

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7396382号
(P7396382)

(45)発行日 令和5年12月12日(2023.12.12)

(24)登録日 令和5年12月4日(2023.12.4)

(51)国際特許分類 F I
G 0 1 D 5/353(2006.01) G 0 1 D 5/353 B

請求項の数 4 (全14頁)

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>(21)出願番号 特願2022-36860(P2022-36860)</p> <p>(22)出願日 令和4年3月10日(2022.3.10)</p> <p>(65)公開番号 特開2023-131864(P2023-131864 A)</p> <p>(43)公開日 令和5年9月22日(2023.9.22)</p> <p>審査請求日 令和4年3月10日(2022.3.10)</p> <p>(出願人による申告) 国等の委託研究の成果に係る特許出願(国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構「NEDO先導研究プログラム/エネルギー・環境新技術先導研究プログラム/超高温設備の革新的オンライン監視システムの開発」、産業技術力強化法第17条の適用を受ける特許出願)</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</p> <p>(74)代理人 100141955 弁理士 岡田 宏之</p> <p>(74)代理人 100085419 弁理士 大垣 孝</p> <p>(72)発明者 小泉 健吾 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</p> <p>審査官 吉田 久</p> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 光ファイバセンサ及びブリルアン周波数シフト測定方法

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

プローブ光を生成する光源部と、
前記プローブ光により測定対象となる光ファイバで発生する後方ブリルアン散乱光を、2分岐する分岐部と、
前記分岐部で2分岐された一方の散乱光が入力されて、自己遅延型のホモダイン干渉により干渉信号を生成する干渉信号取得部と、
前記分岐部で2分岐された他方の散乱光が入力されて、前記散乱光の強度を示す強度信号を生成する強度取得部と、
前記干渉信号及び前記強度信号から、ブリルアン周波数シフト量を取得するブリルアン周波数シフト取得部と
を備え、
前記干渉信号取得部は、
入力された散乱光を第1光路及び第2光路に2分岐する分岐部と、
前記第1光路に設けられ、前記ブリルアン周波数シフト取得部からの指示に応じて散乱光の位相を変化させることができる遅延部と、
前記第1光路及び前記第2光路を経て受け取った光を合波して干渉光を生成する合波部とを有する自己遅延型のホモダイン干渉計、及び、
前記干渉光を電気信号に変換して干渉信号を生成する干渉光受光部
を備え、

10

20

前記ブリルアン周波数シフト取得部は、

予め設定された基準区間の、前記干渉信号の平均強度を取得する基準区間平均値計算手段と、

前記第1光路を伝播する散乱光の位相を、0から2πまで掃引するように前記遅延部を制御できる位相制御手段と、

前記強度信号を用いて、前記干渉信号からブリルアン散乱係数を除去する、ブリルアン散乱係数除去手段と、

前記位相を0から2πまで掃引して得られた、前記基準区間の前記干渉信号の平均強度 I_{ave} から、位相と前記平均強度 I_{ave} の関係を取得し、前記関係を用いて、干渉信号の振幅、及び、ブリルアン周波数シフトの測定範囲を規定する初期位相 $offset$ を取得する、位相及び振幅計算手段と、

ブリルアン散乱係数が除去された干渉信号を、前記干渉信号の振幅を用いて規格化する、規格化手段と、

規格化された干渉信号を用いてブリルアン周波数シフトを算出するブリルアン周波数シフト算出手段と

を備える

ことを特徴とする光ファイバセンサ。

【請求項2】

前記位相制御手段は、前記基準区間の平均強度 I_{ave} が、前記初期位相 $offset$ に対応する初期強度 I_{offset} に一致するように、前記遅延部における位相を制御できる

ことを特徴とする請求項1に記載の光ファイバセンサ。

【請求項3】

プローブ光を生成する過程と、

前記プローブ光により測定対象となる光ファイバで発生する後方ブリルアン散乱光を2分岐する過程と、

前記2分岐された一方の散乱光を第1光路及び第2光路に2分岐する過程と、

前記第1光路を伝搬する散乱光に遅延を与える過程と、

前記第1光路及び前記第2光路を伝播する散乱光を合波して干渉光を生成する過程と、

前記干渉光を光電変換することにより電気信号である干渉信号を生成する過程と、

前記後方ブリルアン散乱光が2分岐された他方の散乱光から、散乱光強度を示す強度信号を取得する過程と、

前記干渉信号及び前記強度信号からブリルアン周波数シフトを取得する過程とを備え、

前記ブリルアン周波数シフトを取得する過程は、

前記強度信号を用いて、前記干渉信号からブリルアン散乱係数を除去する過程と、

ブリルアン散乱係数が除去された干渉信号を、前記干渉信号の振幅を用いて規格化する過程と、

規格化された干渉信号を用いてブリルアン周波数シフトを算出する過程と

を備え、

通常の測定前に、キャリブレーション測定が行われ、

前記キャリブレーション測定は、

位相を0から2πまで掃引して得られた、予め設定された基準区間の前記干渉信号の平均強度 I_{ave} から、位相と前記平均強度 I_{ave} の関係を取得し、前記関係を用いて、干渉信号の振幅、及び、ブリルアン周波数シフトの測定範囲を規定する初期位相 $offset$ を取得する過程と、

前記第1光路を伝搬する散乱光の位相を初期位相 $offset$ に設定する過程とを備える

ことを特徴とするブリルアン周波数シフト測定方法。

【請求項4】

10

20

30

40

50

通常の測定において、

前記基準区間の平均強度が、前記初期位相 $offset$ に対応する初期強度 I_{offset} に一致するように、前記第1光路を伝播する散乱光の位相を制御することを特徴とする請求項3に記載のブリルアン周波数シフト測定方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

この発明は、ブリルアン散乱光を用いた光ファイバセンサ、及び、ブリルアン周波数シフト測定方法に関する。

【背景技術】

【0002】

光ファイバ通信の発展とともに、光ファイバ自体をセンシング媒体とする分布型光ファイバセンシングが盛んに研究されている。特に、散乱光を利用する光ファイバセンシングは、点ごとに計測する電気センサとは異なり、長距離の分布としての計測が可能であるため、被測定対象全体の物理量を計測することができる。

【0003】

長距離の分布としての計測が可能な分布型光ファイバセンシングとして、光ファイバの片端から光パルスを入射し、光ファイバ中で後方散乱された光を時間に対して測定する時間領域リフレクトメトリ (OTDR: Optical Time Domain Reflectometry) が代表的である。光ファイバ中の後方散乱には、レイリー散乱、ブリルアン散乱及びラマン散乱がある。この中で自然ブリルアン散乱を測定するものはBOTDR (Brillouin OTDR) と呼ばれる (例えば、非特許文献1参照)。

【0004】

ブリルアン散乱は、光ファイバに入射される光パルスの中心周波数に対して、ストークス側及び反ストークス側にGHz程度周波数シフトした位置に観測され、そのスペクトルはブリルアン利得スペクトル (BGS: Brillouin Gain Spectrum) と呼ばれる。BGSの周波数シフト及びスペクトル線幅は、それぞれブリルアン周波数シフト (BFS: Brillouin Frequency Shift) 及びブリルアン線幅と呼ばれる。BFS及びブリルアン線幅は、光ファイバの材質及び入射される光の波長によって異なる。例えば、石英系のシングルモード光ファイバの場合、波長 $1.55\mu\text{m}$ におけるBFSの大きさ及びブリルアン線幅は、それぞれ約 11GHz 及び約 30MHz となることが報告されている。また、非特許文献1からシングルモードファイバ中の歪み、温度の変化に伴うBFSの大きさは波長 $1.55\mu\text{m}$ において、それぞれ $0.049\text{MHz}/\mu$ 、 $1.0\text{MHz}/$ である。

【0005】

このように、BFSは歪みと温度に対して依存性を持つ。このため、BOTDRは橋梁やトンネルなどに代表される大型建造物の劣化診断、プラントの温度モニタリング、及び、地滑りが発生する恐れのある箇所の監視などの目的で利用可能であり、注目されている。

【0006】

BOTDRでは、光ファイバ中で発生する自然ブリルアン散乱光のスペクトル波形を測定するため、別途用意した参照光とのヘテロダイン検波を行うのが一般的である。自然ブリルアン散乱光の強度はレイリー散乱光の強度に比べて2~3桁小さい。このため、ヘテロダイン検波は最小受光感度を向上させる上でも有用となる。

【0007】

ここで、自然ブリルアン散乱光は非常に微弱なため、ヘテロダイン検波を適用しても十分な信号雑音比 (S/N) を確保できない。その結果、S/N改善のための平均化処理が必要となる。BOTDRを行う従来の光ファイバ歪み測定装置では、時間、振幅及び周波数の3次元の情報を取得しているが、平均化処理とこの3次元情報の取得のため、測定時間の短縮が難しい。

【0008】

10

20

30

40

50

これに対し、この出願に係る発明者らにより、自己遅延ヘテロダイン型のBOTDR (SDH-BOTDR: Self-delayed heterodyne BOTDR) を利用する、光ファイバ歪み測定装置及び光ファイバ歪み測定方法が提案されている(例えば、特許文献1参照)。SDH-BOTDRでは、BFSの変化が、受信されるビート信号と局発信号の位相比較をすることで、ビート信号中の位相変化として観測される。このように、SDH-BOTDRは、周波数掃引を必要とせずに直接BFSを算出できるため、高速かつ安価な測定を実現できる。

【0009】

また、この出願に係る発明者らは、自己遅延干渉計として、自己遅延ホモダイン型のBOTDRを利用する、光ファイバ歪み測定装置及び光ファイバ歪み測定方法も提案している(例えば、特許文献2参照)。自己遅延ホモダイン型のBOTDRは、構成がより簡便になるだけでなく、S/Nや空間分解能も向上する。

10

【先行技術文献】

【特許文献】

【0010】

【文献】特開2016-191659号公報

【文献】特開2019-060743号公報

【非特許文献】

【0011】

【文献】T. Kurashima et al., "Brillouin Optical fiber time domain reflectometry", IEICE Trans. Commun., vol. E76-B, no. 4, pp. 382-390 (1993)

20

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0012】

ここで、特許文献1に開示されている自己遅延ヘテロダイン型の技術では、任意の周波数のビート信号が受信信号となる。このため、デジタル信号処理による位相比較だけでなく、包絡線検波によるブリルアン散乱強度などを容易に計算することができる。

【0013】

一方、自己遅延ホモダイン型の技術では、干渉計内の2つの光路間の位相差に応じた強度信号が出力される。この位相と強度の関係は不変でなく、入力されるブリルアン散乱光のS/Nや、受光素子の変換効率などによって変わってしまうため、一意に決定できない。

30

【0014】

この発明は、上述の状況に鑑みてなされたものである。この発明の目的は、位相と強度の関係を取得することで、BFSを算出する、自己遅延ホモダイン型の光ファイバセンサ、及び、ブリルアン周波数シフト測定方法を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0015】

上述した目的を達成するために、この発明の光ファイバセンサは、プローブ光を生成する光源部と、プローブ光により測定対象となる光ファイバで発生する後方ブリルアン散乱光を、2分岐する分岐部と、分岐部で2分岐された一方の散乱光が入力されて、自己遅延型のホモダイン干渉により干渉信号を生成する干渉信号取得部と、分岐部で2分岐された他方の散乱光が入力されて、散乱光の強度を示す強度信号を生成する強度取得部と、干渉信号及び強度信号から、ブリルアン周波数シフト量を取得するブリルアン周波数シフト取得部とを備えて構成される。

40

【0016】

干渉信号取得部は、入力された散乱光を第1光路及び第2光路に2分岐する分岐部と、第1光路に設けられ、ブリルアン周波数シフト取得部からの指示に応じて散乱光の位相を変化させることができる遅延部と、第1光路及び第2光路を経て受け取った光を合波して

50

干渉光を生成する合波部とを有する自己遅延型のホモダイン干渉計、及び、干渉光を電気信号に変換して干渉信号を生成する干渉光受光部を備える。ブリルアン周波数シフト取得部は、予め設定された基準区間の平均強度を取得する基準区間平均値計算手段と、第1光路を伝播する散乱光の位相を、0から2πまで掃引するように遅延部を制御できる位相制御手段と、強度信号を用いて、干渉信号からブリルアン散乱係数を除去する、ブリルアン散乱係数除去手段と、位相を0から2πまで掃引して得られた、基準区間の干渉信号の平均強度 I_{ave} から、位相と平均強度 I_{ave} の関係を取得し、この関係を用いて、干渉信号の振幅、及び、ブリルアン周波数シフトの測定範囲を規定する初期位相 $offset$ を取得する、位相及び振幅計算手段と、ブリルアン散乱係数が除去された干渉信号を、干渉信号の振幅を用いて規格化する、規格化手段と、規格化された干渉信号を用いてブリルアン周波数シフトを算出するブリルアン周波数シフト算出手段とを備える。

10

【0017】

この発明の光ファイバセンサの好適実施形態によれば、位相制御部は、基準区間の平均強度 I_{ave} が、初期位相 $offset$ に対応する初期強度 I_{offset} に一致するように、遅延部における位相を制御できる。

【0018】

また、この発明のブリルアン周波数シフト測定方法は、プローブ光を生成する過程と、プローブ光により測定対象となる光ファイバで発生する後方ブリルアン散乱光を2分岐する過程と、2分岐された一方の散乱光を第1光路及び第2光路に2分岐する過程と、第1光路を伝播する散乱光に遅延を与える過程と、第1光路及び第2光路を伝播する散乱光を合波して干渉光を生成する過程と、干渉光を光電変換することにより電気信号である干渉信号を生成する過程と、後方ブリルアン散乱光が2分岐された他方の散乱光から、散乱光強度を示す強度信号を取得する過程と、干渉信号及び強度信号からブリルアン周波数シフトを取得する過程とを備える。通常の測定前に、キャリブレーション測定が行われ、キャリブレーション測定は、位相を0から2πまで掃引して得られた、基準区間の平均強度 I_{ave} から、位相と、平均強度 I_{ave} の関係を取得し、この関係を用いて、干渉信号の振幅、及び、ブリルアン周波数シフトの測定範囲を規定する初期位相 $offset$ を取得する過程と、遅延部における位相を初期位相 $offset$ に設定する過程とを備える。

20

【0019】

この発明のブリルアン周波数シフト測定方法の好適実施形態によれば、通常の測定において、基準区間の平均強度が、初期位相 $offset$ に対応する初期強度 I_{offset} に一致するように、散乱光の位相を制御する。

30

【発明の効果】

【0020】

この発明の光ファイバセンサ及びブリルアン周波数シフト測定方法によれば、干渉計の一方を伝播する光の位相と、基準区間の平均強度の関係を取得することにより、BFSを一意に決定できる。また、干渉計内の2つの光路間の位相差に応じた強度信号の、位相と強度の関係が、入力されるブリルアン散乱光のS/Nや、受光素子の変換効率などによって変わってしまう場合であっても、基準区間の平均強度が、初期位相 $offset$ に対応する初期強度 I_{offset} に一致するように、散乱光の位相をフィードバック制御すれば、BFSを正しく算出できる。

40

【図面の簡単な説明】

【0021】

【図1】自己遅延ホモダイン型センサを示す模式的なブロック図である。

【図2】自己遅延ホモダイン型センサが備えるBFS取得部の模式的なブロック図である。

【図3】キャリブレーション測定を説明するための模式図である。

【図4】この発明の自己遅延ホモダイン型センサの構成例を示す模式的なブロック図である。

【発明を実施するための形態】

【0022】

50

以下、図を参照して、この発明の実施の形態について説明するが、各図は、この発明が理解できる程度に概略的に示したものに過ぎない。また、以下、この発明の好適な構成例につき説明するが、単なる好適例にすぎない。従って、この発明は以下の実施の形態に限定されるものではなく、この発明の構成の範囲を逸脱せずにこの発明の効果を達成できる多くの変更又は変形を行うことができる。

【0023】

(本発明の原理)

先ず、図1及び図2を参照して、自己遅延ホモダイン型のBOTDRを利用する光ファイバセンサ(以下、自己遅延ホモダイン型センサとも称する。)を説明する。

【0024】

図1は、この発明の、自己遅延ホモダイン型センサを示す模式的なブロック図である。図2は、自己遅延ホモダイン型センサが備えるBFS取得部の模式的なブロック図である。

【0025】

自己遅延ホモダイン型センサは、光源部10、サーキュレータ20、光増幅器30、光バンドパスフィルタ32、分岐部34、干渉信号取得部140、強度取得部141、BFS取得部170及びタイミング制御器90を備えて構成される。

【0026】

光源部10は、プローブ光を生成する。光源部10は、連続光を生成する光源12と、連続光から光パルスを生成する光パルス発生器14を備えて構成される。

【0027】

ここで、この自己遅延ホモダイン型センサは、周波数変化に応じた位相差を測定する。このため、光源12の周波数揺らぎ及び周波数スペクトル線幅(以下、単に線幅とも称する。)は、ブリルアン周波数シフトよりも十分に小さくなければならない。そこで、光源12として周波数安定化狭線幅光源が用いられる。例えば、測定対象となる光ファイバ(以下、被測定光ファイバとも称する。)100の歪みを0.008%としたとき、ブリルアン周波数シフトは4MHzに相当する。このため、0.008%程度の歪みを測定するには、光源12の周波数揺らぎ及び線幅は4MHzより十分に小さく、数10kHz以下であることが望ましい。なお、周波数揺らぎ及び線幅が10kHz程度若しくはそれ以下の狭線幅レーザが、既製品として一般に入手可能である。

【0028】

光パルス発生器14は、任意好適な従来周知の、音響光学(AO: Acoustic Optical)変調器又は電気光学(EO: Electric Optical)変調器を用いて構成される。光パルス発生器14は、タイミング制御器90で生成された電気パルスに応じて、連続光から矩形状の光パルスを生成する。この光パルスの繰り返し周期は、被測定光ファイバ100を光パルスが往復するのに要する時間よりも長く設定される。この光パルスが、プローブ光として、光源部10から出力される。

【0029】

この光源部10から出力されたプローブ光は、サーキュレータ20を経て、被測定光ファイバ100に入射される。なお、サーキュレータ20に換えて、光カプラを用いても良い。

【0030】

被測定光ファイバ100からの後方散乱光は、サーキュレータ20を経て、例えば、エルビウム添加光ファイバ増幅器(EDFA)などで構成される光増幅器30に送られる。光増幅器30で増幅された後方散乱光は、光バンドパスフィルタ32に送られる。光バンドパスフィルタ32は、10GHz程度の透過帯域を有しており、自然ブリルアン散乱光のみを透過する。この光バンドパスフィルタ32から出射される自然ブリルアン散乱光の時刻tにおける電界 $E_{B0}(t)$ は、以下の式(1)で表される。

【0031】

【数1】

10

20

30

40

50

$$E_{B0}(t) = A_{B0}\eta_B(t) \exp\{j(2\pi f_B(t)t + \phi_{B0})\} \quad \dots(1)$$

ここで、 A_{B0} は振幅、 $\eta_B(t)$ はブリルアン散乱係数、 $f_B(t)$ はブリルアン散乱光の光周波数、 ϕ_{B0} は初期位相を示している。なお、ブリルアン散乱係数 $\eta_B(t)$ 及びブリルアン散乱光の光周波数 $f_B(t)$ は、光ファイバ中での局所的な歪みや温度変化により変化するため、時間 t の関数としている。また、ここでは、簡単のため、被測定光ファイバ100での損失は考慮しない。

【0032】

光バンドパスフィルタ32を透過した光は、分岐部34に送られる。分岐部34は、光バンドパスフィルタ32を透過した光を2分岐して、一方の散乱光を干渉信号取得部140に送り、他方の散乱光を強度取得部141に送る。

【0033】

干渉信号取得部140は、自己遅延ホモダイン干渉計150、干渉光受光部160、及び、位相制御回路142を備えて構成される。また、自己遅延ホモダイン干渉計150は、分岐部152、遅延部156、及び、合波部158を備えて構成される。分岐部152及び合波部158は、例えば3dBカプラなど、任意好適な従来公知の光カプラで構成できる。

【0034】

分岐部152は、干渉信号取得部140に送られた光を、第1光路及び第2光路に2分岐する。

【0035】

この構成例では、第1光路に遅延部156が設けられている。遅延部156は、第1光路を伝播する光に時間 τ の遅延を与える。また、遅延部156は、位相制御回路142からの指示で、伝播する光の位相を変化させることができる。

【0036】

合波部158は、第1光路及び第2光路を伝播する光を合波して合波光を生成する。合波部158に入射される、第1光路を伝播する光信号 $E_{B1}(t)$ 及び第2光路を伝播する光信号 $E_{B2}(t - \tau)$ は、それぞれ、以下の式(2)及び(3)で表される。

【0037】

【数2】

$$E_{B1}(t) = A_{B1}\eta_B(t) \exp\{j(2\pi f_B(t)t + \phi_{B1})\} \quad \dots(2)$$

【0038】

【数3】

$$E_{B2}(t - \tau) = A_{B2}\eta_B(t) \exp\{j\{2\pi f_B(t)(t - \tau) + \phi_{B2}\}\} \quad \dots(3)$$

ここで、 A_{B1} 及び A_{B2} は、それぞれ $E_{B1}(t)$ 及び $E_{B2}(t - \tau)$ の振幅であり、 ϕ_{B1} 及び ϕ_{B2} は、それぞれ $E_{B1}(t)$ 及び $E_{B2}(t - \tau)$ の初期位相である。

【0039】

自己遅延ホモダイン干渉計150で生成された合波光である干渉光は、干渉光受光部160に送られる。干渉光受光部160は、合波光を受光して干渉信号 I_{12} を生成する。干渉光受光部160は、例えば、バランス型フォトダイオード(PD)162、FET増

10

20

30

40

50

幅器 164 及びアナログ - デジタル変換器 (A/D) 166 を備えて構成される。干渉光受光部 160 に送られた合波光は、バランス型 PD 162 に入力される。バランス型 PD 162 は、合波光から電気信号であるバランス検波信号を生成する。バランス検波信号は、FET 増幅器 164 において適宜増幅等された後、A/D 166 において、デジタル信号に変換されて、干渉信号 I_{12} が得られる。この干渉光受光部 160 において生成される干渉信号 I_{12} は、BFS 取得部 170 に送られる。

【0040】

強度取得部 141 は、遅延部 157、及び、受光部 161 を備えて構成される。強度取得部 141 に送られた光は、遅延部 157 で所定の遅延を受けた後、受光部 161 に送られる。受光部 161 は、例えば、PD 163、FET 増幅器 165 及び A/D 167 で構成される。受光部 161 に送られた光は、PD 163 で電気信号に変換された後、FET 増幅器 165 で適宜増幅される。増幅された電気信号は、A/D 167 においてデジタル信号に変換されて、強度信号が得られる。この受光部 161 において生成される強度信号は、BFS 取得部 170 に送られる。

10

【0041】

BFS 取得部 70 は、例えば、後述する機能手段を実現するソフトウェアが搭載された、市販のパーソナルコンピュータを用いて構成することができる。また、BFS 取得部 70 を、FPGA (Field-Programmable Gate Array) で構成することもできる。

【0042】

なお、干渉光受光部 160 において生成される干渉信号 I_{12} は、非常に微弱である。従って、信号雑音比 (S/N) を向上させるために、後述する平均化処理手段において平均化処理を行う必要がある。この平均化処理は、高速化のために、FPGA で実施されることが望ましい。

20

【0043】

干渉信号取得部 140 が備える A/D 166 から BFS 取得部 170 に送られた干渉信号は、干渉信号平均化処理手段 172 に送られる。干渉信号平均化処理手段 172 は、干渉信号に対して、平均化処理を施してブリルアン散乱係数除去手段 176 に送る。ここで、干渉信号 I_{12} は、以下の式 (4) で表される。

【0044】

【数 4】

$$I_{12} = A_{B1}^2 + A_{B2}^2 + 2A_{B1}A_{B2}\eta_B^2(t) \cos\{2\pi(f_B(t)\tau) + \phi_{offset}\} \quad \dots(4)$$

$$\phi_{offset} = \phi_{B1} - \phi_{B2}$$

30

また、強度取得部 141 が備える A/D 167 から BFS 取得部 170 に送られた強度信号は強度信号平均化処理手段 173 に送られる。強度信号平均化処理手段 173 は、強度信号に対して、平均化処理を施して、ブリルアン散乱係数除去手段 176 に送る。

【0045】

ブリルアン散乱係数除去手段 176 は、上記式 (4) で表される干渉信号 I_{12} に含まれる、ブリルアン散乱係数 $\eta_B(t)$ を、強度信号を用いて除去する。この結果、干渉信号は、以下の式 (5) になる。

40

【0046】

【数 5】

$$I_{12} = A_{B1}^2 + A_{B2}^2 + 2A_{B1}A_{B2} \cos\{2\pi(f_B(t)\tau) + \phi_{offset}\} \quad \dots(5)$$

上記式 (5) は、ブリルアン周波数の変化 $f_B(t)$ のみが強度変化として出力される

50

ことを示している。

【0047】

上記式(5)を規格化することにより、以下の式(6)が得られ、強度変化からBFSへの換算を容易にする。

【0048】

【数6】

$$I_{a.u.cos} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos(2\pi f_B(t)\tau + \phi_{offset}) \quad \dots(6)$$

10

上記式(6)を変形すると、以下の式(7)が得られる。BFSは以下の式(7)で算出される。

【0049】

【数7】

$$BFS = f_B(t) = \frac{\arccos(2I_{a.u.cos} - 1) - \phi_{offset}}{2\pi\tau} \quad \dots(7)$$

20

上記式(7)に表されるように、BFSの周波数範囲は、遅延時間、及び、第1光路を伝播する光と第2光路を伝播する光の位相差 ϕ_{offset} により決定される。例えば、遅延時間を1ナノ秒、位相差 ϕ_{offset} を0とすると、BFS値は0~500MHzになる。また、 $\phi_{offset} = 2\pi \cdot BFS \cdot \phi_{offset}$ とすると、 $-BFS \cdot \phi_{offset} \sim 1/2 \cdot BFS \cdot \phi_{offset}$ が測定範囲になる。この $BFS \cdot \phi_{offset}$ の設定により、負の値も測定できるようになる。

【0050】

ここで、上記式(5)から上記式(6)への規格化や、上記式(7)を用いたBFSの算出を行うには、振幅 $A_{B1}A_{B2}$ や ϕ_{offset} の情報が必要である。しかしながら、自己遅延ホモダイン型センサでは、位相比較の計算をしない。このため、そのままでは、強度と位相の関係を見積もることはできない。また、強度と位相の関係は不変ではなく、入力されるブリルアン散乱光のS/Nや、受光素子の変換効率などによって変わってしまう。このため、BFSを一意に決定することができない。

30

【0051】

そこで、この発明の自己遅延ホモダイン型センサでは、通常の測定を開始する前にキャリブレーション測定を行い、強度と位相の関係を算出する。

【0052】

図3を参照して、キャリブレーション測定について説明する。図3は、キャリブレーション測定を説明するための模式図である。

【0053】

40

キャリブレーション測定では、遅延部156は、位相制御回路142からの信号にตอบสนองして、第1光路を伝播する光に0から2πまでの位相変化を与える。このとき、各位相状態に対して、図3(A)に示すような波形が得られる。図3(A)では、模式的に、位相が互いに a、 b、 cである場合を示している。

【0054】

ここで、基準とするファイバ区間(以下、単に基準区間とも称する。)を設け、各位相状態において、平均化処理された干渉信号 I_{12} の、基準区間における平均値計算を行う。この結果、図3(B)に示されるような、位相と基準区間での出力強度の平均値 I_{ave} の関係を取得することができる。この平均値 I_{ave} の最大値、最小値から、振幅 $A_{B1}A_{B2}$ を算出できる。また、位相と出力強度の関係を取得できることから、BFSの測定範

50

囲に合わせた $offset$ と、強度 I_{offset} を初期値として設定できる。

【0055】

基準区間を、例えば、被測定光ファイバ100のうち、長さ10～20mの部分に設定し、光ファイバセンサの筐体に収納するのがよい。

【0056】

通常の測定では、キャリブレーション測定で得られた、振幅 $A_{B1} A_{B2}$ を用いて規格化を行って、BFSを算出する。この結果、図3(C)に示すように、被測定光ファイバ100におけるBFSの分布が得られる。

【0057】

なお、自己遅延ホモダイン干渉計150内の位相は、外乱などによって時々刻々と変化する。このため、通常の測定においても、基準区間の平均値 I_{ave} を取得し、平均値 I_{ave} と I_{offset} との差分を計算し、位相をフィードバック制御することで、 BFS_{offset} を一定に保つ。

10

【0058】

(構成例)

図4を参照して、この発明の、自己遅延ホモダイン型センサの構成例及び動作を説明する。図4は、この発明の自己遅延ホモダイン型センサの構成例を説明するための模式図である。なお、BFS取得部以外は、図1を参照して説明した自己遅延ホモダイン型センサと同様に構成できるので、重複する説明及び図示を省略することもある。

【0059】

先ず、キャリブレーション測定時について説明する。

20

【0060】

干渉信号取得部140が備えるA/D166からBFS取得部171に送られた干渉信号は、干渉信号平均化処理手段172に送られる。干渉信号平均化処理手段172は、S/N改善のために、干渉信号に対して、平均化処理を施す。平均化処理された干渉信号は、基準区間平均値計算手段180に送られる。基準区間平均値計算手段180は、平均化処理された干渉信号の基準区間における平均値を取得し、位相及び振幅計算手段184に送る。その後、位相制御手段182が、位相制御回路142に指示を送り、 $offset$ を0から2まで掃引する。 $offset$ が0から2まで掃引された後、位相及び振幅計算手段184は、図3(B)に示した、位相と出力強度の関係を取得し、振幅 $A_{B1} A_{B2}$ を算出する。この振幅 $A_{B1} A_{B2}$ は、通常測定時の規格化に用いられる。また、位相及び振幅計算手段184は、位相と出力強度の関係から、初期位相 $offset$ と、 $offset$ に対応する初期強度 I_{offset} と設定する。

30

【0061】

次に、通常測定時について説明する。

【0062】

干渉信号取得部140が備えるA/D166からBFS取得部171に送られた干渉信号は、干渉信号平均化処理手段172に送られる。干渉信号平均化処理手段172は、干渉信号に対して、平均化処理を施してブリルアン散乱係数除去手段176に送る。

【0063】

また、強度取得部141が備えるA/D167からBFS取得部171に送られた強度信号は強度信号平均化処理手段173に送られる。強度信号平均化処理手段173は、強度信号に対して、平均化処理を施して、ブリルアン散乱係数除去手段176に送る。

40

【0064】

ブリルアン散乱係数除去手段176は、干渉信号 I_{12} に含まれる、ブリルアン散乱係数 $B(t)$ を、強度信号を用いて除去する。この処理により、上記式(4)から上記式(5)が得られる。

【0065】

規格化手段179は、ブリルアン散乱係数除去手段176で、ブリルアン散乱係数 $B(t)$ が除去された干渉信号を、キャリブレーション測定時に位相及び振幅計算手段18

50

4で算出された振幅 $A_{B1}A_{B2}$ を用いて規格化する。この処理により、上記式(6)が得られる。

【0066】

BFS算出手段188は、規格化された干渉信号の強度から、初期位相offsetを用いて、上記式(7)に従ってBFSを算出する。

【0067】

また、干渉信号平均化処理手段172は、平均化処理された干渉信号を、基準区間平均値計算手段180に送る。基準区間平均値計算手段180は、キャリブレーション測定時と同様に、平均化処理された干渉信号の基準区間における平均値 I_{ave} を取得する。位相制御手段182は、平均値 I_{ave} が初期強度 I_{offset} に一致するように、位相制御回路142を経て遅延部156に指示を送る、いわゆる、フィードバック制御を行う。

10

【0068】

BFSは歪みと温度に対して依存性を持つので、BFSを決定した後は、任意好適な従来公知の技術を用いて、被測定光ファイバ100の歪みや温度を取得できる。すなわち、この発明の光ファイバセンサは、分布型の歪み及び温度センサに適用することができ、また、この発明のブリルアン周波数シフト測定方法は、歪み及び温度測定方法に適用することができる。

【0069】

以上説明したように、この発明の光ファイバセンサ及びブリルアン周波数シフト測定方法によれば、干渉計の一方を伝播する光の位相と、基準区間の平均強度の関係を取得することにより、BFSを一意に決定できる。

20

【0070】

また、干渉計内の2つの光路間の位相差に応じた強度信号の、位相と強度の関係が、入力されるブリルアン散乱光のS/Nや、受光素子の変換効率などによって変わってしまう場合であっても、基準区間の平均強度が、初期位相offsetに対応する初期強度 I_{offset} に一致するように、散乱光の位相をフィードバック制御すれば、BFSを正しく算出できる。

【符号の説明】

【0071】

- 10 光源部
- 12 光源
- 14 光パルス発生器
- 20 サーキュレータ
- 30 光増幅器
- 32 光バンドパスフィルタ
- 34 分岐部
- 90 タイミング制御器
- 100 被測定光ファイバ
- 140 干渉信号取得部
- 141 強度取得部
- 142 位相制御回路
- 150 自己遅延ホモダイン干渉計
- 152 分岐部
- 156 遅延部
- 158 合波部
- 160 干渉光受光部
- 161 受光部
- 162 バランス型PD
- 163 PD
- 164、165 FET増幅器

30

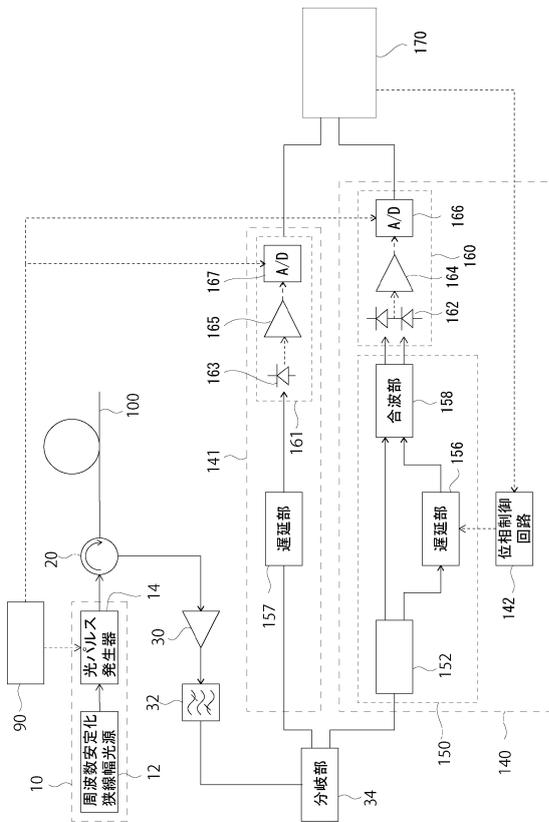
40

50

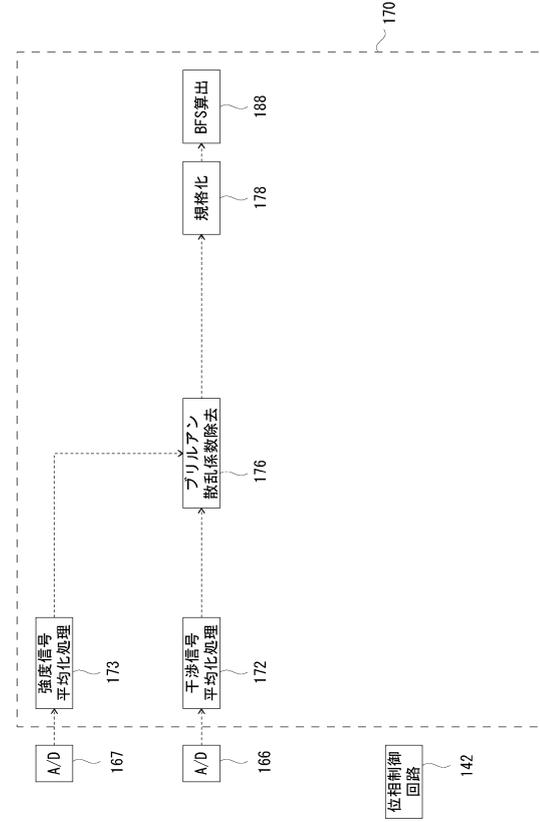
- 166、167 A/D
- 170、171 BFS取得部
- 172 干渉信号平均化処理手段
- 173 強度信号平均化処理手段
- 176 プリルアン散乱係数除去手段
- 178、179 規格化手段
- 180 基準区間平均値計算手段
- 182 位相制御手段
- 188 BFS算出手段

【図面】

【図 1】



【図 2】



10

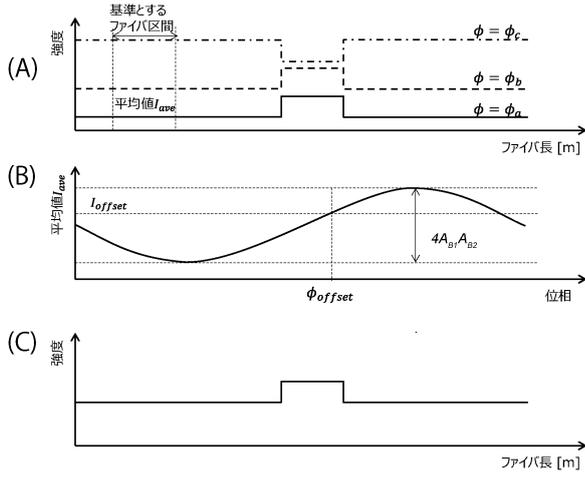
20

30

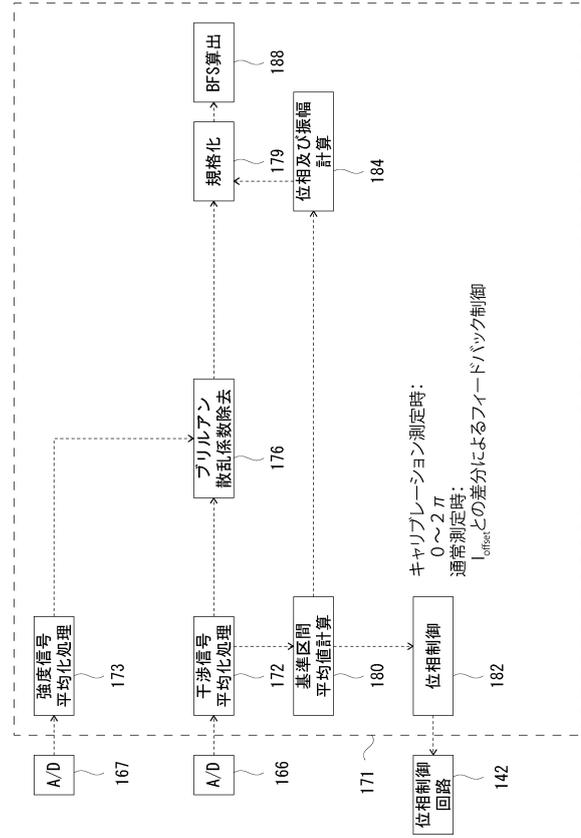
40

50

【図3】



【図4】



10

20

30

40

50

フロントページの続き

- (56)参考文献 特開2019-60743(JP,A)
特表2003-522937(JP,A)
特開2018-9896(JP,A)
特開2020-134264(JP,A)
特開2021-131293(JP,A)
特開2003-139540(JP,A)
特開2017-156289(JP,A)
特開平7-311121(JP,A)
特開平8-035911(JP,A)

- (58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)
G01D 5/26 - 5/38
G01B 11/16
G01K 11/32 - 11/324
G02B 6/00
G01M 11/00 - 11/02
G01J 9/00 - 9/04