

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5742861号
(P5742861)

(45) 発行日 平成27年7月1日(2015.7.1)

(24) 登録日 平成27年5月15日(2015.5.15)

(51) Int.Cl. F I
GO 1 K 11/32 (2006.01) GO 1 K 11/32 B

請求項の数 6 (全 22 頁)

(21) 出願番号	特願2013-38696 (P2013-38696)	(73) 特許権者	000006507
(22) 出願日	平成25年2月28日 (2013. 2. 28)		横河電機株式会社
(65) 公開番号	特開2014-167399 (P2014-167399A)		東京都武蔵野市中町2丁目9番32号
(43) 公開日	平成26年9月11日 (2014. 9. 11)	(74) 代理人	100064908
審査請求日	平成26年4月24日 (2014. 4. 24)		弁理士 志賀 正武
		(74) 代理人	100108578
			弁理士 高橋 詔男
		(74) 代理人	100089037
			弁理士 渡邊 隆
		(74) 代理人	100094400
			弁理士 鈴木 三義
		(74) 代理人	100108453
			弁理士 村山 靖彦

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光ファイバ温度分布測定装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

パルス光を光ファイバに入射させて得られる後方ラマン散乱光を受光して前記光ファイバの長さ方向における温度分布を測定する光ファイバ温度分布測定装置において、

前記光ファイバの長さ方向における前記後方ラマン散乱光の強度分布或いは前記温度分布を示す測定信号に重畳されているノイズの変化量に応じた閾値を設定する閾値設定回路と、

前記測定信号に対して予め規定された第1周波数以上の周波数成分を除去する処理を行うフィルタと、

前記測定信号が前記閾値を超えているか否かを判定する判定回路と、

前記判定回路の判定結果に応じて、前記フィルタによって処理された前記測定信号と前記フィルタによって処理されていない前記測定信号との何れか一方を選択する合成回路とを有するフィルタ回路を備えることを特徴とする光ファイバ温度分布測定装置。

【請求項 2】

前記閾値設定回路は、前記測定信号を複数の区間に区分し、区分した区間毎に前記閾値を設定することを特徴とする請求項1記載の光ファイバ温度分布測定装置。

【請求項 3】

前記合成回路は、前記測定信号が前記閾値を超えている旨を示す判定結果が前記判定回路から連続して得られた場合には、予め規定された期間の間、前記判定回路の判定結果に拘わらず前記フィルタによって処理されていない前記測定信号を選択することを特徴とす

る請求項 1 又は請求項 2 記載の光ファイバ温度分布測定装置。

【請求項 4】

前記フィルタによって処理された前記測定信号のレベルを低減させて前記合成回路に出力する低減回路を備えることを特徴とする請求項 1 から請求項 3 の何れか一項に記載の光ファイバ温度分布測定装置。

【請求項 5】

前記測定信号の概形を抽出する処理を行う予備フィルタ回路と、
前記測定信号から前記予備フィルタ回路の処理結果を減算した信号を前記測定信号として前記フィルタ回路に出力する第 1 演算回路と、

前記予備フィルタ回路の処理結果と前記フィルタ回路の処理結果とを加算する第 2 演算回路と

10

を備えることを特徴とする請求項 1 から請求項 4 の何れか一項に記載の光ファイバ温度分布測定装置。

【請求項 6】

前記予備フィルタ回路は、前記測定信号に対して予め規定された第 2 周波数以上の周波数成分を除去する処理を行う予備フィルタと、

前記予備フィルタによって処理された前記測定信号と前記予備フィルタによって処理されていない前記測定信号との差分の絶対値の平均値に応じた予備閾値を設定する予備閾値設定回路と、

前記測定信号が前記予備閾値を超えているか否かを判定する予備判定回路と、

20

前記予備判定回路の判定結果に応じて、前記予備フィルタによって処理された前記測定信号と前記予備フィルタによって処理されていない前記測定信号との何れか一方を選択する予備合成回路と

を備えることを特徴とする請求項 5 記載の光ファイバ温度分布測定装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、光ファイバの長さ方向における温度分布を測定する光ファイバ温度分布測定装置に関する。

【背景技術】

30

【0002】

従来から、光ファイバをセンサとして用い、光ファイバの長さ方向における物理量の分布を測定する分布型測定装置の研究・開発が盛んに行われている。この分布型測定装置の一種に、光ファイバ内で生ずる後方ラマン散乱光（ストークス光及び反ストークス光）を測定して光ファイバの長さ方向における温度分布を測定する光ファイバ温度分布測定装置がある。尚、この光ファイバ温度分布測定装置は、R - O T D R（Raman Optical Time Domain Reflectometry）とも呼ばれる。

【0003】

具体的に、上記の光ファイバ温度分布測定装置は、光ファイバの一端からパルス状のレーザー光を光ファイバ内に入射させて、レーザー光が光ファイバ内を伝播することによって順次生ずる後方ラマン散乱光（ストークス光及び反ストークス光）を光ファイバの一端側で順次受光する動作を繰り返す。そして、光ファイバ長手方向の測定点の各々におけるストークス光と反ストークス光との強度比（正確には、ストークス光の強度の平均値と反ストークス光の強度の平均値との比）を求めることによって光ファイバの長手方向における温度分布を測定している。

40

【0004】

以下の特許文献 1 には、従来の光ファイバ温度分布測定装置の一例が開示されている。また、以下の特許文献 2, 3 は、従来の雑音を除去する技術が開示されている。具体的に、以下の特許文献 2 には、小振幅のランダム雑音（具体的には、人声や音楽等の音声信号に含まれる雑音）を除去する雑音除去装置が開示されており、以下の特許文献 3 には、O

50

TDR波形上に重畳したノイズを低減するための光パルス試験器用非線形デジタルフィルタが開示されている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0005】

【特許文献1】特開2012-27001号公報

【特許文献2】特開2002-278585号公報

【特許文献3】特開平11-174267号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

10

【0006】

ところで、光ファイバ温度分布測定装置の性能を表す指標に「温度分解能」及び「空間分解能」がある。「温度分解能」は、どれだけ細かく温度を測定できるかを示す指標であり、「空間分解能」は、ある温度変化を測定可能な最小ファイバ長を示す指標である。例えば、SEAFOM (Subsea Fiber Optic Monitoring Group) では、一定温度の光ファイバの測定を20回繰り返し行い、各回で得られた測定結果(51点以上の測定点の測定結果)の標準偏差の2倍(2)を平均化したものを「温度分解能」と規定し、ホットスポット(20以上の温度差がある箇所)を測定し得る最小ファイバ長を「空間分解能」と規定している。

【0007】

20

近年において、光ファイバ温度分布測定装置には、温度分布をより正確に測定するために、上記の温度分解能及び空間分解能の向上が要求されている。特に、光ファイバ温度分布測定装置から遠い場所(例えば、レーザ光が入射される光ファイバの一端側よりも他端側に近い場所)における温度分布を正確に測定したいという要求が高まっているため、この場所での温度分解能を向上させる必要がある。

【0008】

ここで、上記の温度分解能は、信号成分(後方ラマン散乱光の受光信号)とノイズ成分との比であるS/N比と相関があるため、温度分解能を向上させるには、信号成分のレベルを上げるか、ノイズ成分のレベルを下げる必要がある。信号成分のレベルを上げる方法としては、光ファイバに入射させるレーザ光の強度を高める方法が考えられる。また、ノイズ成分のレベルを下げる方法としては、後方ラマン散乱光(ストークス光及び反ストークス光)の分離に用いる光学フィルタの帯域を狭くする方法(第1方法)と、後方ラマン散乱光の受光信号に対して既存のフィルタ処理を行う方法(第2方法)とが考えられる。

30

【0009】

しかしながら、上記の信号成分のレベルを上げる方法では、光ファイバに入射させるレーザ光の強度がある値よりも大きくなると、光ファイバ内において誘導ラマン散乱が生じてストークス光の強度が急激に高くなり、温度の測定誤差が大きくなってしまいう問題がある。また、上記のノイズ成分のレベルを下げる方法のうちの第1方法では、光学フィルタの帯域を狭くすることに技術的な限界があるため温度分解能の向上がさほど見込めず、光学フィルタは電氣的なフィルタに比べて高価であるという問題がある。

40

【0010】

また、上記のノイズ成分のレベルを下げる方法のうちの第2方法では、従来の単純なフィルタを用いたのではノイズ成分を低減することができても同時に信号成分の波形が劣化してしまう弊害があり、温度分解能を向上させることが困難であるという問題がある。尚、上記の弊害が生ずる原因は、光ファイバの測定によって得られる信号成分の波形が測定環境によって千差万別である上に、信号成分に重畳されるノイズがホワイトノイズ(種々の周波成分が含まれるノイズ)であるからである。

【0011】

本発明は上記事情に鑑みてなされたものであり、温度分解能を向上させることが可能な光ファイバ温度分布測定装置を提供することを目的とする。

50

【課題を解決するための手段】

【0012】

上記課題を解決するために、本発明の光ファイバ温度分布測定装置は、パルス光を光ファイバ(FB)に入射させて得られる後方ラマン散乱光(ST、AS)を受光して前記光ファイバの長さ方向における温度分布を測定する光ファイバ温度分布測定装置(1、2)において、前記光ファイバの長さ方向における前記後方ラマン散乱光の強度分布或いは前記温度分布を示す測定信号に重畳されているノイズの変化量に応じた閾値(TH1)を設定する閾値設定回路(31)と、前記測定信号に対して予め規定された第1周波数以上の周波数成分を除去する処理を行うフィルタ(32)と、前記測定信号が前記閾値を超えているか否かを判定する判定回路(34)と、前記判定回路の判定結果に応じて、前記フィルタによって処理された前記測定信号と前記フィルタによって処理されていない前記測定信号との何れか一方を選択して合成する合成回路(35)とを有するフィルタ回路(30)を備えることを特徴としている。

10

本発明によると、光ファイバの長さ方向における後方ラマン散乱光の強度分布或いは温度分布を示す測定信号が、該測定信号に重畳されているノイズの変化量に応じて設定された閾値を超えているか否かが判断され、該判断結果に応じてフィルタによって処理された測定信号とフィルタによって処理されていない測定信号との何れか一方が選択されて合成される。

また、本発明の光ファイバ温度分布測定装置は、前記閾値設定回路が、前記測定信号を複数の区間に区分し、区分した区間毎に前記閾値を設定することを特徴としている。

20

また、本発明の光ファイバ温度分布測定装置は、前記合成回路が、前記測定信号が前記閾値を超えている旨を示す判定結果が前記判定回路から連続して得られた場合には、予め規定された期間の間、前記判定回路の判定結果に拘わらず前記フィルタによって処理されていない前記測定信号を選択して合成することを特徴としている。

また、本発明の光ファイバ温度分布測定装置は、前記フィルタによって処理された前記測定信号のレベルを低減させて前記合成回路に出力する低減回路(36)を備えることを特徴としている。

また、本発明の光ファイバ温度分布測定装置は、前記測定信号の概形を抽出する処理を行う予備フィルタ回路(40)と、前記測定信号から前記予備フィルタ回路の処理結果を減算した信号を前記測定信号として前記フィルタ回路に出力する第1演算回路(60)と、前記予備フィルタ回路の処理結果と前記フィルタ回路の処理結果とを加算する第2演算回路(70)とを備えることを特徴としている。

30

また、本発明の光ファイバ温度分布測定装置は、前記予備フィルタ回路が前記測定信号に対して予め規定された第2周波数以上の周波数成分を除去する処理を行う予備フィルタ(42)と、前記予備フィルタによって処理された前記測定信号と前記予備フィルタによって処理されていない前記測定信号との差分の絶対値の平均値に応じた予備閾値(TH2)を設定する予備閾値設定回路(41)と、前記測定信号が前記予備閾値を超えているか否かを判定する予備判定回路(44)と、前記予備判定回路の判定結果に応じて、前記予備フィルタによって処理された前記測定信号と前記予備フィルタによって処理されていない前記測定信号との何れか一方を選択して合成する予備合成回路(45)とを備えることを特徴としている。

40

【発明の効果】

【0013】

本発明によれば、光ファイバの長さ方向における後方ラマン散乱光の強度分布或いは温度分布を示す測定信号が、該測定信号に重畳されているノイズの変化量に応じて設定された閾値を超えているか否かに応じて、フィルタによって処理された測定信号とフィルタによって処理されていない測定信号との何れか一方を選択して合成するようにしているため、信号成分の波形劣化を招くことなく空間周波数が高いノイズ成分を効果的に低減することができ、これにより度分解能を向上させることができるという効果がある。

【図面の簡単な説明】

50

【 0 0 1 4 】

【図 1】本発明の第 1 実施形態による光ファイバ温度分布測定装置の要部構成を示すブロック図である。

【図 2】本発明の第 1 実施形態による光ファイバ温度分布測定装置が備えるフィルタ部の内部構成を示すブロック図である。

【図 3】ノイズの分布特性の概要を示す図である。

【図 4】本発明の第 1 実施形態による光ファイバ温度分布測定装置が備えるフィルタ部の判定回路で行われる処理を説明するための図である。

【図 5】本発明の第 1 実施形態による光ファイバ温度分布測定装置が備えるフィルタ部の合成回路で行われる処理の詳細を示すフローチャートである。

10

【図 6】本発明の第 2 実施形態による光ファイバ温度分布測定装置が備えるフィルタ部の内部構成を示すブロック図である。

【図 7】本発明の第 2 実施形態による光ファイバ温度分布測定装置が備えるフィルタ部の予備フィルタ回路で設定される閾値を説明するための図である。

【図 8】本発明の第 2 実施形態による光ファイバ温度分布測定装置における低減回路の効果を示すための図である。

【図 9】本発明の第 2 実施形態による光ファイバ温度分布測定装置の測定結果の一例を示す図である。

【図 10】本発明の第 3 実施形態による光ファイバ温度分布測定装置が備えるフィルタ部の内部構成を示すブロック図である。

20

【図 11】本発明の第 4 実施形態による光ファイバ温度分布測定装置の要部構成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 1 5 】

以下、図面を参照して本発明の実施形態による光ファイバ温度分布測定装置について詳細に説明する。

【 0 0 1 6 】

〔第 1 実施形態〕

図 1 は、本発明の第 1 実施形態による光ファイバ温度分布測定装置の要部構成を示すブロック図である。図 1 に示す通り、本実施形態の光ファイバ温度分布測定装置 1 は、パルス発生部 10、光源 11、方向性結合器 12、温度基準部 13、光フィルタ 14、光電変換回路 (O/E) 15a, 15b、増幅回路 16a, 16b、A/D 変換回路 17a, 17b、平均化回路 18、フィルタ部 19a, 19b、演算部 20、及び温度補正部 21 を備える。

30

【 0 0 1 7 】

この光ファイバ温度分布測定装置 1 は、コネクタ CN に接続される光ファイバ FB 内で生ずる後方ラマン散乱光 (ストークス光及び反ストークス光) を受光して光ファイバ FB の長さ方向における温度分布を測定する光ファイバ測定装置 (R-OTDR) である。ここで、光ファイバ FB は、例えば数 km ~ 数十 km 程度の長さを有する石英系マルチモード光ファイバを用いることができる。尚、シングルモード光ファイバを用いてもよい。

40

【 0 0 1 8 】

パルス発生部 10 は、光源 11 からパルス光を発生させるタイミング、及び平均化回路 18 を動作させるタイミングを規定するパルス信号を出力する。光源 11 は、例えば半導体レーザ等を備えており、パルス発生部 10 からパルス信号が出力されるタイミングでパルス状のレーザ光を射出する。尚、光源 11 から射出されるレーザ光の波数を k_0 とする。方向性結合器 12 は、光源 11 から射出されたレーザ光が温度基準部 13 に導かれ、且つ、光ファイバ FB で生じた後方散乱光が光フィルタ 14 に導かれるよう、光源 11、温度基準部 13、及び光フィルタ 14 を光学的に結合する。

【 0 0 1 9 】

温度基準部 13 は、巻回された光ファイバ 13a と温度センサ 13b とを備えており、

50

光ファイバ温度分布測定装置 1 内部の温度（基準温度）を得るためのものである。光ファイバ 1 3 a は、一端が方向性結合器 1 2 と光学的に結合され、他端がコネクタ C N（光ファイバ F B の一端が接続されるコネクタ）と光学的に結合された数十～数百 m 程度の全長を有する光ファイバである。温度センサ 1 3 b は、例えば白金測温抵抗体を備えており、光ファイバ 1 3 a の近傍の温度を測定する。この温度センサ 1 3 b の測定結果は、演算部 2 0 に出力される。

【 0 0 2 0 】

光フィルタ 1 4 は、方向性結合器 1 2 からの後方散乱光に含まれる後方ラマン散乱光（ストークス光 S T 及び反ストークス光 A S）を抽出するとともに、ストークス光 S T と反ストークス光 A S とを分離して出力するフィルタである。尚、光ファイバ F B で生ずるラマンシフト（波数）を k_r とすると、ストークス光 S T の波数は $k_0 - k_r$ で表され、反ストークス光 A S の波数は $k_0 + k_r$ で表される。

10

【 0 0 2 1 】

光電変換回路 1 5 a , 1 5 b は、例えばアバランシェ・フォトダイオード等の受光素子を備えており、光フィルタ 1 4 から出力されるストークス光 S T 及び反ストークス光 A S をそれぞれ光電変換する。増幅回路 1 6 a , 1 6 b は光電変換回路 1 5 a , 1 5 b から出力される光電変換信号をそれぞれ所定の増幅率で増幅する。

【 0 0 2 2 】

A / D 変換回路 1 7 a , 1 7 b は、増幅回路 1 6 a , 1 6 b で増幅された光電変換信号をサンプリングし、デジタル化したサンプルデータを出力する。これら A / D 変換回路 1 7 a , 1 7 b は、コネクタ C N の位置を原点とし、光ファイバ F B の長手方向に一定間隔（例えば、1 [m] の間隔）で設定されたサンプルポイント（測定点）において生ずる後方ラマン散乱光（ストークス光 S T 及び反ストークス光 A S）の光電変換信号をサンプリングするように動作タイミングが規定される。

20

【 0 0 2 3 】

平均化回路 1 8 は、パルス発生部 1 0 からのパルス信号によって動作し、光源 1 1 から複数回に亘って射出されるレーザ光が光ファイバ F B に入射される度に得られる A / D 変換回路 1 7 a , 1 7 b のサンプルデータをそれぞれ個別に平均化する。光ファイバ F B で生ずる後方ラマン散乱光（ストークス光 S T 及び反ストークス光 A S）は微弱であるため、光ファイバ F B に対して複数回に亘ってレーザ光を入射させて得られるサンプルデータを平均化することにより、所望の信号対雑音比（S / N 比）を得ている。

30

【 0 0 2 4 】

フィルタ部 1 9 a は、平均化回路 1 8 で平均化された A / D 変換回路 1 7 a のサンプルデータ D 1 1（ストークス光 S T の強度分布を示す測定信号）に対してフィルタ処理を行い、そのサンプルデータ D 1 1 に含まれるノイズを除去する。同様に、フィルタ部 1 9 b は、平均化回路 1 8 で平均化された A / D 変換回路 1 7 b のサンプルデータ D 1 2（反ストークス光 A S の強度分布を示す測定信号）に対してフィルタ処理を行い、そのサンプルデータ D 1 2 に含まれるノイズを除去する。これらフィルタ部 1 9 a , 1 9 b は、光ファイバ温度分布測定装置 1 の温度分解能を向上させるために設けられる。尚、フィルタ部 1 9 a , 1 9 b の詳細については後述する。

40

【 0 0 2 5 】

演算部 2 0 は、温度センサ 1 3 b の測定結果を参照しつつ、フィルタ部 1 9 a でフィルタ処理されたストークス光 S T についてのサンプルデータ D 2 1 と、フィルタ部 1 9 b でフィルタ処理された反ストークス光 A S についてのサンプルデータ D 2 2 とを用いて、サンプルポイント（測定点）毎の強度比を求める演算を行う。かかる演算によってサンプルポイント毎の温度が求められ、これにより光ファイバ F B の長さ方向における温度分布が得られる。温度補正部 2 1 は、光ファイバ F B の温度を測定する温度センサ（図示省略）の測定結果に基づいて、演算部 2 0 で得られた光ファイバ F B の長さ方向における温度分布を補正する。

【 0 0 2 6 】

50

次に、フィルタ部 19 a , 19 b の内部構成について説明する。図 2 は、本発明の第 1 実施形態による光ファイバ温度分布測定装置が備えるフィルタ部の内部構成を示すブロック図である。図 2 に示す通り、フィルタ部 19 a , 19 b は、閾値設定回路 3 1、ローパスフィルタ 3 2 (フィルタ)、遅延回路 3 3、判定回路 3 4、及び合成回路 3 5 を有するフィルタ回路 3 0 を備える。

【 0 0 2 7 】

フィルタ部 19 a のフィルタ回路 3 0 は、平均化回路 1 8 から出力されるサンプルデータ D 1 1 に対するフィルタ処理を行って、ノイズを除去したサンプルデータ D 2 1 を出力する。フィルタ部 19 b のフィルタ回路 3 0 は、平均化回路 1 8 から出力されるサンプルデータ D 1 2 に対するフィルタ処理を行って、ノイズを除去したサンプルデータ D 2 2 を出力する。尚、以下では、重複した説明を避けるために、フィルタ部 19 a のフィルタ回路 3 0 について詳細に説明し、フィルタ部 19 b のフィルタ回路 3 0 については説明を省略する。

10

【 0 0 2 8 】

閾値設定回路 3 1 は、フィルタ回路 3 0 で行われるフィルタ処理で用いられる閾値 T H 1 を設定する。具体的に、閾値設定回路 3 1 は、サンプルデータ D 1 1 に重畳されているノイズの変化量に応じた閾値 T H 1 を設定する。いま、サンプルデータ D 1 1 のうちの第 i 番目のデータを X (i) と表すと、閾値設定回路 3 1 は、連続する (N + 1) 個のデータを用いて、以下の (1) 式から設定すべき閾値 T H 1 を算出する。尚、以下の (1) 式中の α は任意の定数 (例えば「 2 」) である。

20

【 0 0 2 9 】

【数 1】

$$TH1 = \alpha \times \frac{1}{N} \sum_i |X(i+1) - X(i)| \quad \dots (1)$$

【 0 0 3 0 】

つまり、閾値設定回路 3 1 は、隣り合うデータの差分 (N 個の差分) の絶対値の平均値に定数 α を乗じて得られる値を閾値 T H 1 として算出する。ここで、サンプルデータ D 1 1 は、ストークス光 S T に起因する成分とノイズに起因する成分とが含まれるデータである。光ファイバ F B の温度が一定であれば、隣接するサンプルポイントで得られるデータ (隣り合うデータ) に含まれるストークス光 S T に起因する成分はほぼ同じである。このため、隣り合うデータの差分を求めればノイズの変化量が得られることになり、上記 (1) 式を用いて算出される閾値 T H 1 はノイズの変化量に応じた閾値ということができる。

30

【 0 0 3 1 】

また、閾値設定回路 3 1 は、光ファイバ F B を複数の区間に区分し、区分した区間毎に上記の閾値 T H 1 を設定する。例えば、閾値設定回路 3 1 は、光ファイバ F B を、長さが 1 0 0 [m] に設定された複数の区間に区分する。ここで、光ファイバ F B の長手方向に 1 [m] の間隔でサンプルポイントが設定されているとすると、区分した 1 0 0 [m] の区間の各々には、区間両端におけるサンプルポイントを含めると、 1 0 1 個のサンプルポイントが含まれることになる。このため、閾値設定回路 3 1 は、各々の区間について、 1 0 1 個のサンプルポイントで得られる連続する 1 0 1 個のデータ (N = 1 0 0) を用いて、上記の (1) 式から閾値 T H 1 を算出する。

40

【 0 0 3 2 】

このように、光ファイバ F B を複数の区間に区分して区間毎に閾値 T H 1 を設定するのは、ノイズの分布特性を考慮したからである。また、光ファイバ F B の個体差や使用環境によってノイズの変化量が大きく異なるからである。図 3 は、ノイズの分布特性の概要を示す図である。尚、図 3 においては、光ファイバ F B の長手方向における距離 (光ファイ

50

バ温度分布測定装置 1 からの距離)を横軸にとり、ノイズのレベルを縦軸にとっている。図 3 に示す通り、ノイズの分布特性は、光ファイバ温度分布測定装置 1 の近傍ではレベル及びその変化量が大きく、光ファイバ温度分布測定装置 1 から離れるに従ってレベル及びその変化量が徐々に小さくなる特性である。このように、光ファイバ F B の位置に応じてノイズの変化量が大きく異なるため、区分した区間毎に閾値 T H 1 を設定することとしている。

【 0 0 3 3 】

ローパスフィルタ 3 2 は、サンプルデータ D 1 1 に対して予め規定されたカットオフ周波数(第 1 周波数)以上の周波数成分を除去する処理を行う。このローパスフィルタ 3 2 は、光ファイバ F B の長手方向における空間周波数が高いノイズの成分を除去するために設けられる。尚、ローパスフィルタ 3 2 のカットオフ周波数は、必要となる温度分解能に応じて適宜設定される。

10

【 0 0 3 4 】

遅延回路 3 3 は、入力されるサンプルデータ D 1 1 を所定時間だけ遅延させる。具体的に、遅延回路 3 3 は、ローパスフィルタ 3 2 で行われる処理に要する時間だけサンプルデータ D 1 1 を遅延させる。この遅延回路 3 3 は、ローパスフィルタ 3 2 で処理されたデータ Q 1 が合成回路 3 5 に入力されるタイミングと、ローパスフィルタ 3 2 で処理されていないデータ Q 2 (サンプルデータ D 1 1) が合成回路 3 5 に入力されるタイミングとを調整するために設けられる。尚、このようなタイミング調整が不要であれば、遅延回路 3 3 を省略することは可能である。

20

【 0 0 3 5 】

判定回路 3 4 は、サンプルデータ D 1 1 の各々が、閾値設定回路 3 1 で設定された閾値 T H 1 を超えているか否かを判定し、その判定結果 J を合成回路 3 5 に出力する。合成回路 3 5 は、判定回路 3 4 の判定結果 J に応じて、ローパスフィルタ 3 2 で処理されたデータ Q 1 と、ローパスフィルタ 3 2 で処理されていないデータ Q 2 との何れか一方を選択して合成する。具体的に、合成回路 3 5 は、判定回路 3 4 からの判定結果 J が、閾値 T H 1 を超えていない旨を示すものである場合にはローパスフィルタ 3 2 で処理されたデータ Q 1 を選択して合成し、閾値 T H 1 を超えている旨を示すものである場合にはローパスフィルタ 3 2 で処理されていないデータ Q 2 を選択して合成する。

30

【 0 0 3 6 】

ここで、サンプルデータ D 1 1 のうちの第 i 番目のデータ X (i) に対する判定回路 3 4 の判定結果を J (i) とし、この判定結果 J (i) に基づいて合成回路 3 5 で選択されて合成されるデータを Y (i) とし、ローパスフィルタ 3 2 の伝達関数を H (z) とすると、図 2 に示すフィルタ回路 3 0 は、以下の (2) 式で表される。尚、判定結果 J (i) は、X (i) が閾値 T H 1 を超えている場合には J (i) = 1 となり、超えていない場合には J (i) = 0 となる。以下の (2) 式からフィルタ回路 3 0 は フィルタであることが分かる。

【 0 0 3 7 】

【 数 2 】

40

$$Y(i) = X(i)J(i) + H(z)X(i)(1-J(i)) \quad \dots (2)$$

【 0 0 3 8 】

また、合成回路 3 5 は、サンプルデータ D 1 1 が閾値 T H 1 を超えている旨を示す判定結果 J が連続して得られた場合には、予め規定された期間の間、判定結果 J に拘わらずローパスフィルタ 3 2 で処理されていないデータ Q 2 を選択して合成する。具体的には、前後する 3 つのデータについては、ローパスフィルタ 3 2 で処理されていないデータ Q 2 を

50

選択して合成する。これは、光ファイバFBに急激な温度変化がある場合に生じ得る空間分解能の悪化を防止するためである。尚、合成回路35はデータQ2等を一時的に記憶するメモリを備えており、このメモリに記憶されたデータを適宜読み出すことで、上述の処理を実現している。

【0039】

図4は、本発明の第1実施形態による光ファイバ温度分布測定装置が備えるフィルタ部の判定回路で行われる処理を説明するための図である。光ファイバFBに急激な温度変化がある場合には、平均化回路18から出力されるサンプルデータD11(合成回路35に入力されるデータQ2)は、図4(a)に示す通り、温度低下に合わせて信号レベルが急激に低下して閾値TH1を下回るものとなる。このようなサンプルデータD11をローパスフィルタ32で処理して得られるデータ(合成回路35に入力されるデータQ1)は、図4(a)に示す通り、信号レベルの変化がデータQ2よりも緩やかなものになる。

【0040】

前述の通り、サンプルデータD11の各々が閾値TH1を超えているか否かのみに基づいてデータQ1、Q2を選択してしまうと、サンプルデータD11が閾値TH1を下回るまではデータQ2が選択され、サンプルデータD11が閾値TH1を下回ってからはデータQ1が選択される。すると、図4(b)に示す通り、合成回路35で合成されたデータ(サンプルデータD21)は、不連続な部分(符号Z1が付された円で囲われている部分)が生じて信号波形が劣化したものになり、これによって空間分解能が悪化する可能性がある。

【0041】

これに対し、閾値TH1を超えている旨を示す判定結果Jが連続して得られた場合に、データQ1、Q2の選択方法を上述した通り変更することによって、図4(c)に示す通り、サンプルデータD11が閾値TH1を下回った後もデータQ1が選択されることになる(符号Z2が付された矢印の部分)。すると、図4(c)に示す通り、合成回路35で合成されたデータ(サンプルデータD21)の連続性が保たれて信号波形の劣化が生じないため、空間分解能の悪化を防止することができる。

【0042】

次に、本実施形態の光ファイバ温度分布測定装置1の動作について説明する。尚、以下では、理解を容易にするために、サンプルポイントが、光ファイバFBの長手方向に1[m]の間隔で設定されており、フィルタ部19a、19bの処理において、光ファイバFBは、長さが100[m]に設定された複数の区間に区分されているものとする。

【0043】

動作が開始されると、パルス発生部10からパルス信号が出力され、このパルス信号に基づいて光源11からパルス状のレーザ光が射出される。このレーザ光は、方向性結合器12、温度基準部13、及びコネクタCNを順に介して光ファイバFBに入射し、光ファイバFB中を伝播する。レーザ光が光ファイバFB中を進むと、後方ラマン散乱光(ストークス光ST及び反ストークス光AS)を含む後方散乱光が発生する。この後方散乱光は、光ファイバFB中をレーザ光の進行方向とは逆方向に進み、コネクタCN、温度基準部13、及び方向性結合器12を順に介して光フィルタ14に入射する。そして、光フィルタ14において、ストークス光STと反ストークス光ASとが抽出されて分離される。

【0044】

ストークス光ST及び反ストークス光ASは、光電変換回路15a、15bでそれぞれ光電変換されて、それらの光電変換信号が増幅回路16a、16bでそれぞれ増幅される。増幅回路16a、16bで増幅された光電変換信号は、A/D変換回路17a、17bにおいてそれぞれサンプリングされる。これらA/D変換回路17a、17bでサンプリングされたサンプルデータは平均化回路18に出力され、光ファイバFBの長手方向に設定されたサンプルポイント数分のサンプルデータがそれぞれ蓄えられる。

【0045】

光ファイバFBにパルス状のレーザ光が入射される度に以上の処理が繰り返し行われ、

A/D変換回路17a, 17bから順次サンプルポイント数分のサンプルデータがそれぞれ出力される。そして、A/D変換回路17aから順次出力されるストークス光STについてのサンプルデータが平均化回路18でサンプルポイント毎に平均化されるとともに、A/D変換回路17baから順次出力される反ストークス光ASについてのサンプルデータが平均化回路18でサンプルポイント毎に平均化される。

【0046】

平均化回路18における平均化処理が終了すると、平均化されたサンプルデータに含まれるノイズを除去するフィルタ処理がフィルタ部19a, 19bで行われる。尚、このフィルタ処理は、光ファイバFBに設定された複数の区間毎に行われる。フィルタ部19a, 19bのフィルタ処理が開始されると、まず光ファイバFBに設定された複数の区間のうちの最初の区間(光ファイバ温度分布測定装置1に最も近い区間)に含まれる101個のサンプルポイント(区間両端におけるサンプルポイントを含む)のサンプルデータがフィルタ部19a, 19bにそれぞれ読み出されて閾値TH1を設定する処理が行われる。

10

【0047】

具体的には、平均化回路18で平均化されたストークス光STについてのサンプルデータ(サンプルデータD11)のうちの最初の101個のデータがフィルタ部19aに読み出されるとともに、平均化回路18で平均化された反ストークス光ASについてのサンプルデータ(サンプルデータD12)のうちの最初の101個のデータがフィルタ部19bに読み出される。そして、フィルタ部19a, 19bの各々に設けられたフィルタ回路30の閾値設定回路31で、前述した(1)式を用いて閾値TH1を算出し、算出した閾値TH1を設定する処理がそれぞれ行われる。

20

【0048】

次に、上記の最初の区間に含まれる100個のサンプルポイントのサンプルデータが1つずつ順にフィルタ部19a, 19bに読み出され、これらのサンプルデータに含まれるノイズを除去する処理が行われる。具体的には、サンプルデータD11のうちの最初の100個のデータが1つずつ順にフィルタ部19aに読み出されるとともに、サンプルデータD12のうちの最初の100個のデータが1つずつ順にフィルタ部19bに読み出される。そして、フィルタ部19a, 19bにおいて、これらのデータに含まれるノイズを除去する処理が行われる。尚、フィルタ部19a, 19bで行われる処理は同様の処理であるため、以下ではフィルタ部19aで行われる処理について説明する。

30

【0049】

フィルタ部19aに読み出されたデータは、フィルタ部19aに設けられたフィルタ回路30のローパスフィルタ32、遅延回路33、及び判定回路34に入力される。すると、ローパスフィルタ32で高周波成分を除去する処理が行われるとともに、遅延回路33で所定時間だけ遅延させる処理が行われ、ローパスフィルタ32及び遅延回路33から合成回路35に対してデータQ1, Q2がそれぞれ出力される。また、判定回路34において、入力されたデータが閾値設定回路31で設定された閾値を超えているか否かが判定され、その判定結果Jが合成回路35に出力される。

【0050】

合成回路35は、判定回路34からの判定結果Jに応じて、ローパスフィルタ32で処理されたデータQ1と、ローパスフィルタ32で処理されていないデータQ2との何れか一方を選択して合成してサンプルデータD21として出力する処理を行う。図5は、本発明の第1実施形態による光ファイバ温度分布測定装置が備えるフィルタ部の合成回路で行われる処理の詳細を示すフローチャートである。尚、図5のフローチャートは、光ファイバFBに設定された複数の区間毎のフィルタ処理が開始される度に開始される。

40

【0051】

処理が開始されると、まず変数iを初期化する処理(値を「1」に設定する処理)が行われる(ステップS11)。この変数iは、フィルタ部19aに1つずつ順に読み出される100個のデータを区別するための変数である。変数iの初期化が終了すると、第i番目のデータについての判定結果J(i)が、値設定回路31で設定された閾値を超えてい

50

る旨を示すもの ($J(i) = 1$) であるか否かを判断する処理が行われる (ステップ S 1 2)。

【 0 0 5 2 】

$J(i) = 0$ である場合には、ステップ S 1 2 の判断結果が「NO」になり、第 i 番目のデータについてはローパスフィルタ 3 2 で処理されたデータ Q 1 を選択し、サンプルデータ D 2 1 の第 i 番目のデータとして合成する処理が行われる (ステップ S 1 3)。以上の処理が終了すると、変数 i をインクリメントして (ステップ S 1 4)、残りのデータの有無を判断する処理が行われる (ステップ S 1 5)。前述した最初の区間に含まれる 1 0 0 個のサンプルポイントのサンプルデータの全ての読み出しが行われていない場合には、ステップ S 1 5 の判断結果が「NO」になり、処理はステップ S 1 2 に戻る。

10

【 0 0 5 3 】

これに対し、 $J(i) = 1$ である場合には、ステップ S 1 2 の判断結果が「YES」になり、第 $i + 1$ 番目のデータについての判定結果 $J(i + 1)$ が、値設定回路 3 1 で設定された閾値を超えている旨を示すもの ($J(i + 1) = 1$) であるか否かを判断する処理が行われる (ステップ S 1 6)。 $J(i + 1) = 0$ である場合には、ステップ S 1 6 の判断結果が「NO」になり、第 i 番目のデータについてはローパスフィルタ 3 2 で処理されていないデータ Q 2 を選択し、サンプルデータ D 2 1 の第 i 番目のデータとして合成する処理が行われる (ステップ S 1 7)。

【 0 0 5 4 】

他方、 $J(i + 1) = 1$ である場合には、ステップ S 1 6 の判断結果が「YES」になり、第 $i - 3 \sim i + 3$ 番目のデータについては、判定回路 3 4 の判定結果に拘わらず、ローパスフィルタ 3 2 で処理されていないデータ Q 2 を選択し、サンプルデータ D 2 1 の第 $i - 3 \sim i + 3$ 番目のデータとして合成する処理が行われる (ステップ S 1 8)。以上のステップ S 1 7 又はステップ S 1 8 の処理が終了すると、変数 i をインクリメントして (ステップ S 1 4)、残りのデータの有無を判断する処理が行われる (ステップ S 1 5)。

20

【 0 0 5 5 】

前述した最初の区間に含まれる 1 0 0 個のサンプルポイントのサンプルデータの全ての読み出しが行われていない場合には、ステップ S 1 5 の判断結果が「NO」になって処理はステップ S 1 2 に戻る。これに対し、前述した最初の区間に含まれる 1 0 0 個のサンプルポイントのサンプルデータの全ての読み出しが行われた場合には、ステップ S 1 5 の判断結果が「YES」になって、図 5 に示す一連の所定が終了する。

30

【 0 0 5 6 】

以上の処理が終了すると、光ファイバ F B に設定された複数の区間のうちの 2 番目の区間 (光ファイバ温度分布測定装置 1 に 2 番目に近い区間) に含まれる 1 0 1 個のサンプルポイント (区間両端におけるサンプルポイントを含む) のサンプルデータがフィルタ部 1 9 a, 1 9 b にそれぞれ読み出されて閾値 T H 1 を設定する処理が行われる。そして、上記の 2 番目の区間に含まれる 1 0 0 個のサンプルポイントのサンプルデータが 1 つずつ順にフィルタ部 1 9 a, 1 9 b に読み出され、これらのサンプルデータに含まれるノイズを除去する処理が行われる。以下、光ファイバ F B に設定された複数の区間の各々について、閾値 T H 1 を設定する処理及びノイズを除去する処理が同様に行われる。

40

【 0 0 5 7 】

フィルタ部 1 9 a, 1 9 b における処理が終了すると、演算部 2 0 において、フィルタ部 1 9 a からのサンプルデータ D 2 1 と、フィルタ部 1 9 b からのサンプルデータ D 2 2 とを用いて、サンプルポイント (測定点) 毎の強度比が求められ、これによりサンプルポイント毎の温度が求められる。これらサンプルポイント毎の温度は、温度補正部 2 1 に出力され、不図示の温度センサ (光ファイバ F B の温度を測定する温度センサ) の測定結果に基づいて補正される。このようにして、光ファイバ F B の長さ方向における温度分布が求められる。

【 0 0 5 8 】

以上の通り、本実施形態では、フィルタ部 1 9 a, 1 9 b において、平均化回路 1 8 で

50

平均化されたサンプルデータ（ストークス光 S T 及び反ストークス光 A S についてのサンプルデータ）に重畳されているノイズの変化量に応じた閾値を設定し、サンプルデータが閾値を超えているか否かに応じて、ローパスフィルタ 3 2 によって処理されたサンプルデータとローパスフィルタ 3 2 によって処理されていないサンプルデータとの何れか一方を選択して合成するようにしている。これにより、ストークス光 S T 及び反ストークス光 A S についてのサンプルデータの波形劣化を招くことなく空間周波数が高いノイズ成分を効果的に低減することができるため、温度分解能を向上させることができる。

【 0 0 5 9 】

〔第 2 実施形態〕

図 6 は、本発明の第 2 実施形態による光ファイバ温度分布測定装置が備えるフィルタ部の内部構成を示すブロック図である。尚、本実施形態の光ファイバ温度分布測定装置は、第 1 実施形態の光ファイバ温度分布測定装置 1 とは、フィルタ部 1 9 a , 1 9 b の内部構成が相違するのみであり、フィルタ部 1 9 a , 1 9 b 以外の構成は同様である。このため、以下では、主にフィルタ部 1 9 a , 1 9 b について説明する。

【 0 0 6 0 】

図 6 に示す通り、本実施形態の光ファイバ温度分布測定装置が備えるフィルタ部 1 9 a , 1 9 b は、第 1 実施形態で説明したフィルタ回路 3 0 に加えて、予備フィルタ回路 4 0 、遅延回路 5 0 、演算回路 6 0 （第 1 演算回路）、及び演算回路 7 0 （第 2 演算回路）を備える。かかる構成のフィルタ部 1 9 a , 1 9 b は、サンプルデータ D 1 1 , D 1 2 から大きな温度変化を除いた上で、前述したフィルタ回路 3 0 のフィルタ処理を行うことで、光ファイバ F B の長さ方向における温度分布がほぼ一定でない場合であっても、空間周波数が高いノイズ成分を効果的に低減するものである。

【 0 0 6 1 】

つまり、前述した第 1 実施形態におけるフィルタ部 1 9 a , 1 9 b は、光ファイバ F B の長さ方向における温度分布がほぼ一定である（大きな温度変化が生じていない）ことを前提として、フィルタ回路 3 0 で用いられる閾値を算出するものであった。このため、光ファイバ F B の長さ方向における温度分布がほぼ一定でない場合には、閾値を正しく算出することはできず、空間周波数が高いノイズ成分を効果的に低減することはできないと考えられる。

【 0 0 6 2 】

本実施形態のフィルタ部 1 9 a , 1 9 b は、サンプルデータ D 1 1 , D 1 2 から大きな温度変化を予め除いた上で前述したフィルタ回路 3 0 のフィルタ処理を行うことによって、光ファイバ F B の長さ方向における温度分布がほぼ一定でない場合であっても、空間周波数が高いノイズ成分を効果的に低減することを可能としている。尚、以下では、重複した説明を避けるために、フィルタ部 1 9 a について詳細に説明し、フィルタ部 1 9 b については説明を省略する。

【 0 0 6 3 】

予備フィルタ回路 4 0 は、第 1 実施形態で説明したフィルタ回路 3 0 と似た構成であり、平均化回路 1 8 から出力されるサンプルデータ D 1 1 に対するフィルタ処理を行って、サンプルデータ D 1 1 の概形（測定信号の概形）を抽出する。具体的に、予備フィルタ回路 4 0 は、閾値設定回路 4 1 （予備閾値設定回路）、ローパスフィルタ 4 2 （予備フィルタ）、遅延回路 4 3 、判定回路 4 4 （予備判定回路）、合成回路 4 5 （予備合成回路）、及び遅延回路 4 6 を備える。

【 0 0 6 4 】

閾値設定回路 4 1 は、予備フィルタ回路 4 0 で行われるフィルタ処理で用いられる閾値 T H 2 （予備閾値）を設定する。具体的に、閾値設定回路 4 1 は、ローパスフィルタ 4 2 によって処理されたサンプルデータ（データ Q 1 1 ）とローパスフィルタ 4 2 によって処理されていないサンプルデータ（サンプルデータ D 1 1 ）との差分の絶対値の平均値に応じた閾値 T H 2 を設定する。図 7 は、本発明の第 2 実施形態による光ファイバ温度分布測定装置が備えるフィルタ部の予備フィルタ回路で設定される閾値を説明するための図であ

10

20

30

40

50

る。

【 0 0 6 5 】

図 7 (a) に例示するサンプルデータ D 1 1 は、符号 A 1 で指し示す部分において急激にレベルが上昇し、且つ符号 A 2 で指し示す部分において急激にレベルが低下し、且つ全体に亘って細かなレベル変動があるデータである。このようなサンプルデータ D 1 1 をローパスフィルタ 4 2 で処理して得られるデータ (合成回路 4 5 に入力されるデータ Q 1 1) は、図 7 (a) に示す通り、符号 A 1 , A 2 で指し示す部分において信号レベルが緩やかに変化し、且つ細かなレベル変動が除かれたものになる。

【 0 0 6 6 】

閾値設定回路 4 1 は、まずローパスフィルタ 4 2 によって処理されたサンプルデータ (図 7 (a) 中のデータ Q 1 1) と、ローパスフィルタ 4 2 によって処理されていないサンプルデータ (図 7 (a) 中のサンプルデータ D 1 1) との差分の絶対値をサンプルポイント毎に求める。そして、

図 7 (b) に示す通り、各サンプルポイントで得られた差分の絶対値の平均値を算出し、算出した平均値の 2 倍程度の値を閾値 T H 2 として設定する。

【 0 0 6 7 】

この閾値設定回路 4 1 は、フィルタ回路 3 0 に設けられる閾値設定回路 3 1 と同様に、光ファイバ F B を複数の区間に区分し、区分した区間毎に上記の閾値 T H 2 を設定する。例えば、閾値設定回路 4 1 は、光ファイバ F B を、長さが 1 [k m] に設定された複数の区間に区分する。ここで、光ファイバ F B の長手方向に 1 [m] の間隔でサンプルポイントが設定されているとすると、区分した 1 [k m] の区間の各々には、 1 0 0 0 個のサンプルポイントが含まれることになる。このため、閾値設定回路 4 1 は、各々の区間について、 1 0 0 0 個のサンプルポイントで得られる連続する 1 0 0 0 個のデータを用いて閾値 T H 2 を算出する。尚、以下では、閾値設定回路 3 1 で区分される区間と閾値設定回路 4 1 で区分される区間とを区別するために、閾値設定回路 3 1 で区分される区間を「小区間」といい、閾値設定回路 4 1 で区分される区間を「大区間」という。

【 0 0 6 8 】

ローパスフィルタ 4 2 は、サンプルデータ D 1 1 に対して予め規定されたカットオフ周波数 (第 2 周波数) 以上の周波数成分を除去する処理を行う。このローパスフィルタ 4 2 は、サンプルデータ D 1 1 の概形 (測定信号の概形) を抽出するために設けられる。尚、ローパスフィルタ 4 2 のカットオフ周波数は、抽出すべきサンプルデータ D 1 1 の概形に応じて適宜設定される。

【 0 0 6 9 】

遅延回路 4 3 は、入力されるサンプルデータ D 1 1 を所定時間だけ遅延させる。具体的に、遅延回路 4 3 は、ローパスフィルタ 4 2 で行われる処理に要する時間だけサンプルデータ D 1 1 を遅延させる。この遅延回路 4 3 は、ローパスフィルタ 4 2 で処理されたデータ Q 1 1 が合成回路 4 5 に入力されるタイミングと、ローパスフィルタ 4 2 で処理されていないデータ Q 1 2 (サンプルデータ D 1 1) が合成回路 4 5 に入力されるタイミングとを調整するために設けられる。尚、このようなタイミング調整が不要であれば、遅延回路 4 3 を省略することは可能である。

【 0 0 7 0 】

判定回路 4 4 は、サンプルデータ D 1 1 の各々が、閾値設定回路 4 1 で設定された閾値 T H 2 を超えているか否かを判定し、その判定結果を合成回路 4 5 に出力する。合成回路 4 5 は、判定回路 4 4 の判定結果に応じて、ローパスフィルタ 4 2 で処理されたデータ Q 1 1 と、ローパスフィルタ 4 2 で処理されていないデータ Q 1 2 との何れか一方を選択して合成する。具体的に、合成回路 4 5 は、判定回路 4 4 からの判定結果が、閾値 T H 2 を超えていない旨を示すものである場合にはローパスフィルタ 4 2 で処理されたデータ Q 1 1 を選択して合成し、閾値 T H 2 を超えている旨を示すものである場合にはローパスフィルタ 4 2 で処理されていないデータ Q 1 2 を選択して合成する。

【 0 0 7 1 】

10

20

30

40

50

遅延回路 46 は、遅延回路 43 と同様に、入力されるサンプルデータ D11 を所定時間だけ遅延させる。但し、遅延回路 46 は、ローパスフィルタ 42 で行われる処理に要する時間と合成回路 45 で行われる処理に要する時間とを加えた時間だけサンプルデータ D11 を遅延させる。この遅延回路 46 は、合成回路 45 で合成されたサンプルデータ W1 が演算回路 60 に入力されるタイミングと、サンプルデータ D11 が演算回路 60 に入力されるタイミングとを調整するために設けられる。

【0072】

遅延回路 50 は、予備フィルタ回路 40 の合成回路 45 から出力されるサンプルデータ W1 を所定時間だけ遅延させる。具体的に、遅延回路 50 は、フィルタ回路 30 で行われる処理に要する時間だけサンプルデータ W1 を遅延させる。演算回路 60 は、予備フィルタ回路 40 の遅延回路 46 から出力されるサンプルデータ D11 から、サンプルデータ W1 (予備フィルタ回路 40 の合成回路 45 から出力されるサンプルデータ) を減算したサンプルデータ W2 をフィルタ回路 30 に出力する。つまり、演算回路 60 は、サンプルデータ D11 からサンプルデータ D11 の概形 (大きな温度変化) を除いたサンプルデータ W2 をフィルタ回路 30 に出力する。

10

【0073】

演算回路 70 は、遅延回路 50 から出力されるサンプルデータ (サンプルデータ W1) と、フィルタ回路 30 から出力されるサンプルデータ W3 とを加算して、サンプルデータ D21 として出力する。ここで、フィルタ回路 30 は、基本的には第 1 実施形態で説明したものと同一のものであるが、本実施形態においては、ローパスフィルタ 32 と合成回路 35 との間にローパスフィルタ 32 から出力されるデータ Q1 のレベルを低減する低減回路 36 が設けられている。この低減回路 36 は、空間周波数が高いノイズ成分を効果的に低減するために設けられた回路であり、例えばデータ Q1 のレベルを 0.3 ~ 0.5 倍程度に低減する。

20

【0074】

図 8 は、本発明の第 2 実施形態による光ファイバ温度分布測定装置における低減回路の効果を説明するための図である。尚、以下では、光ファイバ FB の長手方向における温度がなだらかに上昇している場合を例に挙げて説明する。低減回路 36 が省略されているとすると、光ファイバ温度分布測定装置で測定される温度分布は、図 8 (a) に示す通り、細かな温度変化を生じつつ温度が距離と共になだらかに上昇するものとなる。

30

【0075】

これに対し、低減回路 36 を設けることによって、図 8 (b), (c) に示す温度分布が得られる。尚、図 8 (b) に示す温度分布は、低減回路 36 の低減率を「0.375」に設定したときに得られる温度分布であり、図 8 (c) に示す温度分布は、低減回路 36 の低減率を「0.05」に設定したときに得られる温度分布である。まず、図 8 (b) に示す温度分布は、細かな温度変化が若干残っているものの自然なものになっているのが分かる。また、実際の僅かな温度変化がフィルタによって平滑化された場合も、温度誤差を少なくすることができる。これに対し、図 8 (c) に示す温度分布は、温度変化の大きな箇所以外は直線状になっており不自然なものになっているのが分かる。このため、低減回路 36 の低減率は、上述の通り、0.3 ~ 0.5 程度に設定するのが望ましい。

40

【0076】

ここで、サンプルデータ D11 のうちの第 i 番目のデータ X(i) に対する判定回路 44 の判定結果を J1(i) とし、サンプルデータ W1 のうちの第 i 番目のデータ W1(i) に対する判定回路 34 の判定結果を J2(i) とし、これら判定結果 J1(i), J2(i) に基づいて合成されるデータ (サンプリングデータ D21) を Y(i) とする。また、ローパスフィルタ 42 の伝達関数を H1(z) とし、ローパスフィルタ 32 の伝達関数を H2(z) とし、低減回路 36 の低減率を a とする。すると、図 6 に示すフィルタ部 19a は、以下の (3) 式で表される。

【0077】

【数3】

$$Y(i) = W1(i) + W3(i) \quad \dots (3)$$

$$W1(i) = X(i)J1(i) + H1(z)X(i)(1-J1(i))$$

$$W2(i) = X(i) + W1(i)$$

$$W3(i) = W2(i)J2(i) + aH2(z)W2(i)(1-J2(i))$$

10

【0078】

但し、判定結果 $J1(i)$ は、 $X(i)$ が閾値 $TH2$ を超えている場合には $J1(i) = 1$ となり、超えていない場合には $J1(i) = 0$ となる。また、判定結果 $J2(i)$ は、 $W1(i)$ が閾値 $TH1$ を超えている場合には $J2(i) = 1$ となり、超えていない場合には $J2(i) = 0$ となる。ここで、温度分解能の測定において、周囲温度が一定であるとすると、 $J1(i) = 0$ 、 $J2(i) = 0$ と考えられるため、上記(3)式は以下の(4)式となる。

【0079】

【数4】

$$\begin{aligned} Y(i) &= W1(i) + W3(i) \\ &= H1(z)X(i) + aH2(z)W2(i) \\ &= H1(z)X(i) + aH2(z)(1-H1(z))X(i) \\ &= \{H1(z) + a(1-H1(z))H2(z)\}X(i) \quad \dots (4) \end{aligned}$$

20

30

【0080】

上記(4)式において、右辺第1項が信号成分を表しており、右辺第2項がノイズ成分を示している。いま、簡単のために、フィルタ回路30に設けられたローパスフィルタ32が殆どの信号成分を通過させるとすると、温度分解能は、上記(4)式中の低減率 a に依存する。このため、低減率 a を $0.3 \sim 0.5$ 程度に設定することによって、温度分解能を2～3倍程度改善することができる。

【0081】

次に、本実施形態の光ファイバ温度分布測定装置の動作について説明する。尚、光源11からパルス状のレーザ光が順次射出されて、ストークス光 ST についてのサンプルデータの平均値(サンプルデータ $D11$)と、反ストークス光 AS についてのサンプルデータの平均値(サンプルデータ $D12$)とが平均化回路18で得られるまでの動作は第1実施形態と同様であるため省略する。

40

【0082】

平均化回路18における平均化処理が終了すると、平均化されたサンプルデータに含まれるノイズを除去するフィルタ処理がフィルタ部19a, 19bで行われる。尚、このフィルタ処理は、光ファイバ FB に設定された複数の大区間毎に行われる。具体的には、まず光ファイバ FB に設定された複数の大区間のうちの最初の大区間(光ファイバ温度分布測定装置1に最も近い大区間)に含まれる1000個のサンプルポイントのサンプルデータがフィルタ部19a, 19bの予備フィルタ回路40にそれぞれ読み出されて閾値 $TH2$ を設定する処理が行われる。

50

【 0 0 8 3 】

また、以上の処理と並行して、光ファイバFBに設定された複数の小区間に含まれる101個のサンプルポイント（区間両端におけるサンプルポイントを含む）のサンプルデータが順次フィルタ部19a, 19bのフィルタ回路30にそれぞれ読み出されて、複数の小区間の各々についての閾値TH1を設定する処理が行われる。尚、ここでは説明を簡単にするために、1つの大区間内における複数の小区間についての閾値TH1が一度に設定される例について説明するが、第1実施形態と同様に、小区間についての閾値TH1を順次設定しても良い。

【 0 0 8 4 】

次いで、上記の最初の大区間に含まれる1000個のサンプルポイントのサンプルデータが1つずつ順にフィルタ部19a, 19bに読み出され、これらのサンプルデータに含まれるノイズを除去する処理が行われる。具体的には、サンプルデータD11のうちの最初の1000個のデータが1つずつ順にフィルタ部19aに読み出されるとともに、サンプルデータD12のうちの最初の1000個のデータが1つずつ順にフィルタ部19bに読み出される。そして、フィルタ部19a, 19bにおいて、これらのデータに含まれるノイズを除去する処理が行われる。尚、フィルタ部19a, 19bで行われる処理は同様の処理であるため、以下ではフィルタ部19aで行われる処理について説明する。

【 0 0 8 5 】

フィルタ部19aに読み出されたデータは、フィルタ部19aに設けられた予備フィルタ回路40のローパスフィルタ42、遅延回路43、判定回路44、及び遅延回路46に入力される。すると、ローパスフィルタ42で高周波成分を除去する処理が行われるとともに、遅延回路43で所定時間だけ遅延させる処理が行われ、ローパスフィルタ42及び遅延回路43から合成回路45に対してデータQ11, Q12がそれぞれ出力される。また、判定回路44において、入力されたデータが閾値設定回路41で設定された閾値TH2を超えているか否かが判定され、その判定結果が合成回路45に出力される。

【 0 0 8 6 】

合成回路45は、判定回路44からの判定結果に応じて、ローパスフィルタ42で処理されたデータQ11と、ローパスフィルタ42で処理されていないデータQ12との何れか一方を選択して合成してサンプルデータW1として出力する処理を行う。また、遅延回路46からは、サンプルデータW1が出力されるタイミング（或いは、ほぼ同じタイミング）でサンプルデータD11が出力される。

【 0 0 8 7 】

予備フィルタ回路40から出力されたサンプルデータW1及びサンプルデータD11は演算回路60に出力され、サンプルデータD11からサンプルデータW1を減算したサンプルデータW2を求める演算が行われる。このサンプルデータW2は、フィルタ回路30に出力され、前述した小区間毎に設定された閾値TH1を超えているか否かが判定され、その判定結果に応じてローパスフィルタ32で処理されたデータQ1と、ローパスフィルタ32で処理されていないデータQ2との何れか一方を選択して合成してサンプルデータW3として出力する処理が合成回路35で行われる。フィルタ回路30から出力されたサンプルデータW3は、予備フィルタ回路40から出力されて遅延回路50を介したサンプルデータW1と加算されて、サンプルデータD21として出力される。

【 0 0 8 8 】

最初の大区間について以上の処理が終了すると、光ファイバFBに設定された複数の大区間のうちの2番目の大区間（光ファイバ温度分布測定装置1に2番目に近い大区間）に含まれる1000個のサンプルポイントのサンプルデータがフィルタ部19a, 19bにそれぞれ読み出されて上述した処理と同様の処理が行われる。以下、光ファイバFBに設定された複数の大区間及び小区間の各々について、閾値TH1, TH2を設定する処理及びノイズを除去する処理が同様に行われる。

【 0 0 8 9 】

フィルタ部19a, 19bにおける処理が終了すると、演算部20において、フィルタ

10

20

30

40

50

部 19 a からのサンプルデータ D 2 1 と、フィルタ部 19 b からのサンプルデータ D 2 2 とを用いて、サンプルポイント（測定点）毎の強度比が求められ、これによりサンプルポイント毎の温度が求められる。これらサンプルポイント毎の温度は、温度補正部 2 1 に出力され、不図示の温度センサ（光ファイバ F B の温度を測定する温度センサ）の測定結果に基づいて補正される。このようにして、光ファイバ F B の長さ方向における温度分布が求められる。

【 0 0 9 0 】

図 9 は、本発明の第 2 実施形態による光ファイバ温度分布測定装置の測定結果の一例を示す図であって、(a) は温度分布を示す図であり、(b) は温度分解能を示す図である。図 9 (a) において、符号 L 1 1 を付した曲線は、本実施形態の光ファイバ温度分布測定装置で得られる温度分布の一例を示す曲線であり、符号 L 1 2 を付した曲線は、フィルタ部 19 a , 19 b を備えていない従来の光ファイバ温度分布測定装置で得られる温度分布の一例を示す曲線である。また、図 9 (b) において、符号 L 2 1 を付した曲線は、本実施形態の光ファイバ温度分布測定装置の温度分解能を示す曲線であり、符号 L 2 2 を付した曲線は、従来の光ファイバ温度分布測定装置の温度分解能を示す曲線である。

10

【 0 0 9 1 】

まず、図 9 (a) を参照すると、本実施形態の光ファイバ温度分布測定装置で得られる温度分布を示す曲線 L 1 1 は、従来の光ファイバ温度分布測定装置で得られる温度分布を示す曲線 L 1 2 よりも細かな温度変化が緩和されており、空間周波数が高いノイズ成分が効果的に低減されているのが分かる。ここで、温度が局所的に低下している部分（符号 E を付した矢印で指し示す部分）に着目すると、本実施形態の光ファイバ温度分布測定装置では、従来の光ファイバ温度分布測定装置と同様に再現されており、フィルタ部 19 a , 19 b でのフィルタ処理を行っても信号成分の波形劣化は生じていないことが分かる。

20

【 0 0 9 2 】

次に、図 9 (b) を参照すると、本実施形態の光ファイバ温度分布測定装置の温度分解能を示す曲線 L 2 1 は、従来の光ファイバ温度分布測定装置の温度分解能を示す曲線 L 2 2 よりも全体的に値が小さくなっており、温度分解能が向上していることが分かる。具体的に、図 9 (b) に示す例では、本実施形態の光ファイバ温度分布測定装置の温度分解能が、従来の光ファイバ温度分布測定装置の温度分解能に比べて、2 . 3 倍程度改善している。

30

【 0 0 9 3 】

以上の通り、本実施形態では、サンプルデータ D 1 1 , D 1 2 の概形（大きな温度変化）を抽出する予備フィルタ回路 4 0 をフィルタ回路 3 0 の前段に備えるフィルタ部 19 a , 19 b を用いて、サンプルデータ D 1 1 , D 1 2 から大きな温度変化を除いた上で、フィルタ回路 3 0 のフィルタ処理を行うようにしている。このため、光ファイバ F B の長さ方向における温度分布がほぼ一定でない場合であっても、信号成分の波形劣化を生ずることなく空間周波数が高いノイズ成分を効果的に低減することができ、これにより温度分解能を向上させることができる。

【 0 0 9 4 】

〔 第 3 実施形態 〕

40

図 1 0 は、本発明の第 3 実施形態による光ファイバ温度分布測定装置が備えるフィルタ部の内部構成を示すブロック図である。前述した第 2 実施形態の光ファイバ温度分布測定装置のフィルタ部 19 a , 19 b は、予備フィルタ回路 4 0 とフィルタ回路 3 0 とを備える 2 段構成のものであったが、本実施形態の光ファイバ温度分布測定装置のフィルタ部 19 a , 19 b は、予備フィルタ回路 4 0 、フィルタ回路 3 0 、及びフィルタ回路 8 0 を備える 3 段構成のものである。

【 0 0 9 5 】

具体的に、光ファイバ温度分布測定装置のフィルタ部 19 a , 19 b は、前述した第 2 実施形態の光ファイバ温度分布測定装置のフィルタ部 19 a , 19 b に、フィルタ回路 8 0 及び演算回路 8 1 , 8 2 を追加した構成である。尚、図 1 0 において、遅延回路 5 0 の

50

図示を省略している。フィルタ回路 80 は、フィルタ回路 30 と同様の回路である。演算回路 81 は、演算回路 60 から出力されるサンプルデータ W2 から、サンプルデータ W3 (フィルタ回路 30 の合成回路 35 から出力されるサンプルデータ) を減算したサンプルデータ W4 をフィルタ回路 80 に出力する。演算回路 81 は、演算回路 70 から出力されるサンプルデータと、フィルタ回路 80 から出力されるサンプルデータ W5 とを加算して、サンプルデータ D21 として出力する。

【0096】

以上の通り、予備フィルタ回路 40、フィルタ回路 30、及びフィルタ回路 80 を備える 3 段構成のフィルタ部 19a, 19b を用いることで、第 2 実施形態の光ファイバ温度分布測定装置よりも精度を向上させることが可能である。

【0097】

〔第 4 実施形態〕

図 11 は、本発明の第 4 実施形態による光ファイバ温度分布測定装置の要部構成を示すブロック図である。本実施形態の光ファイバ温度分布測定装置 2 は、第 1 ~ 第 3 実施形態の光ファイバ温度分布測定装置が備えるフィルタ部 19a, 19b を省略し、温度補正部 21 で得られる温度分布を補正するフィルタ部 22 を設けた構成である。このフィルタ部 22 は、フィルタ部 19a, 19b と同様の構成である。

【0098】

つまり、前述した第 1 ~ 第 3 実施形態の光ファイバ温度分布測定装置は、光ファイバ FB の長手方向におけるストークス光 ST 及び反ストークス光 AS の強度分布 (サンプルデータ D11, D12) に対してフィルタ部 19a, 19b によるフィルタ処理を行うものであった。これに対し、本実施形態の光ファイバ温度分布測定装置は、光ファイバ FB の長手方向における温度分布 (正確には、温度補正部 21 で温度補正がされた温度分布) に対してフィルタ部 22 によるフィルタ処理を行うものである。

【0099】

光ファイバ FB の長手方向における温度分布は、光ファイバ FB の長手方向におけるストークス光 ST 及び反ストークス光 AS の強度分布を用いて得られるものである。このため、本実施形態においても、第 1 ~ 第 3 実施形態と同様に、波形劣化を招くことなく空間周波数が高いノイズ成分を効果的に低減することができ、これにより温度分解能を向上させることができる。

【0100】

以上、本発明の実施形態による光ファイバ温度分布測定装置について説明したが、本発明は上記実施形態に制限されることなく、本発明の範囲内で自由に変更が可能である。例えば、上述した実施形態では、ストークス光 ST と反ストークス光 AS とを光電変換回路 15a, 15b でそれぞれ光電変換し、これらの光電変換信号に対して A/D 変換回路 17a, 17b でそれぞれサンプリングする構成について説明した。しかしながら、光周波数の領域でストークス光 ST と反ストークス光 AS とを同一のタイミングでサンプリングし、サンプリングされたストークス光 ST と反ストークス光 AS とを光電変換回路 15a, 15b を用いて個別に光電変換する構成であっても良い。かかる構成の場合には、A/D 変換回路 17a, 17b は省略される。

【符号の説明】

【0101】

1, 2	光ファイバ温度分布測定装置
30	フィルタ回路
31	閾値設定回路
32	ローパスフィルタ
34	判定回路
35	合成回路
36	低減回路
40	予備フィルタ回路

10

20

30

40

50

- 4 1 閾値設定回路
- 4 2 ローパスフィルタ
- 4 4 判定回路
- 4 5 合成回路
- 6 0 , 7 0 演算回路
- A S 反ストークス光
- F B 光ファイバ
- S T ストークス光
- T H 1 閾値

【図1】

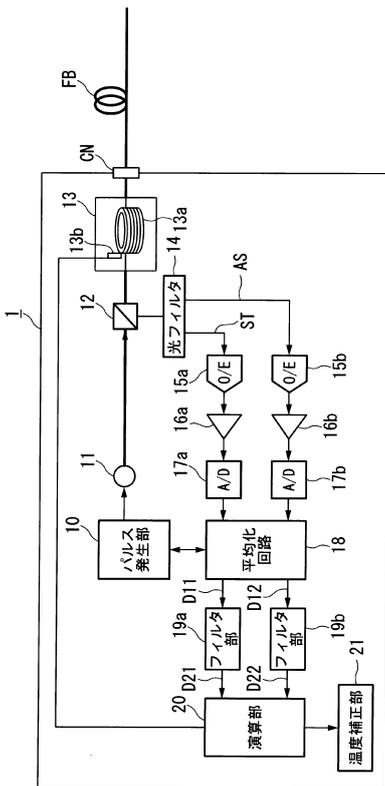


図1

【図2】

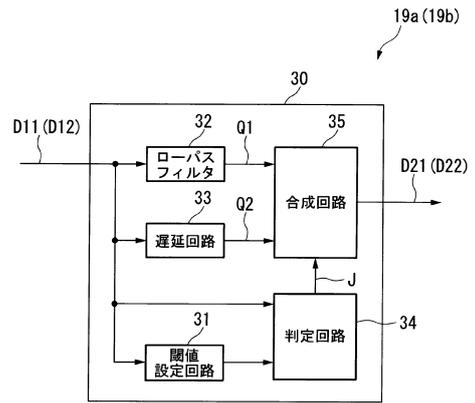


図2

【図3】

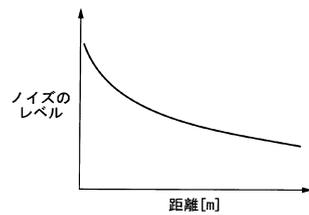


図3

【 図 4 】

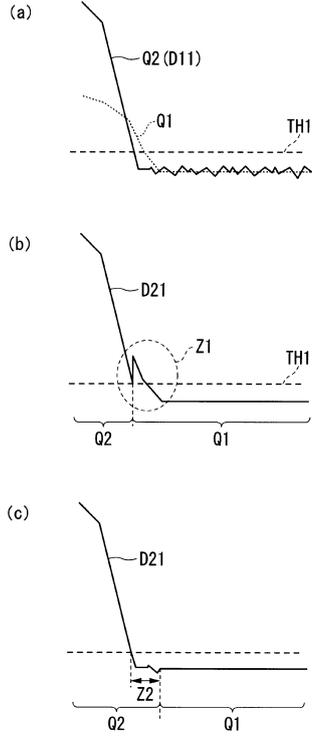


図 4

【 図 5 】

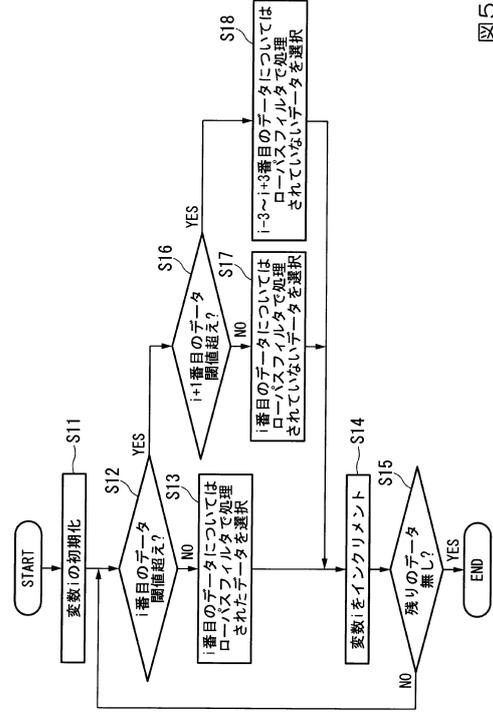


図 5

【 図 6 】

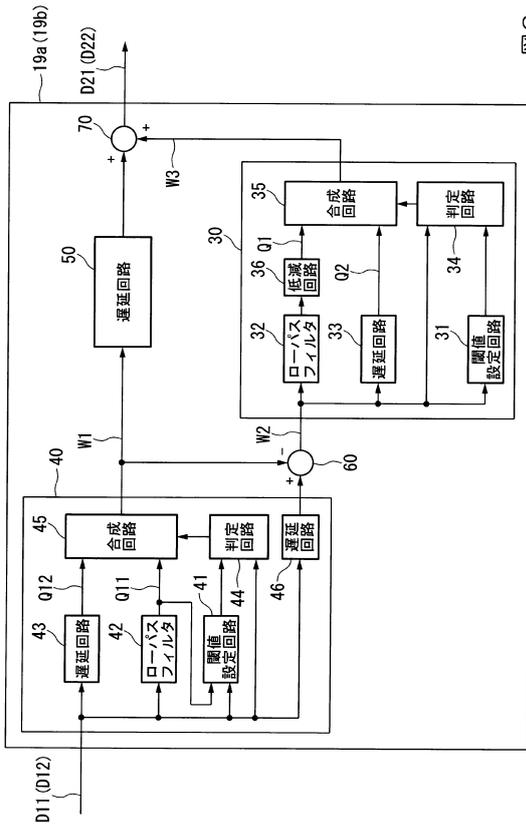


図 6

【 図 7 】

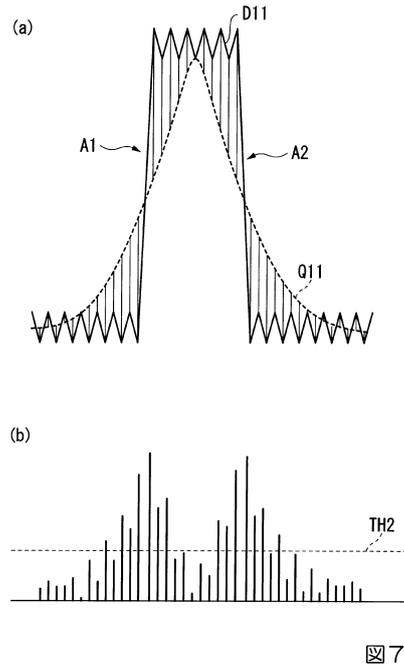


図 7

【 図 8 】

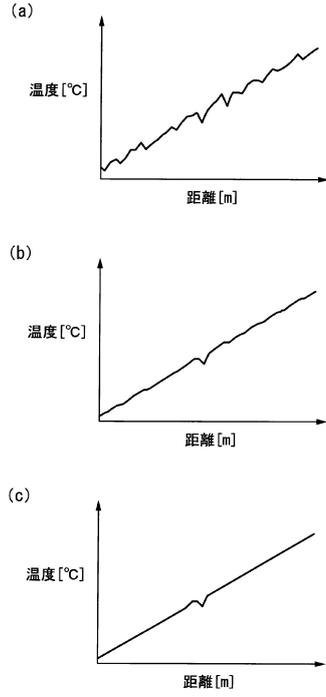


図 8

【 図 9 】

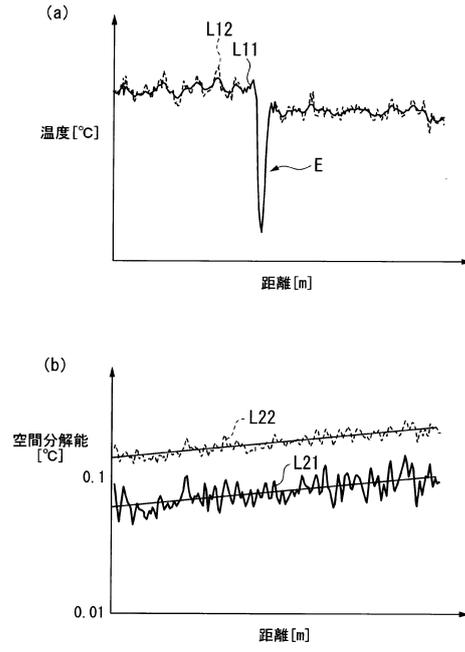


図 9

【 図 10 】

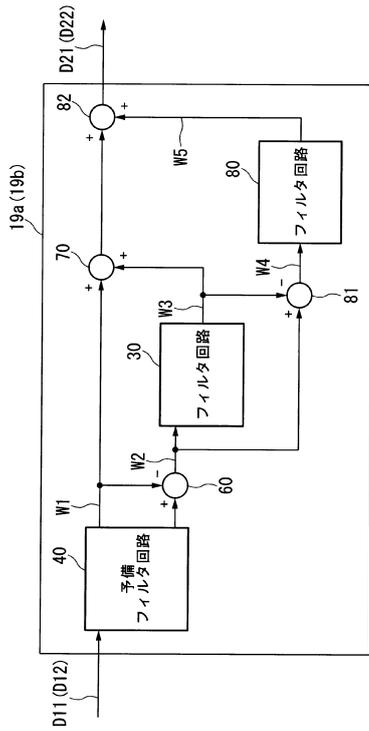


図 10

【 図 11 】

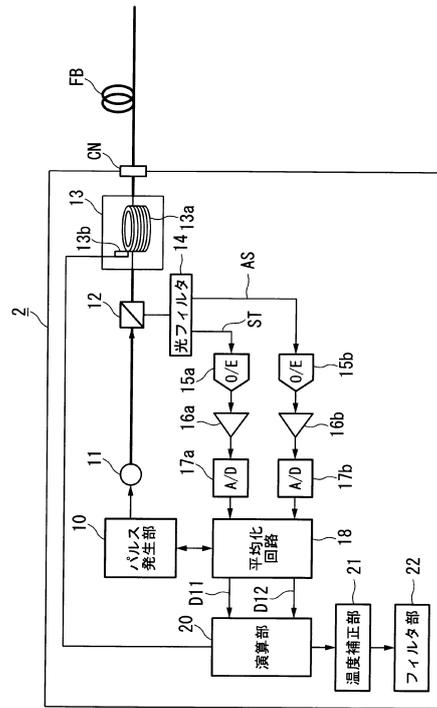


図 11

フロントページの続き

(72)発明者 志田 秀夫
東京都武蔵野市中町2丁目9番32号 横河電機株式会社内

審査官 平野 真樹

(56)参考文献 特開2012-242124(JP,A)
特開2005-333528(JP,A)
特開2005-277565(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
G01K 1/00-19/00