

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2018-9896

(P2018-9896A)

(43) 公開日 平成30年1月18日(2018.1.18)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
G O 1 D 5/26 (2006.01)	G O 1 D 5/26 M	2 F 0 6 4
G O 1 D 5/353 (2006.01)	G O 1 D 5/353 A	2 F 0 6 5
G O 1 B 11/00 (2006.01)	G O 1 B 11/00 G	2 F 1 0 3
G O 1 B 9/02 (2006.01)	G O 1 B 9/02	

審査請求 未請求 請求項の数 5 O L (全 14 頁)

(21) 出願番号	特願2016-139602 (P2016-139602)	(71) 出願人	390000804
(22) 出願日	平成28年7月14日 (2016.7.14)		白山工業株式会社
		(74) 代理人	100078776
			弁理士 安形 雄三
		(74) 代理人	100121887
			弁理士 菅野 好章
		(74) 代理人	100200333
			弁理士 古賀 真二
		(72) 発明者	高原 穆之
			東京都府中市日綱町 1-1 Jタワー10
			F 白山工業株式会社内
		(72) 発明者	吉田 稔
			東京都府中市日綱町 1-1 Jタワー10
			F 白山工業株式会社内

最終頁に続く

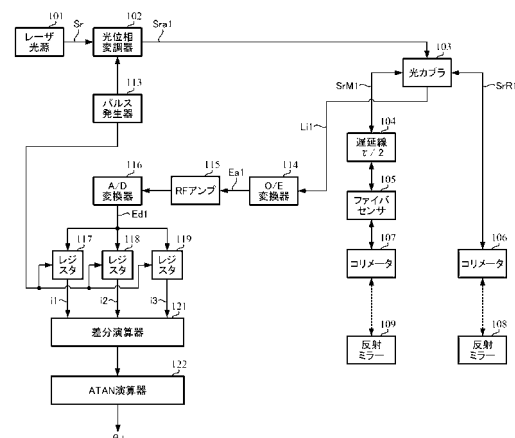
(54) 【発明の名称】 光ファイバセンサ

(57) 【要約】

【課題】 光干渉信号出力をセンサ信号とするセンサには、構成が簡単で、センサ部分の無電源化が可能なホモダイン干渉方式、あるいはマッハツェンダ干渉方式があるが、安定な動作を得るには、使用部品に対して厳しい工作精度と熱膨張対策が必要であると共に、センサ信号として変動できる位相範囲は ± 90 度以内に限られていた。また、コスト低減及び演算精度向上が望まれていた。

【解決手段】 光ファイバセンサに供給する光（レーザ光）を、一定の周期毎に、一定時間 τ だけ、その光の位相を 90 度（ $\pi/2$ ）変えると共に、この光を2分岐し、一方はそのまま、他方には時間 τ の遅延を与えて合成し、干渉出力 I_1 、 I_2 、 I_3 を得、これらの計測結果を演算することにより、通常の干渉計の計測範囲（光の $1/2$ 波長）を超えた干渉計測を可能とすると同時に、光強度の変動に強い光ファイバセンサを提供する。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

所定の時間間隔で区切られ、他の区間の位相に比べて 90 度位相変調している直交位相区間を少なくとも 1 つ有する計測用光信号を生成する計測用光信号発生部と、

前記計測用光信号の分波である計測光及び参照光の間に前記所定の時間間隔の整数倍の時間だけ遅延を設け、外力により光路長を変動させられた前記計測光と前記参照光を結合して干渉光信号を生成する光干渉部と、

前記干渉光信号に基づいて、前記計測光と前記参照光の位相差を算出する位相差演算部とを備え、

前記位相差演算部は、90 度位相変調していない同位相区間における前記計測光及び前記同位相区間における前記参照光の結合により生成される前記干渉光信号の電気信号 1 と、前記同位相区間における前記計測光及び前記直交位相区間における前記参照光の結合により生成される前記干渉光信号の電気信号 2 と、前記直交位相区間における前記計測光及び前記同位相区間における前記参照光の結合により生成される前記干渉光信号の電気信号 3 を少なくとも用い、前記電気信号 1 及び前記電気信号 2 の差分並びに前記電気信号 3 及び前記電気信号 1 の差分より前記位相差を算出する光ファイバセンサ。

10

【請求項 2】

前記位相差演算部は、前記電気信号 1 として、区間が異なる電気信号 1 1 及び電気信号 1 2 を用いる請求項 1 に記載の光ファイバセンサ。

【請求項 3】

20

前記計測用光信号発生部は、連続する 4 つの区間のうち、3 番目の区間が前記直交位相区間で、他の 3 つの区間が前記同位相区間である前記計測用光信号を生成し、

前記光干渉部は、前記計測光及び前記参照光の間に前記所定の時間間隔だけ遅延を設ける請求項 1 に記載の光ファイバセンサ。

【請求項 4】

前記計測用光信号発生部は、連続する 5 つの区間のうち、3 番目の区間が前記直交位相区間で、他の 4 つの区間が前記同位相区間である前記計測用光信号を生成し、

前記光干渉部は、前記計測光及び前記参照光の間に前記所定の時間間隔だけ遅延を設ける請求項 1 又は 2 に記載の光ファイバセンサ。

【請求項 5】

30

ホモダイン型又はマッハツェンダ型である請求項 1 乃至 4 のいずれかに記載の光ファイバセンサ。

【発明の詳細な説明】**【技術分野】****【0001】**

本発明は、外力により光路長を変化させる、或いは機械的に位置が変動する物体に反射ミラーを取り付ける等して、その物体の位置変動を光路長の変化として捉えることにより、そこを通過する光信号の位相が変化する特性を利用した光ファイバセンサに関する。

【背景技術】**【0002】**

40

光ファイバセンサは、光センサ部分を無電源化できる等により、従来の電気センサに比べ、電磁環境の悪い場所、温度環境の悪い場所への適用に優れ、かつ光ファイバの有する低損失特性により、遠距離のセンシングにも優れた特性を発揮できる。

【先行技術文献】**【特許文献】****【0003】**

【特許文献 1】特許第 5 1 1 8 2 4 6 号公報

【発明の概要】**【発明が解決しようとする課題】****【0004】**

50

従来の光ファイバセンサの干渉方式では、参照光と計測光との位相差を θ とすると、干渉出力（干渉光）は下記数 1 で示される。

【 0 0 0 5 】

【 数 1 】

$$i = r + s + 2\sqrt{r \times s} \times \cos \theta$$

ここで、 i は干渉光から変換された電気信号の値（電気信号値）、 r は参照光から変換された電気信号値、 s は計測光から変換された電気信号値である。

【 0 0 0 6 】

上記数 1 からわかるように、真に得たいセンサ信号は θ の値であるが、従来の干渉方式では i としてのみ求められることから、伝送経路での r 及び s の強度変動による変動誤差分を分離することができないという欠点があった。

10

【 0 0 0 7 】

また、従来の干渉方式では、参照光と計測光の位相関係において、位相差 90 度に動作点の中心を置くことが最も直線性の良い設定となるが、参照光と計測光の光路長差を 90 度に保つには、高い工作精度を要するとともに、熱膨張に対しても一定関係を保つ必要がある等、実用上の難しさがあった。

【 0 0 0 8 】

さらに、従来の干渉方式では、参照光と計測光の位相差 90 度を動作範囲の中心としたとき、計測可能な位相の最大は ± 90 度（半波長）であり、これを超えることは原理上不可能であった。

20

【 0 0 0 9 】

これらの問題に対して、特許第 5 1 1 8 2 4 6 号公報（特許文献 1）に開示されているような光ファイバセンサが提案されている。

【 0 0 1 0 】

特許文献 1 の光ファイバセンサは、周期 T でパルス幅 $3t$ の光パルスの前中半 t_1 、 t_2 と後半 t_3 との光位相差を 90 度に位相変調した光パルスを計測用信号とし、計測用信号を分波し、 t 時間遅延させて更に外力により光路長を変動させた光信号を計測光とし、もう一方の光信号を参照光として、干渉させている。これにより、参照光の前半 t_1 のみの部分（ R ）、計測光の前半 t_1 と参照光の中間 t_2 との干渉部分（ I_1 ）、計測光の中間 t_2 と参照光の後半 t_3 との干渉部分（ I_2 ）及び計測光の後半 t_3 のみの部分（ S ）を有する時分割多重光信号が生成され、 I_1 及び I_2 での計測光と参照光との位相差 θ_1 及び θ_2 を、各干渉部分の電気信号値 r 、 i_1 、 i_2 及び s を用いて、下記数 2 及び数 3 を基に求めている。

30

【 0 0 1 1 】

【 数 2 】

$$\cos \theta_1 = \frac{i_1 - r - s}{2\sqrt{r \times s}}$$

【 0 0 1 2 】

40

【 数 3 】

$$\cos \theta_2 = \frac{i_2 - r - s}{2\sqrt{r \times s}}$$

そして、1 周期前に求めた位相差 $\theta_1 a$ 及び $\theta_2 a$ との差分 $\Delta \theta_1$ 及び $\Delta \theta_2$ を積算した値をセンサ出力としている。

【 0 0 1 3 】

特許文献 1 では、光信号、つまり参照光（ R ）、第 1 の干渉部分（ I_1 ）、第 2 の干渉部分（ I_2 ）及び計測光（ S ）の大きさが正確に計測できることを前提として正確な位相（ i ）の演算結果が得られる。一般に光信号の大きさは半導体によるフォトダイオードに

50

より光の強度を電気変換し検出する。しかし、フォトダイオードは、 0.01 mW 以下において、入力光信号電力に比例した出力電圧を発生するものであり、検出電圧が非常に小さいので、特殊な例を除き増幅して使用することが必要である。市販されている光/電気変換器には、フォトダイオードと共にフォトダイオード出力電圧を増幅する、高入力インピーダンスを有するトランスインピーダンス増幅器が内蔵されている。このトランスインピーダンス増幅器は、入力にコンデンサを直列に挿入した交流増幅器である。特許文献1における測定法では、 R 、 I_1 、 I_2 及び S がこの順番に計測されるが、外力等によりセンサの I_1 が変化すると、その後の I_2 及び S の検出電圧が、 I_1 の電圧変化の影響を受け、この影響分が測定誤差となる。また、 I_2 の変化は、 S の測定誤差を発生させる。特許文献1では、この誤差を無くす、或いは無視できる程度に減少させるには、光/電気変換器のフォトダイオード出力電圧を直流増幅する、或いは I_1 が I_2 及び S に与える誤差並びに I_2 が S に与える誤差を演算で予測し、取り除く等の面倒なプロセスが必要となる。

10

【0014】

本発明は上述のような問題点を解決するためになされたものであり、本発明の目的は、干渉させる光の強度変動及び干渉させた後の光の強度変動がセンサ出力に与える影響を除外し、更にセンサ信号として計測可能な位相範囲が ± 90 度を越えることを許容すると共に、光/電気変換後の電気増幅に交流増幅器を使用しても測定誤差が増大しない、コスト低減がなされた光ファイバセンサを提供することにある。

20

【課題を解決するための手段】

【0015】

本発明の上記目的は、所定の時間間隔で区切られ、他の区間の位相に比べて 90 度位相変調している直交位相区間を少なくとも1つ有する計測用光信号を生成する計測用光信号発生部と、前記計測用光信号の分波である計測光及び参照光の間に前記所定の時間間隔の整数倍の時間だけ遅延を設け、外力により光路長を変動させられた前記計測光と前記参照光を結合して干渉光信号を生成する光干渉部と、前記干渉光信号に基づいて、前記計測光と前記参照光の位相差を算出する位相差演算部とを備え、前記位相差演算部は、 90 度位相変調していない同位相区間における前記計測光及び前記同位相区間における前記参照光の結合により生成される前記干渉光信号の電気信号1と、前記同位相区間における前記計測光及び前記直交位相区間における前記参照光の結合により生成される前記干渉光信号の電気信号2と、前記直交位相区間における前記計測光及び前記同位相区間における前記参照光の結合により生成される前記干渉光信号の電気信号3を少なくとも用い、前記電気信号1及び前記電気信号2の差分並びに前記電気信号3及び前記電気信号1の差分より前記位相差を算出することにより達成される。

30

【0016】

また、本発明の上記目的は、前記位相差演算部は、前記電気信号1として、区間が異なる電気信号11及び電気信号12を用いることにより、或いは、前記計測用光信号発生部は、連続する4つの区間のうち、3番目の区間が前記直交位相区間で、他の3つの区間が前記同位相区間である前記計測用光信号を生成し、前記光干渉部は、前記計測光及び前記参照光の間に前記所定の時間間隔だけ遅延を設けることにより、或いは、前記計測用光信号発生部は、連続する5つの区間のうち、3番目の区間が前記直交位相区間で、他の4つの区間が前記同位相区間である前記計測用光信号を生成し、前記光干渉部は、前記計測光及び前記参照光の間に前記所定の時間間隔だけ遅延を設けることにより、或いは、ホモダイン型又はマッハツェンダ型であることにより、より効果的に達成される。

40

【発明の効果】

【0017】

本発明によれば、光信号をフォトダイオードにより検波して得られた電気信号の計測値が、その電気信号を増幅する目的で挿入する交流アンプ内で直列に挿入されるキャパシタにより影響を受ける場合も、計測値間の差分を取ることにより、その影響を排除して正確で高性能な計測を可能とする。これにより、光源のレベル変動、伝送路の損失変動、光力

50

ブラの温度変動等が許容できるため、環境条件の厳しい場所での使用に適し、個々の部品の使用条件をゆるくできることから、製造コストを安くできる。

【 0 0 1 8 】

本発明によれば、直交する 2 つの参照光と計測光の位相差 θ を簡単に求めることが出来、また通常の干渉計では、計測範囲が 180 度 (π) に制限されるのに対して、1 計測周期内で計測位相が ± 90 度 ($\pi/2$) 以上変化しない条件の下で、計測範囲を拡大可能である。

【 0 0 1 9 】

また、光パルスの代わりに連続光線の使用が可能であるから、コスト低減を図ることができる。

【図面の簡単な説明】

【 0 0 2 0 】

【図 1】本発明に係る光ファイバセンサの構成例（第 1 実施形態）を示すブロック図である。

【図 2】本発明に係る光ファイバセンサの動作例（第 1 実施形態）を示すタイムチャートである。

【図 3】第 1 実施形態の他の動作例を示すタイムチャートである。

【図 4】本発明に係る光ファイバセンサの構成例（第 2 実施形態）を示すブロック図である。

【図 5】本発明に係る光ファイバセンサの動作例（第 2 実施形態）を示すタイムチャートである。

【図 6】本発明に係る光ファイバセンサの光干渉部の構成例（第 3 実施形態）を示すブロック図である。

【図 7】本発明に係る光ファイバセンサの光干渉部の構成例（第 4 実施形態）を示すブロック図である。

【図 8】本発明に係る光ファイバセンサの光干渉部の構成例（第 5 実施形態）を示すブロック図である。

【図 9】第 4 実施形態において反射ミラーを直接距離計測物表面に実装した構成例を示すブロック図である。

【図 10】第 4 実施形態において反射ミラーの代わりにファラデーローテータミラーを使用した構成例を示すブロック図である。

【発明を実施するための形態】

【 0 0 2 1 】

本発明に係る光ファイバセンサは、高安定のレーザ発振器を光源として、周期 T で、例えば、その周期中に時間 τ をもつ計測区間 t_1 、 t_2 、 t_3 及び t_4 を設け、その t_3 区間の相対位相を t_1 、 t_2 及び t_4 区間に対して 90 度（進み或いは遅れのどちらでも良い）変化させたレーザ光を作成する。 t_3 区間が直交位相区間であり、 t_1 、 t_2 及び t_4 区間が同位相区間となる。光の位相はリチューム・ナイオベートを利用した位相変調器等により高速で変化可能である。

【 0 0 2 2 】

以下、ホモダイン型（マイケルソン型とも言う）干渉計を例として、本発明の原理について説明する。なお、マッハツェンダ型の場合も原理は同一である。

【 0 0 2 3 】

上記の計測用のレーザ光（計測用光信号）を光カプラにより 2 波に分波し、第 1 の分波を光遅延ファイバ等で $\tau/2$ 時間遅延させた後に、センサ信号となる外力等により、その光路長を変化させて、ミラーにより全反射した戻り光を再度光遅延ファイバ等で $\tau/2$ 時間遅延させて、上記の光カプラに戻した光を t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 の順に、計測光（ ϕ_{1a} 、 ϕ_{2a} 、 ϕ_{3a} 、 ϕ_{4a} ）とする。第 2 の分波をミラーにより全反射させた戻り光を参照光（ ϕ_{1b} 、 ϕ_{2b} 、 ϕ_{3b} 、 ϕ_{4b} ）とし、上記の光カプラの戻り出力において、周期 T 内の計測区間 t_1 、 t_2 、 t_3 及び t_4 に対応して、参照光の t_2 （ ϕ_{2b} ）と

10

20

30

40

50

計測光の t_1 ($\phi_1 a$) との干渉部分 (マイケルソン干渉部分) (I_1)、参照光の t_3 ($\phi_3 b$) と計測光の t_2 ($\phi_2 a$) との干渉部分 (I_2)、及び参照光の t_4 ($\phi_4 b$) と計測光の t_3 ($\phi_3 a$) との干渉部分 (I_3) を有する時分割多重光信号 (干渉光信号) を出力する。

【0024】

上記の時分割多重光信号 (I_1 、 I_2 、 I_3) をフォトダイオード検波により電気信号に変換し、その個々の電気信号値 i_1 、 i_2 及び i_3 を得て、各電気信号値に対応する干渉時の参照光と計測光との位相差を θ_1 、 θ_2 及び θ_3 とすると、電気信号値 i_1 、 i_2 及び i_3 を、参照光の電気信号値 r 及び計測光の電気信号値 s を用いて表すと、フォトダイオード検波は 2 乗検波であるので、下記数 4、数 5 及び数 6 となる。

10

【0025】

【数 4】

$$i_1 = r + s + 2\sqrt{r \times s} \times \cos \theta_1$$

【0026】

【数 5】

$$i_2 = r + s + 2\sqrt{r \times s} \times \cos \theta_2 = r + s + 2\sqrt{r \times s} \times \cos \left(\theta_1 - \frac{\pi}{2} \right)$$

【0027】

20

【数 6】

$$i_3 = r + s + 2\sqrt{r \times s} \times \cos \theta_3 = r + s + 2\sqrt{r \times s} \times \cos \left(\theta_1 + \frac{\pi}{2} \right)$$

ここで、干渉結果の電気信号間の差分 $i_1 - i_2$ 及び $i_3 - i_1$ を演算すると、下記数 7 及び数 8 となる。

【0028】

【数 7】

$$i_1 - i_2 = 2(\cos \theta_1 - \cos \theta_2) \times \sqrt{r \times s} = 2\sqrt{2 \times r \times s} \times \cos \left(\theta_1 + \frac{\pi}{4} \right)$$

30

【0029】

【数 8】

$$i_3 - i_1 = 2(\cos \theta_3 - \cos \theta_1) \times \sqrt{r \times s} = -2\sqrt{2 \times r \times s} \times \cos \left(\theta_1 - \frac{\pi}{4} \right)$$

数 7 を数 8 で除算すると、下記数 9 となる。

【0030】

【数 9】

$$\frac{i_1 - i_2}{i_3 - i_1} = \frac{\cos \left(\theta_1 + \frac{\pi}{4} \right)}{-\cos \left(\theta_1 - \frac{\pi}{4} \right)} = \frac{\sin \left(\theta_1 - \frac{\pi}{4} \right)}{\cos \left(\theta_1 - \frac{\pi}{4} \right)} = \tan \left(\theta_1 - \frac{\pi}{4} \right)$$

40

よって、計測される電気信号値 i_1 、 i_2 、 i_3 から計算される ($i_1 - i_2$) 及び ($i_3 - i_1$) の逆正接計算から、参照光と計測光の位相差 θ_1 を求めることが出来る。

【0031】

なお、逆正接関数では ± 90 度 ($\pi/2$) しか表現出来ないが、計測周期 T の間に計測値が ± 90 度の範囲を超えて変化しないという条件の下では、前回の計測から今回の計測

50

の間に、計測値が + 90 度を超えた場合及び計測値が - 90 度を下回った場合の判断は、簡単に可能である。これにより、本発明に係る光ファイバセンサは、± 90 度を超える非常に大きな位相変化に対応した広範囲な干渉計測を可能とする。

【 0 0 3 2 】

また、本発明に係る光ファイバセンサでは、レーザ光源を分岐した光信号の電気出力レベルを表す r 及び s は、演算結果には無関係で、 r 及び s が温度変化や経時変化等により変動した場合においても、この変動が計測結果に影響することはないという優位点を有する。

【 0 0 3 3 】

光 / 電気変換を行なうフォトダイオード検波器の出力電圧は非常に小さいため、出力電圧をトランスインピーダンスアンプ等により増幅して使用することが必要である。このような増幅器は、一般に高周波数においても高い増幅率が求められることから、増幅素子間にキャパシタを挿入した交流専用アンプが使用される。従って、実際に i_1 、 i_2 及び i_3 の正確な計測値を求めることが困難な場合が多い。しかし、本発明に係る光ファイバセンサは、上述のように、3つの計測値 i_1 、 i_2 及び i_3 を計測し、その差分を演算し、逆正接計算により参照光と計測光間の角度を求めており、実際に必要な値は、 i_1 、 i_2 及び i_3 の計測値ではなく、 $i_1 - i_2$ 及び $i_3 - i_1$ という計測値間の差分である。よって、途中にキャパシタをシリーズに挿入した交流専用アンプを使用することにより、 i_1 、 i_2 及び i_3 の計測値が正確にその振幅を表さない場合も、その差分は正確であり、演算結果も正確である。

【 0 0 3 4 】

また、キャパシタ容量が非常に小さく、周期 T における i_1 、 i_2 及び i_3 に交流アンプの影響がある場合は、周期 T 内に、例えば時間 t をもつ計測区間 $t_1 \sim t_5$ を設け、その t_3 区間の相対位相を t_1 、 t_2 、 t_4 及び t_5 区間に対して 90 度変化させたレーザ光を作成する。この場合、 t_3 区間が直交位相区間であり、 t_1 、 t_2 、 t_4 及び t_5 区間が同位相区間となる。そして、第 1 の分波を計測光 ($\phi_1 a$ 、 $\phi_2 a$ 、 $\phi_3 a$ 、 $\phi_4 a$ 、 $\phi_5 a$) とし、第 2 の分波をミラーにより全反射させた戻り光を参照光 ($\phi_1 b$ 、 $\phi_2 b$ 、 $\phi_3 b$ 、 $\phi_4 b$ 、 $\phi_5 b$) として、光カプラの戻り出力において、周期 T 内の計測区間 t_2 、 t_3 、 t_4 及び t_5 に対応して、参照光の t_2 ($\phi_2 b$) と計測光の t_1 ($\phi_1 a$) との干渉部分 (I_1)、参照光の t_3 ($\phi_3 b$) と計測光の t_2 ($\phi_2 a$) との干渉部分 (I_2)、参照光の t_4 ($\phi_4 b$) と計測光の t_3 ($\phi_3 a$) との干渉部分 (I_3)、及び参照光の t_5 ($\phi_5 b$) と計測光の t_4 ($\phi_4 a$) との干渉部分 (I_4) を有する時分割多重光信号 (I_1 、 I_2 、 I_3 、 I_4) を生成する。その $I_1 \sim I_4$ の電気信号に変換された信号 $i_1 \sim i_4$ から、下記数 10 を用いて、参照光と計測光の位相差 θ_1 を求める。

【 0 0 3 5 】

【 数 1 0 】

$$\frac{i_1 - i_2}{i_3 - i_4} = \frac{\cos\left(\theta_1 - \frac{\pi}{4}\right)}{\cos\left(\theta_1 + \frac{\pi}{4}\right)} = \frac{\sin\left(\theta_1 + \frac{\pi}{4}\right)}{\cos\left(\theta_1 + \frac{\pi}{4}\right)} = \tan\left(\theta_1 + \frac{\pi}{4}\right)$$

これにより、キャパシタ容量が非常に小さく、計測される電気信号の大きさが計測区間の時間内で変動する状態においても、隣り合う電気信号間の差分は、原計測値に正確に比例し、その比例定数はキャパシタの容量により一義的に決定されるので、計測結果がキャパシタ容量の大小による影響を受けない光ファイバセンサを提供することが可能である。

【 0 0 3 6 】

以下に、本発明の実施の形態を、図面を参照して説明する。

【 0 0 3 7 】

図 1 は、ホモダイン型で、干渉部分が I 1 ~ I 3 の場合の本発明に係る光ファイバセンサの構成例（第 1 実施形態）である。

【 0 0 3 8 】

レーザ光源 1 0 1 が発生する狭線幅の光信号 S r に対して、光位相変調器 1 0 2 により、周期 T 中の t 3 区間のみの位相を、他の t 1、t 2 及び t 4 区間に比較して 9 0 度変化させる。位相を変化させるタイミング及び変化させる時間 τ はパルス発生器 1 1 3 により管理される。間歇的に位相変化を与えられた光信号（計測用光信号）S r a 1 は、光カプラ 1 0 3 に供給され 2 分岐される。光カプラ 1 0 3 は、ファイバカブラやビームスプリッタ等で構成される。

【 0 0 3 9 】

光カプラ 1 0 3 の片方の分岐光信号は、コリメータ 1 0 6 により空間を進行し、反射ミラー 1 0 8 にて反射され、再度コリメータ 1 0 6 を経て光カプラ 1 0 3 に参照光 S r R 1 として帰ってくる。他方、光カプラ 1 0 3 で分岐された他の分岐光信号は光遅延ファイバ等の遅延線 1 0 4 によって、参照光 S r R 1 に対して $\tau / 2$ の遅延を与えられた後、ファイバセンサ 1 0 5 に導かれる。ファイバセンサ 1 0 5 は、光ファイバに加えられた外圧により、ファイバの屈折率或いは実効長が変化するようなセンサである。ファイバセンサ 1 0 5 を通過した分岐光信号は、コリメータ 1 0 7 により空中を伝搬し、反射ミラー 1 0 9 で反射され、コリメータ 1 0 7 及びファイバセンサ 1 0 5 を経由し、遅延線 1 0 4 で再度 $\tau / 2$ の遅延を受けて計測光 S r M 1 として光カプラ 1 0 3 に供給される。なお、遅延線は、参照光側に挿入することも可能で、その場合も同じ光ファイバセンサを構成出来る。

【 0 0 4 0 】

コリメータ 1 0 6 からの参照光 S r R 1 及び遅延線 1 0 4 からの計測光 S r M 1 は、共に光カプラ 1 0 3 に加えられ、その合成光出力が干渉光信号 L i 1 として光 / 電気 (O / E) 変換器 1 1 4 に供給され、干渉光信号 L i 1 に応じた電気信号 E a 1 を得る。光 / 電気変換器 1 1 4 は、光信号を 2 乗検波するダイオード検波器である。光 / 電気変換器 1 1 4 から出力される電気信号 E a 1 は、R F アンプ 1 1 5 で所要の大きさまで増幅された後、A / D 変換器 1 1 6 でアナログ信号からデジタル信号の電気信号 E d 1 に変換される。電気信号 E d 1 は、レジスタ 1 1 7、1 1 8 及び 1 1 9 に供給され、パルス発生器 1 1 3 から送られてくるタイミング信号に従って、後述するタイムチャートでの干渉部分 I 1、I 2 及び I 3 の電気信号値 i 1、i 2 及び i 3 を、それぞれのレジスタ上に得る。レジスタ 1 1 7 ~ 1 1 9 に格納された電気信号値 i 1 ~ i 3 により、次の差分演算器 1 2 1 により、干渉位相を示す電気信号間の差分、つまり $i 1 - i 2$ 及び $i 3 - i 1$ が計算される。差分演算器 1 2 1 で求められた $i 1 - i 2$ 及び $i 3 - i 1$ より A T A N 演算器 1 2 2 が、 $(i 1 - i 2) / (i 3 - i 1)$ の逆正接計算を行ない、数 1 0 の関係から参照光 S r R 1 と計測光 S r M 1 の位相差 $\theta 1$ を計算する。A T A N 演算器 1 2 2 の出力が求めている最終結果となる。

【 0 0 4 1 】

図 1 に示される構成例において、レーザ光源 1 0 1 及び光位相変調器 1 0 2 で計測用光信号発生部を構成し、光カプラ 1 0 3、遅延線 1 0 4、ファイバセンサ 1 0 5、コリメータ 1 0 6 及び 1 0 7、並びに反射ミラー 1 0 8 及び 1 0 9 で光干渉部を構成し、光 / 電気変換器 1 1 4、R F アンプ 1 1 5、A / D 変換器 1 1 6、レジスタ 1 1 7 ~ 1 1 9、差分演算器 1 2 1 及び A T A N 演算器 1 2 2 で位相差演算部を構成している。

【 0 0 4 2 】

このような構成において、その動作例を、図 2 のタイムチャートを参照して説明する。

【 0 0 4 3 】

図 2 は、第 1 実施形態の動作例を示すタイムチャートである。a 1 は周期 T における参照光 S r R 1 の位相を示し、a 2 は計測光 S r M 1 の位相を示し、a 3 は干渉結果として得られる干渉光信号 L i 1 の干渉部分 (I 1 ~ I 3) の位相を示す。「0」は位相を変化させられていない基準位相を表わし、「9 0」は 9 0 度位相を変化させられた位相（以下、「9 0 度位相」とする）を表わし、「A」は任意の位相を表わす。

【 0 0 4 4 】

a 1 に示すように、参照光 S r R 1 は周期 T 内の t 1、t 2 及び t 4 区間の位相が基準位相、t 3 区間の位相が 90 度位相になるように作成される。また、a 2 に示す計測光 S r M 1 は、参照光 S r R 1 を各区間の時間間隔である τ だけ遅延させたものとなる。a 3 は、上記 a 1 に示す参照光 S r R 1 及び a 2 に示す計測光 S r M 1 を干渉させた干渉光信号 L i 1 の様子を示している。干渉光信号 L i 1 のうち、参照光 S r R 1 の t 2 の位置と計測光 S r M 1 の t 1 の位置が干渉した結果が干渉部分 I 1 であり、同様に、t 3 と t 2 が干渉した結果が干渉部分 I 2、t 4 と t 3 が干渉した結果が干渉部分 I 3 である。これら干渉部分の電気信号値 i 1、i 2 及び i 3 から、参照光 S r R 1 と計測光 S r M 1 の位相差 $\theta 1$ が求められる。

10

【 0 0 4 5 】

なお、周期 T 中での 90 度位相の区間は図 2 に示されるような t 3 区間に限られず、干渉光信号において、参照光と計測光の位相の組み合わせとして「0 - 0」、「90 - 0」及び「0 - 90」の 3 パターンが形成されるのであれば、90 度位相の区間の位置を変えたり、同区間の数を増やしたりしても良い。例えば、図 3 (A) に示されるように、t 2 区間の位相を 90 度位相としても良い。或いは、図 3 (B) に示されるように、t 3 区間の位相を 90 度位相とし、t 4 区間の隣の t 5 区間の位相を基準位相とし、計測光の遅延を 2τ として、干渉光信号中に「0 - 0」、「90 - 0」及び「0 - 90」の 3 パターンを形成するようにしても良い。

【 0 0 4 6 】

20

本発明の他の実施形態について説明する。

【 0 0 4 7 】

図 4 は、ホモダイン型で、干渉部分が I 1 ~ I 4 の場合の本発明に係る光ファイバセンサの構成例（第 2 実施形態）である。

【 0 0 4 8 】

レーザ光源 101 が発生する狭線幅の光信号 S r に対して、光位相変調器 202 により、周期 T 中の t 3 区間のみの位相を、他の t 1、t 2、t 4 及び t 5 区間に比較して 90 度変化させる。位相を変化させるタイミング及び変化させる時間 τ はパルス発生器 113 により管理される。間歇的に位相変化を与えられた光信号（計測用光信号）S r a 2 は、光カプラ 103 に供給され 2 分岐される。

30

【 0 0 4 9 】

光カプラ 103 の片方の分岐光信号は、コリメータ 106 により空間を進行し、反射ミラー 108 にて反射され、再度コリメータ 106 を経て光カプラ 103 に参照光 S r R 2 として帰ってくる。他方、光カプラ 103 で分岐された他の分岐光信号は遅延線 104 によって、参照光 S r R 2 に対して $\tau/2$ の遅延を与えられた後、ファイバセンサ 105 に導かれる。ファイバセンサ 105 を通過した分岐光信号は、コリメータ 107 により空中を伝搬し、反射ミラー 109 で反射され、コリメータ 107 及びファイバセンサ 105 を経由し、遅延線 104 で再度 $\tau/2$ の遅延を受けて計測光 S r M 2 として光カプラ 103 に供給される。

【 0 0 5 0 】

40

コリメータ 106 からの参照光 S r R 2 及び遅延線 104 からの計測光 S r M 2 は、共に光カプラ 103 に加えられ、その合成光出力が干渉光信号 L i 2 として光 / 電気変換器 114 に供給され、干渉光信号 L i 2 に応じた電気信号 E a 2 を得る。光 / 電気変換器 114 から出力される電気信号 E a 2 は、RF アンプ 115 で所要の大きさまで増幅された後、A / D 変換器 116 でアナログ信号からデジタル信号の電気信号 E d 2 に変換される。電気信号 E d 2 は、レジスタ 117、118、119 及び 120 に供給され、パルス発生器 113 から送られてくるタイミング信号に従って、後述するタイムチャートでの干渉部分 I 1、I 2、I 3 及び I 4 の電気信号値 i 1、i 2、i 3 及び i 4 を、それぞれのレジスタ上に得る。レジスタ 117 ~ 120 に格納された電気信号値 i 1 ~ i 4 により、次の差分演算器 221 により、干渉位相を示す電気信号間の差分、つまり i 1 - i 2 及び i

50

3 - i_4 が計算される。差分演算器 221 で求められた $i_1 - i_2$ 及び $i_3 - i_4$ より A T A N 演算器 122 が $(i_1 - i_2) / (i_3 - i_4)$ の逆正接計算を行ない、数 11 の関係から参照光 S_{rR2} と計測光 S_{rM2} の位相差 θ_1 を計算する。A T A N 演算器 122 の出力が求めている最終結果となる。

【0051】

このような構成において、その動作例を、図 5 のタイムチャートを参照して説明する。

【0052】

図 5 は、第 2 実施形態の動作例を示すタイムチャートである。b1 は周期 T における参照光 S_{rR2} の位相を示し、b2 は計測光 S_{rM2} の位相を示し、b3 は干渉結果として得られる干渉光信号 L_{i2} の干渉部分 ($I_1 \sim I_4$) の位相を示す。「0」、「90」及び「A」の意味は、図 2 の場合と同じである。

10

【0053】

b1 に示すように、参照光 S_{rR2} は周期 T 内の t_1 、 t_2 、 t_4 及び t_5 区間の位相が基準位相、 t_3 区間の位相が 90 度位相になるように作成される。また、b2 に示す計測光 S_{rM2} は、参照光 S_{rR2} を各区間の時間間隔である τ だけ遅延させたものとなる。b3 は、上記 b1 に示す参照光 S_{rR2} 及び b2 に示す計測光 S_{rM2} を干渉させた干渉光信号 L_{i2} の様子を示している。干渉光信号 L_{i2} のうち、参照光 S_{rR2} の t_2 位置と計測光 S_{rM2} の t_1 位置が干渉した結果が干渉部分 I_1 であり、同様に、 t_3 と t_2 が干渉した結果が干渉部分 I_2 、 t_4 と t_3 が干渉した結果が干渉部分 I_3 、 t_5 と t_4 が干渉した結果が干渉部分 I_4 である。これら干渉部分の電気信号値 i_1 、 i_2 、 i_3 及び i_4 から、参照光 S_{rR2} と計測光 S_{rM2} の位相差 θ_1 が求められる。

20

【0054】

なお、周期 T 中での 90 度位相の区間は図 5 に示されるような t_3 区間に限られず、干渉光信号において、参照光と計測光の位相の組み合わせとして「0 - 0」、「90 - 0」、「0 - 90」及び「0 - 0」の 4 パターンが形成されるのであれば、90 度位相の区間の位置を変えたり、同区間の数を増やしたりしても良い。

【0055】

第 1 実施形態及び第 2 実施形態はホモダイン型の構成例であるが、干渉計の構成方法には、ホモダイン型の他に、マッハツェンダ型がある。ホモダイン型は、入出力の分離が十分行えない場合があるが、マッハツェンダ型は、入出力で別の光カプラを使用するので、入出力の分離が容易である。

30

【0056】

図 6 は、マッハツェンダ型センサでの光干渉部の概略の構成例（第 3 実施形態）である。光カプラ 103 に供給された間歇的に位相変化を与えられた光信号（計測用光信号） S_{ra} は、光カプラ 103 で 2 分岐され、一方の分岐光信号は、次の光カプラ 110 に参照光 S_{rR} として供給される。他方の分岐光信号は、 τ の遅延を有する遅延線 204 を経てファイバセンサ 105 に供給される。ファイバセンサ 105 は、光ファイバに加えられた外圧により、ファイバの屈折率或いは実効長が変化するようにセンサであり、検出すべき計測項目によりその光路長が変化するものである。ファイバセンサ 105 の出力光信号も、また計測光 S_{rM} として光カプラ 110 に供給され、光カプラ 110 の出力として、ファイバセンサ 105 で位相変調された干渉光信号 L_i が得られる。

40

【0057】

上述の実施形態（第 1 ～ 第 3 実施形態）は、ファイバが受ける各種の歪みで、計測すべき事象を検出する例である。これらに対して、図 7 に示す構成例は、本発明に係るホモダイン型光ファイバセンサにより、物体の相対位置変動を検出する光干渉部の構成例（第 4 実施形態）である。

【0058】

光カプラ 103 に加えられた光信号 S_{ra} を同光カプラで 2 分岐し、一方の分岐光信号を、コリメータ 106 を介して空中伝搬させ、反射ミラー 108 で反射させ、再度空中を伝搬してコリメータ 106 を介して光カプラ 103 へ参照光 S_{rR} として戻す。他方の分

50

岐光信号は $\tau/2$ の遅延を有する遅延線 104 を経て、コリメータ 107 で空中を伝搬させられる。この空中を伝搬した光信号は、相対距離変動を計測すべき物体に固定した光学プリズム又はコーナーキューブ 111 により、その光学プリズム等に入射した光信号と同じ方向に反射させられる。この光学プリズム 111 で反射した光信号を、更に反射ミラー 109 で反射する。この反射波は、再度、光学プリズム 111、コリメータ 107 及び遅延線 104 を通って、光カプラ 103 に計測光 $S_r M$ として戻される。光カプラ 103 は、参照光 $S_r R$ 及び計測光 $S_r M$ の両者を干渉させて、出力端子から干渉光信号 L_i を出力する。

【0059】

図 8 は、図 7 に示される距離計測用ホモダイン型光ファイバセンサを、マッハツェンダ型に変更した光干渉部の構成例（第 5 実施形態）である。光カプラ 103 で 2 分岐された光信号の一方は、次の光カプラ 110 へ参照光 $S_r R$ として供給される。光カプラ 103 で 2 分岐された、他の一方の光信号は、 τ の遅延を有する遅延線 204 を介して、コリメータ 107 で空中を伝搬させられる。この空中を伝搬した光信号は、相対距離変動を計測すべき物体に固定した光学プリズム又はコーナーキューブ 111 により、その光学プリズム等に入射した光信号と同じ方向に反射させられる。この光学プリズム 111 で反射した光信号を別のコリメータ 112 で受波し、その光信号を計測光 $S_r M$ として光カプラ 110 に供給する。光カプラ 110 は、参照光 $S_r R$ 及び計測光 $S_r M$ の両者を干渉させて、出力端子から干渉信号 L_i を出力する。

【0060】

図 7 に示される構成例では、コリメータ 107 から空間に出た計測光を、相対距離変動を計測すべき物体に固定した光学プリズム又はコーナーキューブ 111 で反射しているが、図 9 に示すように、光学プリズム又はコーナーキューブ 111 を削除して、反射ミラー 109 を直接距離計測物表面に実装することも可能である。

【0061】

これまでの説明では光ファイバによる偏波変動が測定結果に及ぼす影響についての説明を行っていないが、光ファイバによる偏波変動は測定値に影響を与え、結果として誤差を生ずる場合がある。偏波変動による測定誤差を無くす、或いは小さくするには、光ファイバに偏波保持型のものを使用すれば良い。或いは、図 7 に示される構成例において、図 10 に示すように、反射ミラー 108 及び 109 の代わりに、ファラデーローテータミラー 208 及び 209 を使用することにより、偏波保持型ファイバを使用しない、つまりシングルモードファイバを使用して、誤差の少ない測定が可能となる。

【0062】

上述の実施形態（第 1 ～ 第 5 実施形態）では、計測対象の変化（つまり、光路長変化）が計測光のみに与えられる場合を例にして説明したが、参照光側と計測光側がお互いに逆相になるような変化、例えば、位置が変化する物体の表と裏の変化、を参照光と計測光の両方に与えることにより、センサの感度を 2 倍に向上することが可能である。

【0063】

また、上述の実施形態では、計測用のレーザ光として連続光線を使用しているが、 $t_1 \sim t_4$ 区間（又は $t_1 \sim t_5$ 区間）に対応する光パルスを利用してシステムを構築することも可能である。この場合、コスト低減の効果は少なくなるが、周期 T 中に複数の $t_1 \sim t_4$ 区間（又は $t_1 \sim t_5$ 区間）の光パルスを収容すれば、1 つのシステムで複数の計測を行う時分割多重測定が可能となる。

【0064】

更に、上述の実施形態においては、ファイバの光路長変化を検出するセンサ、物体の相対変動を検出するセンサ（距離計や振動センサ）の例を示したが、本発明は、その他温度センサ等、多くのセンサに適用可能である。

【産業上の利用可能性】

【0065】

本発明は、海底地震観測等、離れた場所、電源供給ができない場所、電磁雑音の影響を

10

20

30

40

50

受け易い場所、温度環境が厳しい場所、引火の可能性がある場所等に設置するセンサシステムに適する。

【符号の説明】

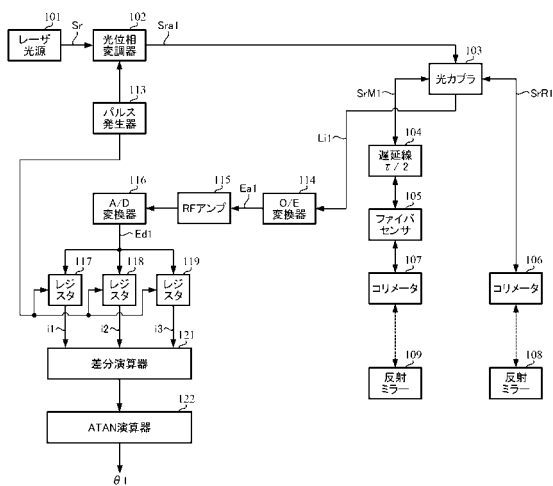
【0066】

101	レーザ光源
102	光位相変調器
103、110	光カプラ
104、204	遅延線
105	ファイバセンサ
106、107、112	コリメータ
108、109	反射ミラー
111	光学プリズム
113	パルス発生器
114	光／電気変換器
115	RFアンプ
116	A／D変換器
117、118、119、120	レジスタ
121、221	差分演算器
122	ATAN演算器
208、209	ファラデーロータミラー

10

20

【図1】



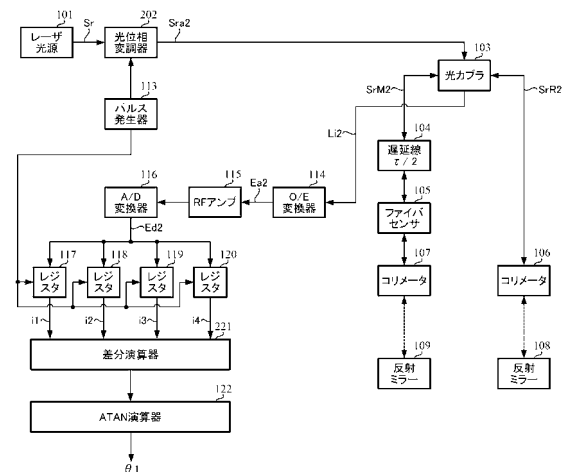
【図2】



【図3】



【図4】



【図 5】

		周期 T																
参照光 b1		t1	t2	t3	t4	t5						t1	t2	t3	t4	t5		
		A	0	0	90	0	0	A	A			A	A	0	0	90	0	0
計測光 b2		t1	t2	t3	t4	t5						t1	t2	t3	t4	t5		
		A	0	0	90	0	0	A	A			A	0	0	90	0	0	A
干渉光 b3		t1 t2 t3 t4 t5										t1 t2 t3 t4 t5						
		0-0 90-90-90 0-0										0-0 90-0 90 0-0						
															</			

フロントページの続き

F ターム(参考) 2F064 AA01 CC01 EE04 FF01 GG02 GG12 GG13 JJ01
2F065 AA02 DD04 EE03 FF52 GG04 HH03 JJ18 LL02 LL12 LL46
QQ03 QQ25 QQ28 QQ31
2F103 BA27 BA41 CA08 CA10 EB02 EB12 EC03 EC08 EC09 EC11
EC13 ED27