

次に、干渉型光ファイバセンサ内でのパルス光の伝搬経路について説明する。まず、伝搬経路中にある各経路点について説明する。経路点 A は、パルス光源 2 と、光カプラ 3 との間のパルス波形の伝搬経路内に位置する経路点を示すものである。経路点 B は、光カプラ 6 と、光周波数シフタ 2 1 1 との間のパルス波形の伝搬経路内に位置する経路点を示すものである。経路点 C は、光カプラ 6 と、遅延補償ファイバ 5 との間のパルス波形の伝搬経路内に位置する経路点を示すものである。経路点 D は、光アンプ 7 と、光カプラ 8 との間のパルス波形の伝搬経路内に位置する経路点を示すものである。経路点 E は、ミラー 1 0 に位置するパルス波形の経路点を示すものである。経路点 F は、ミラー 1 1 に位置するパルス波形の経路点を示すものである。経路点 G は、光カプラ 8 と、O / E 変換器 1 2 との間のパルス波形の伝搬経路内に位置する経路点を示すものである。

10

#### 【 0 0 4 1 】

パルス光源 2 から出力される光周波数 のパルス光は、光カプラ 3 で 2 つに分岐される。光カプラ 3 で 2 つに分岐されたパルス光のうち、一方のパルス光は、光周波数シフタ 2 1 1 と光カプラ 6 とを通過する。そして、光カプラ 6 を通過したパルス光は、光アンプ 7 で増幅される。このとき、パルス光は、経路 A B D を伝搬したことになる。ここで、光周波数シフタ 2 1 1 は、変調信号発生器 2 0 1 から周波数  $f_f(t)$  の信号を受けたとき、光の周波数を  $f_f(t)$  シフトするものである。そのため、光カプラ 6 には、光周波数  $+ f_f(t)$  のパルス光が入力される。

20

#### 【 0 0 4 2 】

光カプラ 3 で 2 つに分岐されたパルス光のうち、もう一方のパルス光は、光周波数シフタ 2 1 2 と遅延補償ファイバ 5 とを順に通過する。そして、光カプラ 6 を通過したパルス光は、光アンプ 7 で増幅される。このとき、パルス光は、経路 A C D を伝搬したことになる。ここで、光周波数シフタ 2 1 2 は、変調信号発生器 2 0 2 から周波数  $f_b(t)$  の信号を受けたとき、光の周波数を  $f_b(t)$  シフトするものである。そのため、光カプラ 6 には、光周波数  $+ f_b(t)$  のパルス光が入力される。

30

#### 【 0 0 4 3 】

経路点 D を通過したパルス光は、光カプラ 8 で 2 つに分岐される。光カプラ 8 で分岐されたパルス光のうち、一方のパルス光は、ミラー 1 0 で反射される。ミラー 1 0 で反射されたパルス光は、再び光カプラ 8 を通過する。そして、光カプラ 8 を再度通過したパルス光は、O / E 変換器 1 2 に入力される。このとき、パルス光は経路 D E G を伝搬したことになる。

#### 【 0 0 4 4 】

光カプラ 8 で分岐されたパルス光のうち、もう一方のパルス光は、センシングファイバ 9 を通過する。次に、センシングファイバ 9 を通過したパルス光は、ミラー 1 1 で反射される。ミラー 1 1 で反射されたパルス光は、再び、センシングファイバ 9 と、光カプラ 8 とを通過する。そして、光カプラ 8 を再度通過したパルス光は、O / E 変換器 1 2 に入力される。このとき、パルス光は経路 D F G を伝搬したことになる。ここで、パルス光がセンシングファイバ 9 を往復するとき、信号  $(t)$  で光の位相が変調されることとなる。なお、図 1 においては、信号  $(t)$  の  $(t)$  を省略して図示することとした。

40

#### 【 0 0 4 5 】

次に、干渉型光ファイバセンサの要部構成について図 1 を用いて説明する。図 1 に示すように、本発明の実施の形態 1 における干渉型光ファイバセンサは、光カプラ 3 で分岐したパルス光の両方が、周波数シフト可能な構成となっている。具体的には、光カプラ 3 で分岐したパルス光のうち、一方のパルス光は、光周波数シフタ 2 1 1 に入力される。光カプラ 3 で分岐したパルス光のうち、もう一方のパルス光は、光周波数シフタ 2 1 2 に入力

50

される。

【0046】

光周波数シフタ211には、変調信号発生器201が接続されている。光周波数シフタ211は、入力されたパルス光を所定の周波数だけシフトするものである。そのシフトする周波数は、変調信号発生器201から光周波数シフタ211に入力される。例えば、変調信号発生器201から光周波数シフタ211に周波数 $f_f(t)$ が入力されたと想定する。このとき、パルス光源2からは、光カプラ3を介して光周波数シフタ211に光周波数のパルス光が入力されている。よって、光周波数シフタ211に入力されたパルス光は、その周波数が周波数 $+f_f(t)$ だけシフトされて出力されることになる。

【0047】

一方、光周波数212には、変調信号発生器202が接続されている。光周波数シフタ212は、入力されたパルス光を所定の周波数だけシフトするものである。そのシフトする周波数は、変調信号発生器202から光周波数シフタ212に入力される。例えば、変調信号発生器202から光周波数シフタ212に周波数 $f_b(t)$ が入力されたと想定する。このとき、パルス光源2からは、光カプラ3を介して光周波数シフタ212に光周波数のパルス光が入力されている。よって、光周波数シフタ212に入力されたパルス光は、その周波数が周波数 $+f_b(t)$ だけシフトされて出力されることになる。

【0048】

また、1つのセンシングファイバ9に対して、参照信号発生器91~96、乗算器101~106、LPF111~116、逆正接演算器121~123、及び不連続点補償演算器131~133が用いられている。そして、不連続点補償演算器131~133の出力は、加算器221で加算される。

【0049】

すなわち、参照信号発生器91、92、乗算器101、102、LPF111、112、逆正接演算器121、及び不連続点補償演算器131が一つの組となる。また、参照信号発生器93、94、乗算器103、104、LPF113、114、逆正接演算器122、及び不連続点補償演算器132が一つの組となる。また、参照信号発生器95、96、乗算器105、106、LPF115、116、逆正接演算器123、及び不連続点補償演算器133が一つの組となる。よって、1つのセンシングファイバ9でセンシングされた信号は、これらの組でそれぞれ演算されることで、信号がセンシングされることになる。

【0050】

次に、干渉型光ファイバセンサ内を伝搬するパルス光のパルス波形と、光周波数シフタ211、212で周波数シフトされるパルス光の周波数との相関関係について説明する。図2は、本発明の実施の形態1におけるパルス光の光周波数とそのタイミングの一例について説明する図である。パルス光源2の出力波形であるパルス光と、光周波数シフタ211、212の略矩形波とは、同期が取れている。すなわち、光周波数シフタ211、212が出力するパルス光の周波数は、パルス光源2のパルス光の出力タイミングに合わせて、ステップ状にその大きさを変化させる。

【0051】

図2に示すように、横軸は時間であり、縦軸は、光周波数である。そして、3ごとにステップ状の周波数の変動は元に戻る。つまり、光周波数シフタ211、212の略矩形波の周期は3であり、周波数は $1/(3)$ である。また、パルス光源2から出力されるパルス光は、光周波数シフタ211、212に到達する順番に数字が付与されている。例えば、1、2、3、4、5、6、7、8、9、・・・のように昇順に番号が付与されている。

【0052】

ここで、 $f_{f1} - f_{b1}$ の差を1とする。すなわち、 $(+f_{b1}) - (+f_{f1})$ の差を1と想定する。次に、 $f_{f2} - f_{b2}$ の差を3とする。すなわち、 $(+f_{f2}) - (+f_{b2})$ の差を3とする。また、 $f_{f3} - f_{b3}$ の差を5とする。すなわち、 $(+f_{f3}) - (+f_{b3})$

10

20

30

40

50

$b_3$ ) の差を 5 とする。また、 $f_{b3} - f_{f2}$  の差及び  $f_{b2} - f_{f1}$  の差がそれぞれ 7 とする。すなわち、 $(f_{b3} + f_{f3}) - (f_{b2} + f_{f2})$  の差を 7 とし、 $(f_{b2} + f_{f2}) - (f_{b1} + f_{f1})$  の差を 7 とする。また、 $f_{f1} - f_{b1}$  は周波数  $1 / (3 \tau)$  の  $1 / 30$  とする。すなわち、 $(f_{f1} + f_{f1}) - (f_{b1} + f_{b1})$  の差を  $1 / (3 \tau)$  の  $1 / 30$  とする。このように、1、3、5、7 ととびとびの値で出力周波数の大きさの割合を設定するのは、折り返し雑音を低減させるためである。すなわち、エイリアシングを発生させないようにするために、とびとびの値が設定されるのである。なお、1、3、5、7 といった数字は、一例を示すものであり、これに限定されるものではない。

【0053】

なお、図 2 において、周波数のパラメータ  $t$  の記載については、省略することとする。

10

【0054】

次に、O/E 変換器 12 の帯域幅は、受光したパルス列の分別が可能な範囲にし、他のパルスからの漏れ込みが問題とならない範囲にし、帯域幅の狭いものを用いることとする。ここで、復調器 13 の参照信号発生器 91、92 の  $\Delta_A(t)$ 、復調器 13 の参照信号発生器 93、94 の  $\Delta_B(t)$ 、及び復調器 13 の参照信号発生器 95、96 の  $\Delta_C(t)$  は、次式 (6) ~ (8) で表される。

【0055】

【数 6】

$$\Delta_A(t) = \sum_{i=0}^{\infty} \delta[t - (3i+4)\tau] \quad (6)$$

20

【0056】

【数 7】

$$\Delta_B(t) = \sum_{i=0}^{\infty} \delta[t - (3i+5)\tau] \quad (7)$$

30

【0057】

【数 8】

$$\Delta_C(t) = \sum_{i=0}^{\infty} \delta[t - (3i+6)\tau] \quad (8)$$

【0058】

(動作の説明)

図 3 は、本発明の実施の形態 1 における干渉型光ファイバセンサの動作を説明するパルス波形を示す図である。図 3 に示すように、経路点 A を通過するパルス光については、パルス光源 2 から出力される順に番号が、1、2、3、4、・・・と昇順に付与されている。また、各パルス光の光周波数についても、 $f_{f1}$ 、 $f_{f2}$ 、 $f_{f3}$ 、・・・というように付与されている。

40

【0059】

また、経路点 A B を通過するパルス光については、経路点 A B を通過するパルス光に順に番号が、1、2、3、4、・・・と昇順に付与されている。また、経路点 A B を通過するパルス光の光周波数についても、 $f_{f1}$ 、 $f_{f2}$ 、 $f_{f3}$ 、・・・というように付与されている。

50

## 【 0 0 6 0 】

また、経路点 A C を通過するパルス光については、経路点 A C を通過するパルス光に順に番号が、1、2、3、4、・・・と昇順に付与されている。また、経路点 A C を通過するパルス光の光周波数についても、 $+f_{b1}$ 、 $+f_{b2}$ 、 $+f_{b3}$ 、・・・というように付与されている。なお、パルス光は、経路点 A C には、経路点 A B と比較して、 $t$  だけ遅れて入力される。これは、経路点 A C では、パルス光は、遅延補償ファイバ 5 を通過するためである。

## 【 0 0 6 1 】

また、経路点 A B D E G を通過するパルス光については、経路点 A B D E G を通過するパルス光に順に番号が、1、2、3、4、・・・と昇順に付与されている。また、経路点 A B D E G を通過するパルス光の周波数についても、 $+f_{f1}$ 、 $+f_{f2}$ 、 $+f_{f3}$ 、・・・というように付与されている。

10

## 【 0 0 6 2 】

また、経路点 A B D F G を通過するパルス光については、経路点 A B D F G を通過するパルス光に順に番号が、1、2、3、4、・・・と昇順に付与されている。また、経路点 A B D F G を通過するパルス光の周波数についても、 $+f_{f1}$ 、 $+f_{f2}$ 、 $+f_{f3}$ 、・・・というように付与されている。なお、パルス光は、経路点 A B D F G には、経路点 A B D E G と比較して、 $t$  だけ遅れて入力される。これは、経路点 A B D F G では、パルス光が、センシングファイバ 9 を通過するためである。

## 【 0 0 6 3 】

また、経路点 A C D E G を通過するパルス光については、経路点 A C D E G を通過するパルス光に順に番号が、1、2、3、4、・・・と昇順に付与されている。また、経路点 A C D E G を通過するパルス光の周波数についても、 $+f_{b1}$ 、 $+f_{b2}$ 、 $+f_{b3}$ 、・・・というように付与されている。なお、パルス光は、経路点 A C D E G には、経路点 A B D E G と比較して、 $t$  だけ遅れて入力される。これは、経路点 A C D E G では、パルス光が、遅延補償ファイバ 5 を通過するためである。

20

## 【 0 0 6 4 】

また、経路点 A C D F G を通過するパルス光については、経路点 A C D F G を通過するパルス光に順に番号が、1、2、3、4、・・・と昇順に付与されている。また、経路点 A C D F G を通過するパルス光の周波数についても、 $+f_{b1}$ 、 $+f_{b2}$ 、 $+f_{b3}$ 、・・・というように付与されている。なお、パルス光は、経路点 A C D F G には、経路点 A B D F G、経路点 A C D E G と比較して、 $2t$  だけ遅れて入力される。これは、経路点 A C D F G では、パルス光が、遅延補償ファイバ 5 とセンシングファイバ 9 とを通過するためである。

30

## 【 0 0 6 5 】

また、ここでは、遅延補償ファイバ 5 による遅延時間と、センシングファイバ 9 による遅延時間とは、同じであるとする。例えば、遅延時間は  $t$  である。これにより、 $+f_{f1}$ 、 $+f_{f2}$ 、 $+f_{f3}$ 、・・・と、 $+f_{b1}$ 、 $+f_{b2}$ 、 $+f_{b3}$ 、・・・とは同期することになる。よって、正確に  $(+f_{f1}) - (+f_{b1})$ 、 $(+f_{f2}) - (+f_{b2})$ 、 $(+f_{f3}) - (+f_{b3})$  等を求めることができる。よって、経路点 G では、始動直後の 4 つのパルス光を除くと、パルス光は、 $I_A$ 、 $I_B$ 、 $I_C$  の 3 種類となり、 $I_A$ 、 $I_B$ 、 $I_C$ 、 $I_A$ 、 $I_B$ 、・・・と続いていくことになる。

40

## 【 0 0 6 6 】

図 4 は、本発明の実施の形態 1 における  $I_A$ 、 $I_B$ 、 $I_C$  を A / D 変換した後のパワースペクトルの概念図である。 $I_A$  の場合、センシングファイバ 9 で検出した信号を含むビートと側波帯の中心周波数は、 $f_{f1} - f_{b1}$  である。すなわち、 $I_A$  では、中心周波数  $f_{f1} - f_{b1}$  のビートに信号  $(t)$  が変調されている。また、 $I_B$  の場合、センシングファイバ 9 で検出した信号を含むビートと側波帯の中心周波数は、 $f_{f2} - f_{b2}$  である。すなわち、 $I_B$  では、中心周波数  $f_{f2} - f_{b2}$  のビートに信号  $(t)$  が変調されている。また、 $I_C$  の場合、センシングファイバ 9 で検出した信号を含むビートと側波帯の中心周波数は、 $f_{f3}$

50

-  $f_{b3}$ である。すなわち、 $I_C$ では、中心周波数  $f_{f3} - f_{b3}$ のビートに信号 (t) が変調されている。復調器 13 は、 $I_A$ 、 $I_B$ 、 $I_C$ のそれぞれから信号 (t) を復調し、加算器 221 で加算後に出力する。

【0067】

(効果の説明)

周波数が異なる複数のビートを発生させ、サンプリングの数を増やして合成することにより、折り返し雑音を低減することができる。これは、合成する信号には相関があり、雑音は無相関であることから得られる効果である。具体的には、相関がある合成する信号同士は、信号が強め合う度合いが大きい。一方、無相関である雑音同士は、信号が強め合う度合いが小さい。よって、合成する信号と、雑音とは、相関関係の有無により、相対的に大きな差が生じることとなる。つまり、雑音が低減されることになる。

10

【0068】

出力波形では、従来技術 1 と同じ帯域幅のフィルタに通すことにより雑音低減効果を確認することができる。さらに、サンプリングを細かくしたことにより、例えば、信号のタイミングを精密に測る必要がある用途では、従来よりも細かく測ることができる。

【0069】

本実施の形態 1 では、経路が異なる多くのパルス光が干渉する。しかし、図 4 に示されるように、 $f_{f1} - f_{b1}$  は  $I_A$  でのみ発生する。 $f_{f2} - f_{b2}$  は  $I_B$  でのみ発生する。 $f_{f3} - f_{b3}$  は  $I_C$  でのみ発生する。よって、O/E 変換器の帯域制限で他のパルス光の成分が、復調するパルス光に多少漏れ込んだとしても、復調出力への影響を少なくすることができる。

20

【0070】

発生するビートを全て復元するには、標本化定理により、 $1 / (3 \times 2 \times 24 (f_{f1} - f_{b1}))$  にすることになる。本実施の形態 1 では、図 4 に示されるように、復調する 3 つの周波数が、低い側から順に 3 つとなる。また、折り返しで発生したビートの最も低い周波数は、復調する帯域に重ならない限界の  $f_{f1} - f_{b1}$  の 7 倍になる。つまり、折り返しが発生したとき、復調に使う帯域には折り返しで発生したビートと側波帯が入らないように、復調に使わないビートと側波帯の帯域には折り返しで発生したビートと側波帯が重なるようにする。これにより、サンプリング周波数は低くなり、その分、O/E 変換器の帯域幅は狭くなる。帯域幅が狭くなれば、折り返しが多数重なることにはならないため、折り返し雑音を抑制することができる。

30

【0071】

実施の形態 2 .

図 5 は、本発明の実施の形態 2 における干渉型光ファイバセンサの構成の一例を示すブロック図である。

なお、本実施の形態 2 において、特に記述しない項目については本発明の実施の形態 1 と同様とし、同一の機能や構成については同一の符号を用いて述べることとする。

【0072】

(構成の説明)

本実施の形態 1 との相違点は、参照信号発生器 97、98 の出力が異なること、乗算器 101、102、LPF 111、112、逆正接演算器 121、及び不連続点補償演算器 131 の処理器構成を 1 組しか使わないこと、加算器 221 を使わないことである。本発明の実施の形態 2 の参照信号発生器 97 の出力は、本発明の実施の形態 1 の参照信号発生器 91、参照信号発生器 93、及び参照信号発生器 95 の各出力を加算した波形としている。また、本発明の実施の形態 2 の参照信号発生器 98 の出力は、本発明の実施の形態 1 の参照信号発生器 92、参照信号発生器 94、及び参照信号発生器 96 の各出力を加算した波形としている。そのために、加算器 221 は不要なのである。

40

【0073】

(動作の説明)

パルス光源 2 の出力から復調器 13 の A/D 変換器の出力までは、本発明の実施の形態

50

1と同様の動作をする。これに対して、参照信号発生器97及び参照信号発生器98から出力される波形は、本発明の実施の形態1とは異なる出力となる。具体的には、参照信号発生器97から出力される波形は、 $A(t) \sin 2(f_{1f} - f_{1b})t$ 、 $B(t) \sin 2(f_{2f} - f_{2b})t$ 、及び $C(t) \sin 2(f_{3f} - f_{3b})t$ の3つの波形を重ね合わせたものとなるため、正弦波ではなく不連続な波形となる。また、参照信号発生器98から出力される波形は、 $A(t) \cos 2(f_{1f} - f_{1b})t$ 、 $B(t) \cos 2(f_{2f} - f_{2b})t$ 、及び $C(t) \cos 2(f_{3f} - f_{3b})t$ の3つの波形を重ね合わせたものとなるため、正弦波ではなく不連続な波形となる。

#### 【0074】

ここで、式(6)~(8)によると、 $A(t)$ と $B(t)$ との差は、 $A(t) - B(t)$ であり、 $B(t)$ と $C(t)$ との差は、 $B(t) - C(t)$ であり、 $C(t)$ と $A(t)$ との差は、 $C(t) - A(t)$ である。よって、 $A(t) \sin 2(f_{1f} - f_{1b})t$ 、 $B(t) \sin 2(f_{2f} - f_{2b})t$ 、及び $C(t) \sin 2(f_{3f} - f_{3b})t$ の3つの波形を重ね合わせることで、周期が3から1になる。同様に、 $A(t) \cos 2(f_{1f} - f_{1b})t$ 、 $B(t) \cos 2(f_{2f} - f_{2b})t$ 、及び $C(t) \cos 2(f_{3f} - f_{3b})t$ の3つの波形を重ね合わせることで、周期が3から1になる。従って、A/D変換器21の出力と、参照信号発生器97、98との出力を乗算し、LPF111、112に通した後は、従来技術1と比較して、3倍の周波数でサンプリングした波形が形成される。次いで、逆正接演算器121を経て、不連続点補償演算器131で出力される波形は、本発明の実施の形態1の加算器221で出力される波形と同じ波形が得られることになる。

#### 【0075】

(効果の説明)

本実施の形態1の復調器15より簡素な機能構成の復調器16でありつつも、本実施の形態1と同様の効果が得られる。つまり、 $A(t) \sin 2(f_{1f} - f_{1b})t$ 、 $B(t) \sin 2(f_{2f} - f_{2b})t$ 、及び $C(t) \sin 2(f_{3f} - f_{3b})t$ の3つの波形を重ね合わせた波形を出力する参照信号発生器97と、 $A(t) \cos 2(f_{1f} - f_{1b})t$ 、 $B(t) \cos 2(f_{2f} - f_{2b})t$ 、及び $C(t) \cos 2(f_{3f} - f_{3b})t$ の3つの波形を重ね合わせた波形を出力する参照信号発生器98とを用いることにより、復調器16の他の機能を簡素化することができる。これにより、低コストでありつつも、周波数が異なる複数のビートを発生させ、サンプリングの数を増やして合成することにより、折り返し雑音を低減することができる。

#### 【0076】

実施の形態3

図6は、本発明の実施の形態3における干渉型光ファイバセンサの構成の一例を示すブロック図である。

なお、本実施の形態3において、特に記述しない項目については実施の形態1、2と同様とし、同一の機能や構成については同一の符号を用いて述べることとする。

#### 【0077】

(構成の説明)

本実施の形態1、2との相違点は、変調信号発生器201、202の出力周波数の大きさの割合が異なること、参照信号発生器231、232の出力波形が異なることである。図7は、本発明の実施の形態3におけるパルス光の光周波数とそのタイミングの一例について説明する図である。図7に示すように、パルス光源2の出力波形であるパルス光と、光周波数シフタ211、212の略矩形波とは、同期が取れている。すなわち、光周波数シフタ211、212が出力するパルス光の周波数は、パルス光源2のパルス光の出力タイミングに合わせて、ステップ状にその大きさを変化させる。

#### 【0078】

図7に示すように、横軸は時間であり、縦軸は、光周波数である。そして、2ごとにステップ状の周波数の変動は元に戻る。つまり、光周波数シフタ211、212の略矩形波の周期は2であり、周波数は $1/(2)$ である。また、パルス光源2から出力され

10

20

30

40

50

るパルス光は、光周波数シフト 2 1 1、2 1 2 に到達する順番に数字が付与されている。例えば、1、2、3、4、5、6、7、8、9、・・・のように昇順に番号が付与されている。

【0079】

ここで、 $f_{f1} - f_{b1}$ の差を1とする。すなわち、 $(f_{f1} + f_{b1}) - (f_{f1} + f_{b1})$ の差を1と想定する。次に、 $f_{f2} - f_{b2}$ の差を3とする。すなわち、 $(f_{f2} + f_{b2}) - (f_{f2} + f_{b2})$ の差を3とする。また、 $f_{b2} - f_{f1}$ の差を5とする。すなわち、 $(f_{b2} + f_{f1}) - (f_{b2} + f_{f1})$ の差を5とする。また、 $f_{f1} - f_{b1}$ は周波数  $1 / (3 \tau)$  の  $1 / 14$  とする。すなわち、 $(f_{f1} + f_{b1}) - (f_{f1} + f_{b1})$ の差を  $1 / (3 \tau)$  の  $1 / 14$  とする。このように、1、3、5 ととびとびの値で出力周波数の大きさの割合を設定するのは、折り返し雑音を低減させるためである。すなわち、エイリアシングを発生させないようにするために、とびとびの値が設定されるのである。なお、1、3、5 といった数字は、一例を示すものであり、これに限定されるものではない。

10

【0080】

換言すれば、各周波数の差が、1、3、及び5の割合になるようにする。なお、図7において、周波数のパラメータ  $t$  の記載については、省略することとする。

【0081】

ここで、復調器 1 3 の参照信号発生器 2 3 1、2 3 2 の  $A(t)$  及び  $B(t)$  は、次式 (9) 及び (10) で表される。

【0082】

【数9】

20

$$\Delta_A(t) = \sum_{i=0}^{\infty} \delta[t - (2i+3)\tau] \quad (9)$$

【0083】

【数10】

30

$$\Delta_B(t) = \sum_{i=0}^{\infty} \delta[t - (2i+4)\tau] \quad (10)$$

【0084】

式 (9)、(10) に示されるように周期は  $2\tau$  となっている。すなわち、サンプリング間隔が、周期  $3\tau$  のときに比べて細かくなっている。

【0085】

(動作の説明)

図8は、本実施の形態3における干渉型光ファイバセンサの動作を説明するパルス波形を示す図である。図8に示すように、経路点Aを通過するパルス光については、パルス光源2から出力される順に番号が、1、2、3、4、・・・と昇順に付与されている。また、各パルス光の光周波数についても、 $f_{f1}$ 、 $f_{f2}$ 、 $f_{f3}$ 、 $f_{f4}$ 、・・・というように付与されている。

40

【0086】

また、経路点ABを通過するパルス光については、経路点ABを通過するパルス光に順に番号が、1、2、3、4、・・・と昇順に付与されている。また、経路点ABを通過するパルス光の光周波数についても、 $f_{f1}$ 、 $f_{f2}$ 、 $f_{f3}$ 、 $f_{f4}$ 、・・・というように付与されている。

【0087】

また、経路点ACを通過するパルス光については、経路点ACを通過するパルス光に順

50

に番号が、1、2、3、4、・・・と昇順に付与されている。また、経路点ACを通過するパルス光の光周波数についても、 $f_{b1}$ 、 $f_{b2}$ 、・・・というように付与されている。なお、パルス光は、経路点ACには、経路点ABと比較して、 $t$ だけ遅れて入力される。これは、経路点ACでは、パルス光が、遅延補償ファイバ5を通過するためである。

【0088】

また、経路点ABDEGを通過するパルス光については、経路点ABDEGを通過するパルス光に順に番号が、1、2、3、4、・・・と昇順に付与されている。また、経路点ABDEGを通過するパルス光の周波数についても、 $f_{f1}$ 、 $f_{f2}$ 、・・・というように付与されている。

10

【0089】

また、経路点ABDFGを通過するパルス光については、経路点ABDFGを通過するパルス光に順に番号が、1、2、3、4、・・・と昇順に付与されている。また、経路点ABDFGを通過するパルス光の周波数についても、 $f_{f1}$ 、 $f_{f2}$ 、・・・というように付与されている。なお、パルス光は、経路点ABDFGには、経路点ABDEGと比較して、 $t$ だけ遅れて入力される。これは、経路点ABDFGでは、パルス光が、センシングファイバ9を通過するためである。

【0090】

また、経路点ACDEGを通過するパルス光については、経路点ACDEGを通過するパルス光に順に番号が、1、2、3、4、・・・と昇順に付与されている。また、経路点ACDEGを通過するパルス光の周波数についても、 $f_{b1}$ 、 $f_{b2}$ 、・・・というように付与されている。なお、パルス光は、経路点ACDEGには、経路点ABDEGと比較して、 $t$ だけ遅れて入力される。これは、経路点ACDEGでは、パルス光が、遅延補償ファイバ5を通過するためである。

20

【0091】

また、経路点ACDFGを通過するパルス光については、経路点ACDFGを通過するパルス光に順に番号が、1、2、3、4、・・・と昇順に付与されている。また、経路点ACDFGを通過するパルス光の周波数についても、 $f_{b1}$ 、 $f_{b2}$ 、・・・というように付与されている。なお、パルス光は、経路点ACDFGには、経路点ABDFG、経路点ACDEGと比較して、 $2t$ だけ遅れて入力される。これは、経路点ACDFGでは、パルス光が、遅延補償ファイバ5とセンシングファイバ9とを通過するためである。

30

【0092】

また、ここでは、遅延補償ファイバ5による遅延時間と、センシングファイバ9による遅延時間とは、同じであるとする。例えば、遅延時間は  $t$  である。これにより、 $f_{f1}$ 、 $f_{f2}$ 、・・・と、 $f_{b1}$ 、 $f_{b2}$ 、・・・とは同期することになる。よって、正確に  $(f_{f1} - f_{b1})$  及び  $(f_{f2} - f_{b2})$  等を求めることができる。よって、経路点Gでは、始動直後の4つのパルス光を除くと、パルス光は、 $I_A$ 、 $I_B$ の2種類となり、 $I_A$ 、 $I_B$ 、 $I_A$ 、 $I_B$ 、・・・と続いていくことになる。

【0093】

図9は、本発明の実施の形態3における  $I_A$ 、 $I_B$ をA/D変換した後のパワースペクトルの概念図である。 $I_A$ の場合、センシングファイバ9で検出した信号を含むビートと側波帯の中心周波数は、 $f_{f1} - f_{b1}$ である。すなわち、 $I_A$ では、中心周波数  $f_{f1} - f_{b1}$ のビートに信号  $(t)$  が変調されている。また、 $I_B$ の場合、センシングファイバ9で検出した信号を含むビートと側波帯の中心周波数は、 $f_{f2} - f_{b2}$ である。すなわち、 $I_B$ では、中心周波数  $f_{f2} - f_{b2}$ のビートに信号  $(t)$  が変調されている。復調器17は、 $I_A$ 、 $I_B$ のそれぞれから信号  $(t)$  を復調し、復調したものを出力する。

40

【0094】

(効果の説明)

本実施の形態1と同様に、周波数が異なる複数のビートを発生させ、サンプリングの数を増やしたことにより、折り返し雑音を低減することができる。さらに、式(9)、(1

50



0) に示されるように、サンプリングの間隔をより細かくしたことにより、信号のタイミングを精密に測る必要があるような用途においては、従来よりも細かく測ることができる。

【0095】

また、本実施の形態1よりサンプリング周波数を低くできることにより、本実施の形態1よりもO/E変換器12の帯域幅を狭くすることができる。これにより、折り返し雑音を抑制することができる。ただし、本発明の実施の形態3においては、復調するパルス光の周波数と同じ周波数のビートが、 $I_A$ と $I_B$ の両方で発生する。具体的には、図9に示されるように、 $I_A$ では、 $f_{f1} - f_{b1}$ と $f_{f2} - f_{b2}$ が発生している。このうち、 $I_A$ では、 $f_{f1} - f_{b1}$ が、センシングファイバ9で検出した信号を含むビートと側波帯の周波数である。また、 $I_B$ では、 $f_{f1} - f_{b1}$ と $f_{f2} - f_{b2}$ が発生している。このうち、 $I_B$ では、 $f_{f2} - f_{b2}$ が、センシングファイバ9で検出した信号を含むビートと側波帯の周波数である。よって、O/E変換器12による帯域制限で、復調するパルス光への時間的に前のパルス光の漏れ込みにより、別の雑音が発生しやすくなることがある。

10

【0096】

実施の形態4.

図10は、本発明の実施の形態4における干渉型光ファイバセンサの構成の一例を示すブロック図である。

なお、本実施の形態4において、特に記述しない項目については実施の形態1～3と同様とし、同一の機能や構成については同一の符号を用いて述べることとする。

20

【0097】

(構成の説明)

本発明の実施の形態1～3との相違点は、変調信号発生器205から出力される周波数信号の出力タイミングと、変調信号発生器206から出力する周波数信号の出力タイミングと、参照信号発生器233～238の出力波形である。

【0098】

図11は、本発明の実施の形態4におけるパルス光の光周波数とそのタイミングの一例について説明する図である。図11に示されるように、変調信号発生器205、206から出力される周波数信号は、周期3で出力される。このため、本発明の実施の形態1～3の変調信号発生器201～204の周期の場合と比較して、3倍長い間隔となっている。また、パルス光源2の出力波形であるパルス光と、光周波数シフタ211、212の略矩形波とは、同期が取れている。すなわち、光周波数シフタ211、212が出力するパルス光の周波数は、パルス光源2のパルス光の出力タイミングに合わせて、ステップ状にその大きさを変化させる。図11に示すように、横軸は時間であり、縦軸は、光周波数である。そして、9ごとにステップ状の周波数の変動は元に戻る。つまり、光周波数シフタ211、212の略矩形波の周期は9であり、周波数は $1/(9)$ である。また、パルス光源2から出力されるパルス光は、光周波数シフタ211、212に到達する順番に数字が付与されている。例えば、1、2、3、4、5、6、7、8、9、・・・のように昇順に番号が付与されている。

30

【0099】

また、参照信号発生器233～238は、 $A(t)$ 、 $B(t)$ 、 $C(t)$ の定義が異なっている。具体的には、式(11)～(13)に表されるように、サンプリング間隔が異なっている。

40

【0100】

【数 1 1】

$$\Delta_A(t) = \sum_{i=0}^{\infty} \delta[t - (9i + 10)\tau] \quad (11)$$

【0 1 0 1】

【数 1 2】

$$\Delta_B(t) = \sum_{i=0}^{\infty} \delta[t - (9i + 13)\tau] \quad (12)$$

10

【0 1 0 2】

【数 1 3】

$$\Delta_C(t) = \sum_{i=0}^{\infty} \delta[t - (9i + 16)\tau] \quad (13)$$

20

【0 1 0 3】

すなわち、 $f_{1f} - f_{1b}$ 、 $f_{2f} - f_{2b}$ 、 $f_{3f} - f_{3b}$ の各間隔が3であるため、 $\Delta_A(t)$ 、 $\Delta_B(t)$ 、 $\Delta_C(t)$ の各間隔も3となるように定義されている。要するに、変調信号発生器205、206の出力タイミングと、参照信号発生器233～238とのサンプリング間隔とは、同一になるようにするのである。ここで、 $f_{f1} - f_{b1}$ の差を1とする。すなわち、 $(f_{f1} + f_{b1}) - (f_{f1})$ の差を1と想定する。次に、 $f_{f2} - f_{b2}$ の差を3とする。すなわち、 $(f_{f2} + f_{b2}) - (f_{b2})$ の差を3とする。また、 $f_{f3} - f_{b3}$ の差を5とする。すなわち、 $(f_{f3} + f_{b3}) - (f_{b3})$ の差を5とする。このように、1、3、5ととびとびの値で出力周波数の大きさの割合を設定するのは、折り返し雑音を低減させるためである。すなわち、エイリアシングを発生させないようにするために、とびとびの値が設定されるのである。なお、1、3、5といった数字は、一例を示すものであり、これに限定されるものではない。

30

【0 1 0 4】

(動作の説明)

図12は、本発明の実施の形態4における干渉型光ファイバセンサの動作を説明するパルス波形を示す図である。図12に示すように、経路点Aを通過するパルス光については、パルス光源2から出力される順に番号が、1、2、3、4、・・・と昇順に付与されている。

【0 1 0 5】

また、経路点A B D E 1 Gを通過するパルス光については、経路点A B D E 1 Gを通過するパルス光に順に番号が、1 a 1、2 a 1、3 a 1、4 a 1、・・・と昇順に付与されている。また、経路点A B D E 1 Gを通過するパルス光の周波数についても、 $f_{f1}$ 、 $f_{f2}$ 、 $f_{f3}$ 、・・・というように付与されている。

40

【0 1 0 6】

また、経路点A B D F 1 Gを通過するパルス光については、経路点A B D F 1 Gを通過するパルス光に順に番号が、1 b 1、2 b 1、3 b 1、4 b 1、・・・と昇順に付与されている。また、経路点A B D F 1 Gを通過するパルス光の周波数についても、 $f_{f1}$ 、 $f_{f2}$ 、 $f_{f3}$ 、・・・というように付与されている。なお、パルス光は、経路点A B D F 1 Gには、経路点A B D E 1 Gと比較して、だけ遅れて入力される。これは、経路点A B D F 1 Gでは、パルス光が、センシングファイバ71を通過するためである。

50

## 【 0 1 0 7 】

また、経路点 A C D E 1 G を通過するパルス光については、経路点 A C D E 1 G を通過するパルス光に順に番号が、1 c 1、2 c 1、3 c 1、4 c 1、・・・と昇順に付与されている。また、経路点 A C D E 1 G を通過するパルス光の周波数についても、 $+f_{b1}$ 、 $+f_{b2}$ 、 $+f_{b3}$ 、・・・というように付与されている。なお、パルス光は、経路点 A C D E 1 G には、経路点 A B D E 1 G と比較して、 $2$  だけ遅れて入力される。これは、経路点 A C D E 1 G では、パルス光が、遅延補償ファイバ 5 を通過するためである。

## 【 0 1 0 8 】

また、経路点 A C D F 1 G を通過するパルス光については、経路点 A C D F 1 G を通過するパルス光に順に番号が、1 d 1、2 d 1、3 d 1、4 d 1、・・・と昇順に付与されている。また、経路点 A C D F 1 G を通過するパルス光の周波数についても、 $+f_{b1}$ 、 $+f_{b2}$ 、 $+f_{b3}$ 、・・・というように付与されている。なお、パルス光は、経路点 A C D F 1 G には、経路点 A B D E 1 G と比較して、 $2$  だけ遅れて入力される。これは、経路点 A C D F 1 G では、パルス光が、遅延補償ファイバ 5 とセンシングファイバ 7 1 を通過するためである。

10

## 【 0 1 0 9 】

また、経路点 A B D E 2 G を通過するパルス光については、経路点 A B D E 2 G を通過するパルス光に順に番号が、1 a 2、2 a 2、3 a 2、4 a 2、・・・と昇順に付与されている。また、経路点 A B D E 2 G を通過するパルス光の周波数についても、 $+f_{f1}$ 、 $+f_{f2}$ 、 $+f_{f3}$ 、・・・というように付与されている。

20

## 【 0 1 1 0 】

また、経路点 A B D F 2 G を通過するパルス光については、経路点 A B D F 2 G を通過するパルス光に順に番号が、1 b 2、2 b 2、3 b 2、4 b 2、・・・と昇順に付与されている。また、経路点 A B D F 2 G を通過するパルス光の周波数についても、 $+f_{f1}$ 、 $+f_{f2}$ 、 $+f_{f3}$ 、・・・というように付与されている。なお、パルス光は、経路点 A B D F 2 G には、経路点 A B D E 2 G と比較して、 $2$  だけ遅れて入力される。これは、経路点 A B D F 2 G では、パルス光が、センシングファイバ 7 2 を通過するためである。

## 【 0 1 1 1 】

また、経路点 A C D E 2 G を通過するパルス光については、経路点 A C D E 2 G を通過するパルス光に順に番号が、1 c 2、2 c 2、3 c 2、4 c 2、・・・と昇順に付与されている。また、経路点 A C D E 2 G を通過するパルス光の周波数についても、 $+f_{b1}$ 、 $+f_{b2}$ 、 $+f_{b3}$ 、・・・というように付与されている。なお、パルス光は、経路点 A C D E 2 G には、経路点 A B D E 2 G と比較して、 $2$  だけ遅れて入力される。これは、経路点 A C D E 2 G では、パルス光が、遅延補償ファイバ 5 を通過するためである。

30

## 【 0 1 1 2 】

また、経路点 A C D F 2 G を通過するパルス光については、経路点 A C D F 2 G を通過するパルス光に順に番号が、1 d 2、2 d 2、3 d 2、4 d 2、・・・と昇順に付与されている。また、経路点 A C D F 2 G を通過するパルス光の周波数についても、 $+f_{b1}$ 、 $+f_{b2}$ 、 $+f_{b3}$ 、・・・というように付与されている。なお、パルス光は、経路点 A C D F 2 G には、経路点 A B D E 2 G と比較して、 $2$  だけ遅れて入力される。これは、経路点 A C D F 2 G では、パルス光が、遅延補償ファイバ 5 とセンシングファイバ 7 2 を通過するためである。

40

## 【 0 1 1 3 】

また、経路点 A B D E 3 G を通過するパルス光については、経路点 A B D E 3 G を通過するパルス光に順に番号が、1 a 3、2 a 3、3 a 3、4 a 3、・・・と昇順に付与されている。また、経路点 A B D E 3 G を通過するパルス光の周波数についても、 $+f_{f1}$ 、 $+f_{f2}$ 、 $+f_{f3}$ 、・・・というように付与されている。

## 【 0 1 1 4 】

また、経路点 A B D F 3 G を通過するパルス光については、経路点 A B D F 3 G を通過するパルス光に順に番号が、1 b 3、2 b 3、3 b 3、4 b 3、・・・と昇順に付与され

50

ている。また、経路点 A B D F 3 G を通過するパルス光の周波数についても、 $+f_{f1}$ 、 $+f_{f2}$ 、 $+f_{f3}$ 、 $\dots$  というように付与されている。なお、パルス光は、経路点 A B D F 3 G には、経路点 A B D E 3 G と比較して、 $\frac{1}{3}$  だけ遅れて入力される。これは、経路点 A B D F 3 G では、パルス光が、センシングファイバ 7 3 を通過するためである。

【0115】

また、経路点 A C D E 3 G を通過するパルス光については、経路点 A C D E 3 G を通過するパルス光に順に番号が、 $1c3$ 、 $2c3$ 、 $3c3$ 、 $4c3$ 、 $\dots$  と昇順に付与されている。また、経路点 A C D E 3 G を通過するパルス光の周波数についても、 $+f_{b1}$ 、 $+f_{b2}$ 、 $+f_{b3}$ 、 $\dots$  というように付与されている。なお、パルス光は、経路点 A C D E 3 G には、経路点 A B D E 3 G と比較して、 $\frac{1}{3}$  だけ遅れて入力される。これは、経路点 A C D E 3 G では、パルス光が、遅延補償ファイバ 5 を通過するためである。

10

【0116】

また、経路点 A C D F 3 G を通過するパルス光については、経路点 A C D F 3 G を通過するパルス光に順に番号が、 $1d3$ 、 $2d3$ 、 $3d3$ 、 $4d3$ 、 $\dots$  と昇順に付与されている。また、経路点 A C D F 3 G を通過するパルス光の周波数についても、 $+f_{b1}$ 、 $+f_{b2}$ 、 $+f_{b3}$ 、 $\dots$  というように付与されている。なお、パルス光は、経路点 A C D F 3 G には、経路点 A B D E 3 G と比較して、 $\frac{2}{3}$  だけ遅れて入力される。これは、経路点 A C D F 3 G では、パルス光が、遅延補償ファイバ 5 とセンシングファイバ 7 3 を通過するためである。

【0117】

20

なお、経路点 A B D E 1 G を通過するパルス光と、経路点 A B D E 2 G を通過するパルス光とは、 $\frac{1}{3}$  の時間差が設定されている。また、経路点 A B D E 2 G を通過するパルス光と、経路点 A B D E 3 G を通過するパルス光とは、 $\frac{2}{3}$  の時間差が設定されている。

【0118】

また、ここでは、遅延補償ファイバ 5、8 1、8 2 による遅延時間と、センシングファイバ 7 1、7 2、7 3 による遅延時間とは、同じであるとする。例えば、遅延時間は  $\frac{1}{3}$  である。これにより、 $+f_{f1}$ 、 $+f_{f2}$ 、 $+f_{f3}$ 、 $\dots$  と、 $+f_{b1}$ 、 $+f_{b2}$ 、 $+f_{b3}$ 、 $\dots$  とは同期することになる。よって、正確に  $(+f_{f1}) - (+f_{b1})$ 、 $(+f_{f2}) - (+f_{b2})$  及び  $(+f_{f3}) - (+f_{b3})$  等を求めることができる。よって、経路点 G では、始動直後の 10 個のパルス光を除くと、パルス光は、 $I_A$ 、 $I_B$ 、 $I_C$ 、の 3 種類となり、 $I_A$ 、 $I_B$ 、 $I_C$ 、 $I_A$ 、 $I_B$ 、 $I_C$ 、 $\dots$  と続いていくことになる。そして、復調器 1 8 は、 $I_A$ 、 $I_B$ 、 $I_C$  から信号  $s_1(t)$ 、 $s_2(t)$ 、 $s_3(t)$  を復調している。

30

【0119】

(効果の説明)

本発明の実施の形態 4 では、センシングファイバ 7 1、7 2、7 3 を用い、各パルス光のタイミングをずらしていくことにより、1 つのパルス光から 3 つの信号が得られる。すなわち、 $f_{f1}$  と  $f_{f2}$  との時間差が  $\frac{1}{3}$  に設定され、 $f_{f2}$  と  $f_{f3}$  との時間差が  $\frac{1}{3}$  に設定され、 $f_{f3}$  と  $f_{f1}$  との時間差が  $\frac{1}{3}$  に設定され、 $f_{b1}$  と  $f_{b2}$  との時間差が  $\frac{1}{3}$  に設定され、 $f_{b2}$  と  $f_{b3}$  との時間差が  $\frac{1}{3}$  に設定され、 $f_{b3}$  と  $f_{b1}$  との時間差が  $\frac{1}{3}$  に設定されることで、 $f_{f1} - f_{b1}$ 、 $f_{f2} - f_{b2}$ 、 $f_{f3} - f_{b3}$  が同時に出現していくようになる。そして、1 つの周波数のビートに複数のセンシングファイバで検出された複数の信号が交番して含まれる。例えば、 $f_{f1} - f_{b1}$  の周波数のビートの内、 $I_A$  のパルス光には信号  $s_1(t)$ 、 $I_B$  のパルス光には信号  $s_2(t)$ 、 $I_C$  のパルス光には信号  $s_3(t)$  が含まれる。3 つの周波数のビートを同時に復調することで 3 つの信号が同時に得られる。

40

【0120】

要するに、周波数の異なるパルス光が、時間的に少しずつずらされて経路内を伝搬していくことにより、同じ時間では、同時並行的に多くのパルス光が伝搬されている状態となる。これにより、1 度に多くの信号が得られるのである。よって、従来技術 2 においては、1 度得た信号を再度得るには 9  $\frac{1}{3}$  の時間間隔が必要であったのに対し、本発明の実施の

50

形態4においては、1度得た信号を再度得るには3の時間間隔で済むようになった。そのため、周期が短くなった。したがって、サンプリング周波数が高くなり、折り返し雑音を低減することができる。

【0121】

実施の形態5.

図13は、本発明の実施の形態5における干渉型光ファイバセンサの構成の一例を示すブロック図である。

なお、本実施の形態5において、特に記述しない項目については実施の形態1~4と同様とし、同一の機能や構成については同一の符号を用いて述べることとする。

【0122】

(構成の説明)

本発明の実施の形態1~4との相違点は、変調信号発生器207、208から出力される周波数信号の出力タイミングと、変調信号発生器207、208から出力される各周波数信号の大きさの割合と、複数のセンシングファイバがN個にグループ化されて構成されている点と、参照信号の出力波形である。

【0123】

図14は、本発明の実施の形態5におけるパルス光の光周波数とそのタイミングの一例について説明する図である。図14に示されるように、変調信号発生器207、208から出力される周波数信号は、半周期 $kM$ で出力される。このため、パルス光源2の出力波形であるパルス光の周期は、 $kM$ となるように設定される。また、変調信号発生器207、208は、 $+f_{f1}$ と $+f_{b1}$ との差が $2i-1$ であり、 $+f_{f2}$ と $+f_{b2}$ との差が $2i-1$ であり、 $+f_{b2}$ と $+f_{f1}$ との差が $2N+1$ である。つまり、 $f_{f1}-f_{b1}$ と、 $f_{f2}-f_{b2}$ と、 $f_{b2}-f_{f1}$ との割合が、 $2i-1$ 、 $2i-1$ 、 $2N+1$ となるようにする。ただし、 $i$ は、1、2、 $\dots$ 、 $N$ と自然数であるとする。

【0124】

ここで、 $N$ は、復調するビート周波数の数であり、 $M$ は、自分割多重する信号の数であるとする。本発明の実施の形態4では、 $N=2$ 、 $M=2$ の場合について説明する。 $k$ は、パルス光源2から出力するパルス繰返し周期とセンシングファイバ往復伝搬時間の係数の1つであり、通常、2または3が設定される。本発明の実施の形態4では、 $k=3$ の場合について説明する。そして、パルス光源2から順次出力されるパルス光が分岐され、伝搬経路を経て、O/E変換器に送られた際、各パルス光が同一時間で重ならないようにするために、各経路点間に遅延ファイバ5、83、84、85を取り付ける。

【0125】

このような前提で、光アンプ7の出力は、光カプラ301で分岐され、 $N$ 個のグループに送られ、各グループのミラー、例えば、グループ1の場合にはミラー331等、グループ2の場合にはミラー335等で反射される。このような伝搬経路により多重伝送されたパルス光は、O/E変換器12で受光され、復調器19のA/D変換器に入力される。

【0126】

復調器19は、参照信号発生器239~246を有している。参照信号発生器239~246は、 $\sin 2\pi(f_{f1}-f_{b1})t \sim \sin 2\pi(f_{Nf}-f_{Nb})t$ の参照信号及び式(14)~(19)等で表されるサンプリング関数を掛け合わせた $N \times M$ 対の参照信号並びに $\cos 2\pi(f_{f1}-f_{b1})t \sim \cos 2\pi(f_{Nf}-f_{Nb})t$ の参照信号及び式(14)~(19)等で表されるサンプリング関数を掛け合わせた $N \times M$ 対の参照信号の内、復調する信号を含んだビート周波数のタイミングに対応した参照信号が加算された参照信号を出力する。そして、復調器19は、それぞれの信号に対応した参照信号とA/D変換器21の出力とを乗算し、位相復調する。

【0127】

10

20

30

40

【数 1 4】

$$\Delta_{11}(t) = \sum_{i=0}^{\infty} \delta[t - (kMNi + kMN + 1)\tau] \quad (14)$$

【0 1 2 8】

【数 1 5】

$$\Delta_{12}(t) = \sum_{i=0}^{\infty} \delta[t - (kMNi + kMN + 1 + k)\tau] \quad (15) \quad 10$$

【0 1 2 9】

【数 1 6】

$$\Delta_{1M}(t) = \sum_{i=0}^{\infty} \delta[t - (kMNi + kMN + (M-1)k + 1)\tau] \quad (16)$$

【0 1 3 0】

【数 1 7】

$$\Delta_{21}(t) = \sum_{i=0}^{\infty} \delta[t - (kMNi + kMN + kM + 1)\tau] \quad (17) \quad 20$$

【0 1 3 1】

【数 1 8】

$$\Delta_{22}(t) = \sum_{i=0}^{\infty} \delta[t - (kMNi + kMN + kM + k + 1)\tau] \quad (18) \quad 30$$

【0 1 3 2】

【数 1 9】

$$\Delta_{NM}(t) = \sum_{i=0}^{\infty} \delta[t - (kMNi + kMN + kM(N-1) + k(M-1) + 1)\tau] \quad (19)$$

【0 1 3 3】

(動作の説明)

図 1 5 は、本発明の実施の形態 5 における干渉型光ファイバセンサの動作を説明するパルス波形を示す図である。図 1 5 に示すように、経路点 A を通過するパルス光については、パルス光源 2 から出力される順に番号が、1、2、3、4、・・・と昇順に付与されている。

【0 1 3 4】

また、経路点 A B D E 1 1 G を通過するパルス光については、経路点 A B D E 1 1 G を通過するパルス光に順に番号が、1 a 1 1、2 a 1 1、3 a 1 1、4 a 1 1、・・・と昇順に付与されている。また、経路点 A B D E 1 1 G を通過するパルス光の周波数についても、 $f_{f1}$ 、 $f_{f2}$ 、・・・というように付与されている。

【0 1 3 5】

50

また、経路点 A B D F 1 1 G を通過するパルス光については、経路点 A B D F 1 1 G を通過するパルス光に順に番号が、1 b 1 1、2 b 1 1、3 b 1 1、4 b 1 1、・・・と昇順に付与されている。また、経路点 A B D F 1 G を通過するパルス光の周波数についても、 $+f_{f1}$ 、 $+f_{f2}$ 、・・・というように付与されている。なお、パルス光は、経路点 A B D F 1 1 G には、経路点 A B D E 1 1 G と比較して、 $\frac{1}{2}$  だけ遅れて入力される。これは、経路点 A B D F 1 1 G では、パルス光が、センシングファイバ 3 2 1 を通過するためである。

【 0 1 3 6 】

また、経路点 A C D E 1 1 G を通過するパルス光については、経路点 A C D E 1 1 G を通過するパルス光に順に番号が、1 c 1 1、2 c 1 1、3 c 1 1、4 c 1 1、・・・と昇順に付与されている。また、経路点 A C D E 1 1 G を通過するパルス光の周波数についても、 $+f_{b1}$ 、 $+f_{b2}$ 、・・・というように付与されている。なお、パルス光は、経路点 A C D E 1 1 G には、経路点 A B D E 1 1 G と比較して、 $\frac{1}{2}$  だけ遅れて入力される。これは、経路点 A C D E 1 1 G では、パルス光が、遅延補償ファイバ 5 を通過するためである。

10

【 0 1 3 7 】

また、経路点 A C D F 1 1 G を通過するパルス光については、経路点 A C D F 1 1 G を通過するパルス光に順に番号が、1 d 1 1、2 d 1 1、3 d 1 1、4 d 1 1、・・・と昇順に付与されている。また、経路点 A C D F 1 1 G を通過するパルス光の周波数についても、 $+f_{b1}$ 、 $+f_{b2}$ 、・・・というように付与されている。なお、パルス光は、経路点 A C D F 1 1 G には、経路点 A B D E 1 1 G と比較して、 $\frac{2}{3}$  だけ遅れて入力される。これは、経路点 A C D F 1 1 G では、パルス光が、遅延補償ファイバ 5 とセンシングファイバ 3 2 1 を通過するためである。

20

【 0 1 3 8 】

また、経路点 A B D E 1 2 G を通過するパルス光については、経路点 A B D E 1 2 G を通過するパルス光に順に番号が、1 a 1 2、2 a 1 2、3 a 1 2、4 a 1 2、・・・と昇順に付与されている。また、経路点 A B D E 1 2 G を通過するパルス光の周波数についても、 $+f_{f1}$ 、 $+f_{f2}$ 、・・・というように付与されている。

【 0 1 3 9 】

また、経路点 A B D F 1 2 G を通過するパルス光については、経路点 A B D F 1 2 G を通過するパルス光に順に番号が、1 b 1 2、2 b 1 2、3 b 1 2、4 b 1 2、・・・と昇順に付与されている。また、経路点 A B D F 1 2 G を通過するパルス光の周波数についても、 $+f_{f1}$ 、 $+f_{f2}$ 、・・・というように付与されている。なお、パルス光は、経路点 A B D F 1 2 G には、経路点 A B D E 1 2 G と比較して、 $\frac{1}{2}$  だけ遅れて入力される。これは、経路点 A B D F 1 2 G では、パルス光が、センシングファイバ 3 2 2 を通過するためである。

30

【 0 1 4 0 】

また、経路点 A C D E 1 2 G を通過するパルス光については、経路点 A C D E 1 2 G を通過するパルス光に順に番号が、1 c 1 2、2 c 1 2、3 c 1 2、4 c 1 2、・・・と昇順に付与されている。また、経路点 A C D E 1 2 G を通過するパルス光の周波数についても、 $+f_{b1}$ 、 $+f_{b2}$ 、・・・というように付与されている。なお、パルス光は、経路点 A C D E 1 2 G には、経路点 A B D E 1 2 G と比較して、 $\frac{1}{2}$  だけ遅れて入力される。これは、経路点 A C D E 1 2 G では、パルス光が、遅延補償ファイバ 5 を通過するためである。

40

【 0 1 4 1 】

また、経路点 A C D F 1 2 G を通過するパルス光については、経路点 A C D F 1 2 G を通過するパルス光に順に番号が、1 d 1 2、2 d 1 2、3 d 1 2、4 d 1 2、・・・と昇順に付与されている。また、経路点 A C D F 1 2 G を通過するパルス光の周波数についても、 $+f_{b1}$ 、 $+f_{b2}$ 、・・・というように付与されている。なお、パルス光は、経路点 A C D F 1 2 G には、経路点 A B D E 1 2 G と比較して、 $\frac{2}{3}$  だけ遅れて入力される。

50

これは、経路点 A C D F 1 2 G では、パルス光が、遅延補償ファイバ 5 とセンシングファイバ 3 2 2 を通過するためである。

【 0 1 4 2 】

また、経路点 A B D E 2 1 G を通過するパルス光については、経路点 A B D E 2 1 G を通過するパルス光に順に番号が、1 a 2 1、2 a 2 1、3 a 2 1、4 a 2 1、・・・と昇順に付与されている。また、経路点 A B D E 2 1 G を通過するパルス光の周波数については、 $+f_{f1}$ 、 $+f_{f2}$ 、・・・となるが図示は省略する。

【 0 1 4 3 】

また、経路点 A B D F 2 1 G を通過するパルス光については、経路点 A B D F 2 1 G を通過するパルス光に順に番号が、1 b 2 1、2 b 2 1、3 b 2 1、4 b 2 1、・・・と昇順に付与されている。また、経路点 A B D F 2 1 G を通過するパルス光の周波数についても、 $+f_{f1}$ 、 $+f_{f2}$ 、・・・というように付与されている。なお、パルス光は、経路点 A B D F 2 1 G には、経路点 A B D E 2 1 G と比較して、 $f_{f1}$  だけ遅れて入力される。これは、経路点 A B D F 2 1 G では、パルス光が、センシングファイバ 3 2 3 を通過するためである。

10

【 0 1 4 4 】

また、経路点 A C D E 2 1 G を通過するパルス光については、経路点 A C D E 2 1 G を通過するパルス光に順に番号が、1 c 2 1、2 c 2 1、3 c 2 1、4 c 2 1、・・・と昇順に付与されている。また、経路点 A C D E 2 1 G を通過するパルス光の周波数についても、 $+f_{b1}$ 、 $+f_{b2}$ 、・・・というように付与されている。なお、パルス光は、経路点 A C D E 2 1 G には、経路点 A B D E 2 1 G と比較して、 $f_{b1}$  だけ遅れて入力される。これは、経路点 A C D E 2 1 G では、パルス光が、遅延補償ファイバ 5 を通過するためである。

20

【 0 1 4 5 】

また、経路点 A C D F 2 1 G を通過するパルス光については、経路点 A C D F 2 1 G を通過するパルス光に順に番号が、1 d 2 1、2 d 2 1、3 d 2 1、4 d 2 1、・・・と昇順に付与されている。また、経路点 A C D F 2 1 G を通過するパルス光の周波数についても、 $+f_{b1}$ 、 $+f_{b2}$ 、・・・というように付与されている。なお、パルス光は、経路点 A C D F 2 1 G には、経路点 A B D E 2 1 G と比較して、 $f_{b1}$  だけ遅れて入力される。これは、経路点 A C D F 2 1 G では、パルス光が、遅延補償ファイバ 5 とセンシングファイバ 3 2 3 を通過するためである。

30

【 0 1 4 6 】

また、経路点 A B D E 2 2 G を通過するパルス光については、経路点 A B D E 2 2 G を通過するパルス光に順に番号が、1 a 2 2、2 a 2 2、3 a 2 2、4 a 2 2、・・・と昇順に付与されている。また、経路点 A B D E 2 2 G を通過するパルス光の周波数についても、 $+f_{f1}$ 、 $+f_{f2}$ 、・・・というように付与されている。

【 0 1 4 7 】

また、経路点 A B D F 2 2 G を通過するパルス光については、経路点 A B D F 2 2 G を通過するパルス光に順に番号が、1 b 2 2、2 b 2 2、3 b 2 2、4 b 2 2、・・・と昇順に付与されている。また、経路点 A B D F 2 2 G を通過するパルス光の周波数についても、 $+f_{f1}$ 、 $+f_{f2}$ 、・・・というように付与されている。なお、パルス光は、経路点 A B D F 2 2 G には、経路点 A B D E 2 2 G と比較して、 $f_{f1}$  だけ遅れて入力される。これは、経路点 A B D F 2 2 G では、パルス光は、センシングファイバ 3 2 4 を通過するためである。

40

【 0 1 4 8 】

また、経路点 A C D E 2 2 G を通過するパルス光については、経路点 A C D E 2 2 G を通過するパルス光に順に番号が、1 c 2 2、2 c 2 2、3 c 2 2、4 c 2 2、・・・と昇順に付与されている。また、経路点 A C D E 2 2 G を通過するパルス光の周波数についても、 $+f_{b1}$ 、 $+f_{b2}$ 、・・・というように付与されている。なお、パルス光は、経路点 A C D E 2 2 G には、経路点 A B D E 2 2 G と比較して、 $f_{b1}$  だけ遅れて入力される。こ

50



れは、経路点 A C D E 2 2 G では、パルス光が、遅延補償ファイバ 5 を通過するためである。

【 0 1 4 9 】

また、経路点 A C D F 2 2 G を通過するパルス光については、経路点 A C D F 2 2 G を通過するパルス光に順に番号が、1 d 2 2、2 d 2 2、3 d 2 2、4 d 2 2、・・・と昇順に付与されている。また、経路点 A C D F 2 2 G を通過するパルス光の周波数についても、 $+f_{b1}$ 、 $+f_{b2}$ 、・・・というように付与されている。なお、パルス光は、経路点 A C D F 2 2 G には、経路点 A B D E 2 2 G と比較して、2 だけ遅れて入力される。これは、経路点 A C D F 2 2 G では、パルス光が、遅延補償ファイバ 5 とセンシングファイバ 3 2 4 を通過するためである。

10

【 0 1 5 0 】

なお、経路点 A B D E 1 1 G を通過するパルス光と、経路点 A B D E 1 2 G を通過するパルス光とは、3 の時間差が設定されている。また、経路点 A B D E 1 2 G を通過するパルス光と、経路点 A B D E 2 1 G を通過するパルス光とは、3 の時間差が設定されている。また、経路点 A B D E 2 1 G と、A B D E 2 2 G を通過するパルス光とは、3 の時間差が設定されている。

【 0 1 5 1 】

よって、経路点 G では、始動直後の  $k M N + 1$  個のパルス光を除くと、パルス光は、 $k M N$  種類となり、 $I_{11}$ 、 $I_{12}$ 、 $I_{21}$ 、 $I_{22}$ 、・・・と続いていくことになる。そして、復調器 1 9 は、それぞれのセンシングファイバ 3 2 1、3 2 2、3 2 3、3 2 4 で検出した信号をサンプリングして位相復調する。

20

【 0 1 5 2 】

(効果の説明)

従来技術 2 では、時分割多重された M 個のみの多重伝送となる。これに対して、本発明の実施の形態 5 では、時分割多重された M 個と、ビート周波数の違いで多重化された N 個とを掛け合わせた  $M \times N$  個の信号を多重伝送することができる。

【 0 1 5 3 】

(利用形態の説明)

(1) 全ての実施例で光の周波数を変化させる方法に変調信号発生器の周波数を変化させる方法で説明したが、光周波数シフトの通過回数、多段の周波数シフトの経路切り替えなど他の方法で光の周波数を変化させることもできる。

30

(2) 全ての実施例で光の周波数をステップ状に変化させる例を示したが、ステップ状はなくても、2つの光の周波数の差が変化することにより、同様に動作させることができる。

(3) 本発明の実施の形態 1 では、周波数ごとに位相復調してから加算する例を示した。本発明の実施の形態 2 ~ 5 では、複数の周波数の参照信号を加算した参照信号を用いる例を示した。このほかにも、位相復調過程の他の位置で加算することもできる。

【 0 1 5 4 】

(4) 本発明の実施の形態 1、2、4 では、3つのビート周波数を用いる一例をそれぞれ示した。本発明の実施の形態 3、5 では、2つのビート周波数を用いる一例をそれぞれ示した。このほかにも、使用されるビート周波数の数は、他の数で行うことができる。つまり、ビート周波数の数は、任意でよく、限定されるものではない。

40

(5) 本発明の実施の形態 5 では、ビート周波数の多重化数が 2 で設定され、時分割多重の多重化数が 2 で設定される一例について説明したが、M と N の数を変えることで、多重化数を変えることもできる。

(6) 本発明の実施の形態 1、2、3 では、全てのパルス光に信号が含まれるようにした一例について、それぞれ示したが、信号を含まないパルス光がある構成にしても、サンプリング数を増やしただけの効果を得ることができる。

【 0 1 5 5 】

(7) 本発明の実施の形態 1 ~ 5 において、センシングファイバに光カプラとミラーを取

50

り付けてマイケルソン干渉計を構成する例で説明したが、マッハ・ツェンダ干渉計、ミラーの代わりにF B G ( F i b e r B r a g g g r a t i n g ) を用いた干渉計等を用いることもできる。

( 8 ) 本発明の実施の形態 1 ~ 5 において、光カプラでパルス光を分岐する一例を示したが、部分反射ミラー、F B G 等で分岐させることもできる。

( 9 ) 本発明の実施の形態 1 ~ 5 において、ビート周波数に対応した参照信号とサンプリングするタイミング信号とを掛け合わせた参照信号を用いる一例で説明したが、サンプリングとビート周波数に対応した参照信号の乗算を別々に行うこともできる。

( 10 ) 本発明の実施の形態 1 ~ 5 において、A / D 変換してからデジタル処理で復調する一例を示したが、一部または全てをアナログ処理の復調器にすることもできる。

10

( 11 ) 本発明の実施の形態 1 ~ 5 において、同じ位相復調方法を示したが、他の位相復調方法を用いることもできる。

#### 【 0 1 5 6 】

( 12 ) 本発明の実施の形態 5 では、ビート周波数を多重化する干渉計及び光カプラを並列に接続し、時分割多重する干渉計及び光カプラを直列に接続する一例を示したが、並列と直列とを入れ替えるか、または、並列と直列とを組み合わせる等の他の形に接続することもできる。

( 13 ) 本発明の実施の形態 5 では、ビート周波数の多重化と時分割多重とを併用した一例を示したが、波長分岐多重等の他の多重化方法と併用することもできる。

#### 【 符号の説明 】

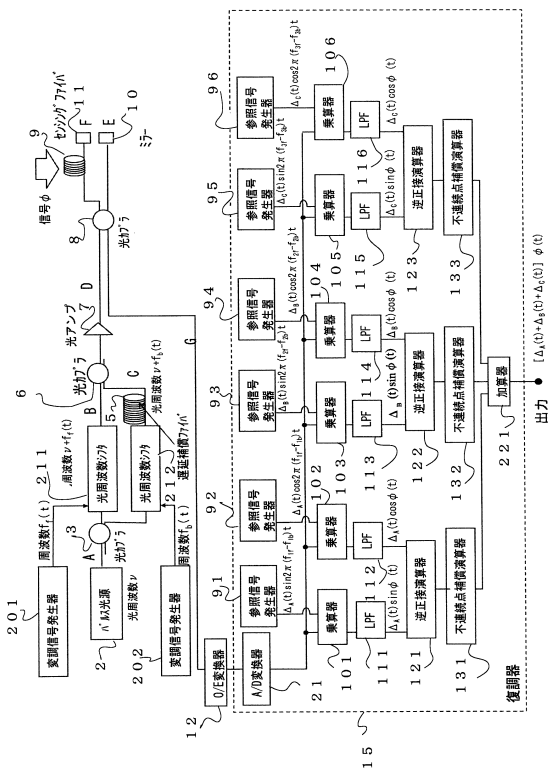
20

#### 【 0 1 5 7 】

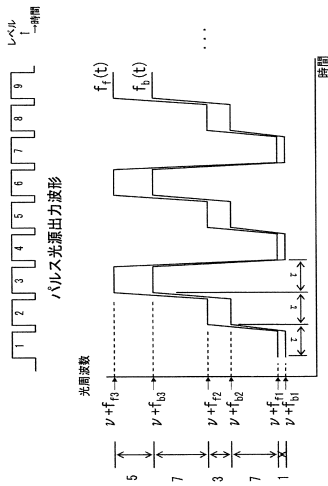
1 オシレータ、2 パルス光源、3、6、8、31、32、33、41、42、51、52、301、302、303、304、305、306、307、308、309、310 光カプラ、4 光周波数シフタ、5、81、82、83、84、85 遅延補償ファイバ、7 光アンプ、9、71、72、73、321、322、323、324 センシングファイバ、10、11、61、62、63、64、65、66、331、332、333、334、335、336、337、338 ミラー、12 O / E 変換器、13、14、15、16、17、18、19 復調器、21 A / D 変換器、22、23、91、92、93、94、95、96、97、98、231、232、233、234、235、236、237、238、239、240、241、242、243、244、245、246 参照信号発生器、24、25、101、102、103、104、105、106、107、108 乗算器、26、27、111、112、113、114、115、116、117、118 L P F、28、121、122、123、124 逆正接演算器、29、131、132、133、134 不連続点補償演算器、201、202、203、204、205、206、207、208 変調信号発生器、211、212 光周波数シフタ、221 加算器。

30

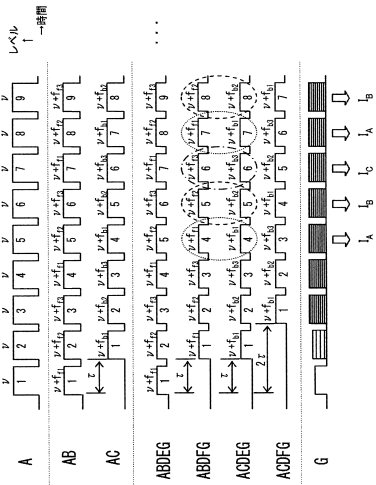
【図1】



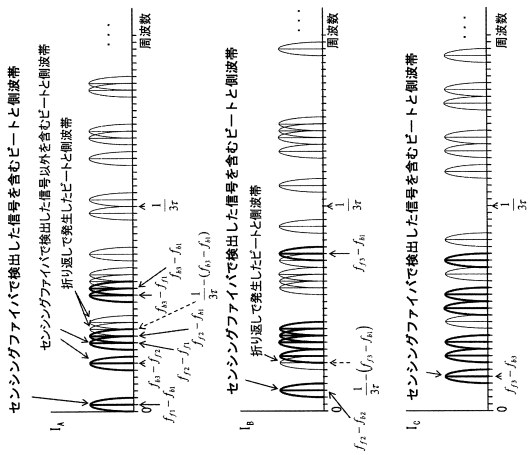
【図2】



【図3】



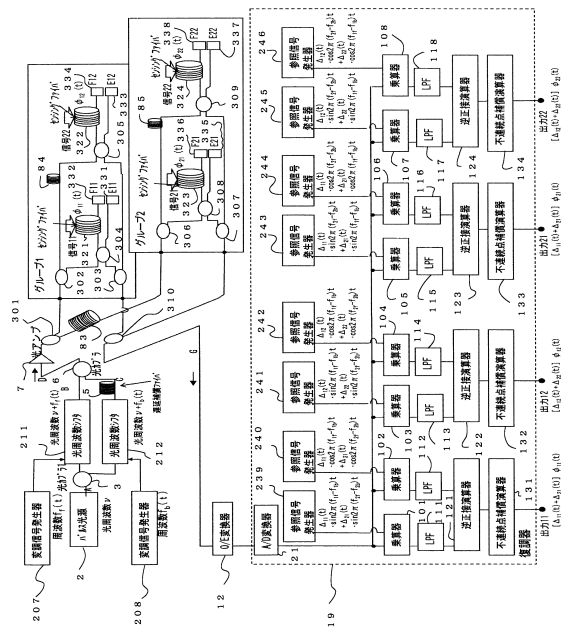
【図4】



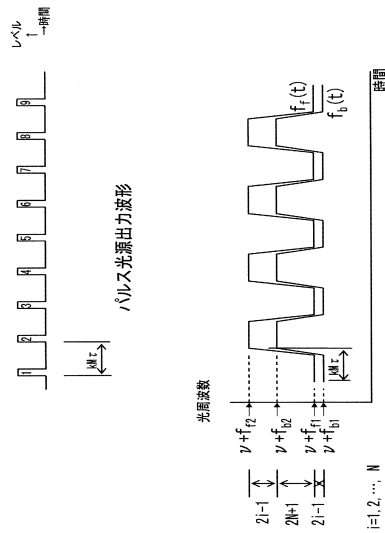




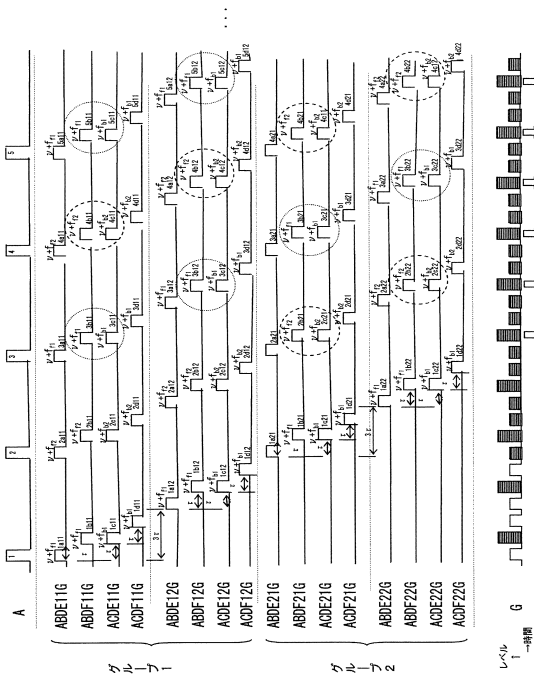
【図13】



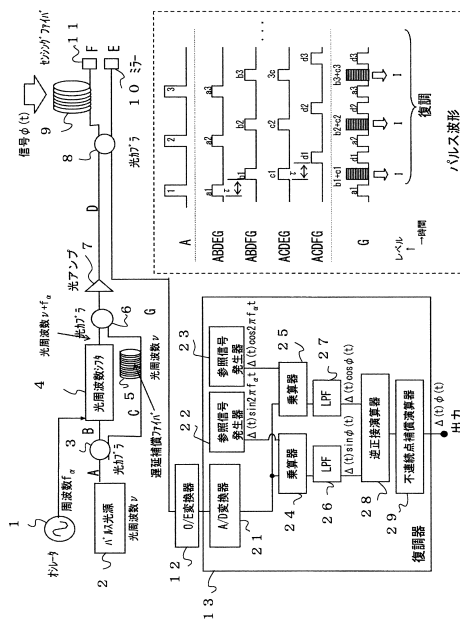
【図14】



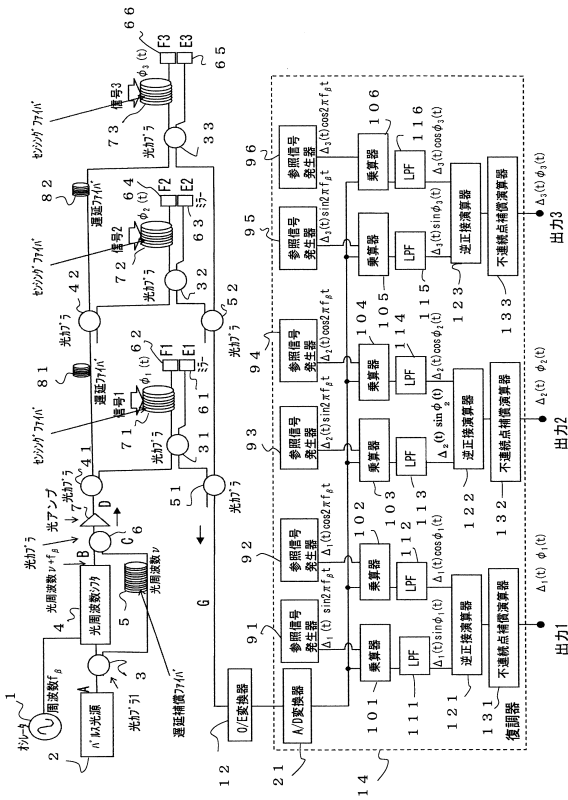
【図15】



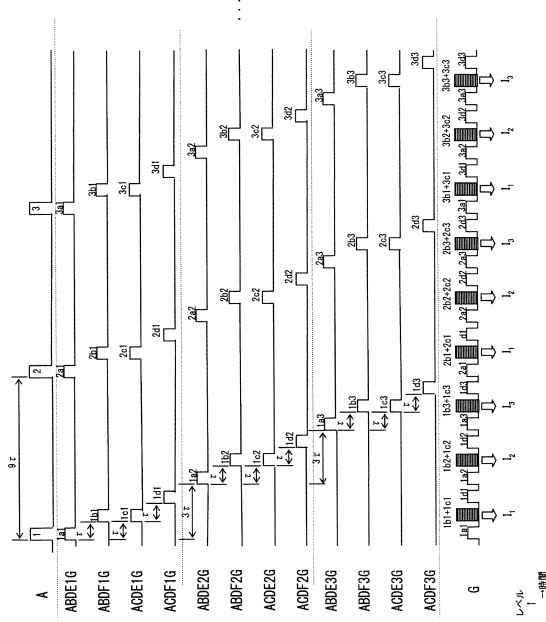
【図16】



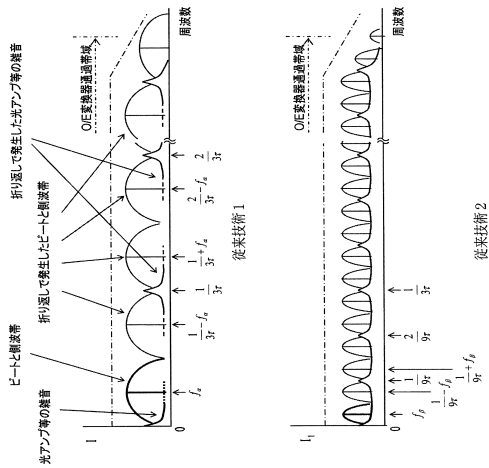
【図17】



【図18】



【図19】



---

フロントページの続き

(56)参考文献 特表2009-506311(JP,A)

特開2003-344148(JP,A)

佐藤 陵沢 Ryotaku SATO, “広ダイナミックレンジ光ファイバハイドロホン Wide Dynamic-Range Fiber-Optic Hydrophone”, 電子情報通信学会技術研究報告, 一般社団法人電子情報通信学会, 2011年11月17日, Vol.111, No.311, p.15-20

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01D 5/26 - 5/38

G01B 9/00 - 9/10

CiNii