

【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

コヒーレントな第 1 の信号光を発する第 1 の光源と、
前記第 1 の光源からの出力光を分岐して局発光と試験光とを生成する分岐手段と、
前記試験光の周波数を所定の時間間隔毎に所定間隔変化させる光周波数制御手段と、
前記光周波数制御手段の出力を光パルス化して試験光パルスを生成する光パルス化手段と、

前記第 1 の光源の出力光とは異なる波長の第 2 の信号光を発生する第 2 の光源と、
前記第 2 の光源からの出力光を前記試験光パルスに重畳して光パルス信号を生成する光重畳手段と、

前記光パルス信号を被試験光ファイバに入射し、前記被試験光ファイバの各地点で反射または散乱により発生した後方散乱光を取得する後方散乱光取得手段と、

前記後方散乱光と前記局発光を光結合する光結合手段と、

前記光結合された光信号を光受信して電流信号を取得する光受信手段と、

前記電流信号を複数の周波数成分毎に分離する周波数分離手段と、

前記試験光の被試験光ファイバからの反射光及び後方散乱光の反射率分布を求める演算処理手段と

を具備し、

前記演算処理手段は、前記複数の周波数成分の各々における複数の反射率分布を加算平均化処理し、前記加算平均化処理された反射率分布における雑音の平均値を前記加算平均化処理された反射率分布から減算処理し、前記減算処理された反射率分布を前記複数の周波数成分で加算平均化処理することを特徴とする光パルス試験装置。

【請求項 2】

前記試験光パルスに含まれる複数の周波数成分の各々と前記局発光の周波数の差の少なくとも 1 つが 20 MHz 以下にあることを特徴とする請求項 1 に記載の光パルス試験装置。

【請求項 3】

コヒーレントな第 1 の信号光を分岐して局発光と試験光とを生成し、

前記試験光に対して周波数を所定の時間間隔毎に所定間隔変化させる光周波数制御を施し、

前記光周波数制御された試験光を光パルス化して試験光パルスを生成し、

前記第 1 の光源の出力光とは異なる波長の第 2 の信号光を前記試験光パルスに重畳して光パルス信号を生成し、

前記光パルス信号を被試験光ファイバに入射し、前記被試験光ファイバの各地点で反射または散乱により発生した後方散乱光を取得し、

前記後方散乱光と前記局発光を光結合し、

前記光結合された光信号を光受信して電流信号を取得し、

前記電流信号を複数の周波数成分毎に分離し、

前記試験光の被試験光ファイバからの反射光及び後方散乱光の反射率分布を求める光パルス試験装置に用いられ、

前記複数の周波数成分の各々における複数の反射率分布を加算平均化処理するステップと、

前記加算平均化処理された反射率分布における雑音の平均値を前記加算平均化処理された反射率分布から減算処理するステップと、

前記減算処理された反射率分布を前記複数の周波数成分で加算平均化処理するステップと

を具備することを特徴とする光パルス試験方法。

【請求項 4】

前記試験光パルスに含まれる複数の周波数成分の各々と前記局発光の周波数の差の少なくとも 1 つが 20 MHz 以下にあることを特徴とする請求項 3 に記載の光パルス試験方法

。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

発明は、光線路の光損失分布や断線位置等を測定するための光パルス試験装置及び光パルス試験方法に関する。

【背景技術】

【0002】

被試験光ファイバ（Fiber under test、以後FUTと称する）に試験光パルスを送出し、FUTからの後方散乱光を受信、解析することで各地点における光の反射率分布を測定する技術として光パルス試験方法（Optical Time Domain Reflectometry、以後OTDRと称する）が知られている。OTDRは、FUTに試験光パルスを送出し、FUTからの反射光やレイリー後方散乱光（以後、単に後方散乱光と称する）を受信、解析することでFUTの各地点における光の反射率分布（以後、OTDR波形と称する）を測定する方法、装置である。この技術は光ファイバの片端からその損失分布評価を試験できるため、敷設された光ファイバの保守運用の観点から重要な技術である。

【0003】

OTDRの最大測定距離はFUTの光損失値とOTDRのダイナミックレンジにより決まる。ここで、ダイナミックレンジとは測定の際に許容される最大損失値である。ダイナミックレンジを拡大する方法として、主にFUTへ入射させる試験光パルスピークパワーを大きくする方法、受信系の最小受信感度を向上させる方法、試験光パルスを繰り返し入射し、測定結果を加算平均処理することによって測定信号の信号対雑音強度比を向上させる方法がある。最小受信感度を向上させる方法として、コヒーレント検波技術があり、このコヒーレント検波技術を用いるOTDR（Coherent OTDR、以後C-OTDRと称する）が長距離の測定方法として実用化されている（非特許文献1参照）。

【0004】

この従来のC-OTDRは、コヒーレント光を発する光源からの出力光を光方向性結合器によって試験光と局発光に分岐させる。分岐された試験光は光増幅器によって増幅された後、音響光学素子に入射され、周波数シフトを伴いパルス化される。パルス化された試験光は光サーキュレータを通過し、FUTに入射される。FUTで生じた後方散乱光は光サーキュレータにより光受信器側のみに向かい、光方向性結合器により前述の局発光と結合された後、バランス型光受信器によって受信される。これより、局発光と後方散乱光の干渉によって生じる干渉ビート信号が信号電流として検出される。信号電流は、後段のミキサにおいて音響光学素子と同じ周波数を有する正弦波電流とミキシングされた後、低域ろ過フィルタによって低域成分がろ過される。ミキシングによりベースバンド信号となった電流は、A/D（Analog/Digital）変換器によって数値化された後、数値演算処理器によって加算平均処理される。処理された数値列を対数表示することでOTDR波形を得ることができる。

【0005】

ここで、特許文献1では、所定時間間隔毎に所定周波数間隔だけ変化させた試験光を光パルス化してFUTに入射し、FUTからの反射及び後方散乱光を、試験光を分岐させた局発光とバランス型光受信器によって受信した後に周波数毎に分離して試験光パルスの複数の周波数成分による反射率分布を求める技術が提案されている。特許文献1記載の方法は、複数の周波数成分による多重効果によって、従来法のC-OTDR測定に比べ、一回の測定当たりを取得できる反射率分布が多重数分取得できるため、実効上の加算平均処理数を多く実行し、ダイナミックレンジを拡大することができる。

【0006】

ところで、光増幅器を光線形中継器として用いた海底光増幅中継伝送（FSA：Fiber Submarine transmission optical Amplifiers using in-line）システムでは、C-OTDRを用いる場合、光増幅器に試験光パルスが入射されるが、その試験光パルスの増幅度は連

10

20

30

40

50

続光に比べて、非常に大きくなり、光増幅器出力光の一部を測定している受光器が破壊されるという問題点（以下、光サージと呼ぶ）があった。これに対し、特許文献2では、試験光パルスに波長の異なる光をダミー光として重畳させて試験光全体の強度変動を抑えることで、その強度を通信用の信号光強度とほぼ同程度に調整し、光サージの影響を抑制する技術が提案されている。

【0007】

しかしながら、特許文献1の提案技術をFSAシステムに適用する場合、例えば特許文献2に記載の技術を適用することになるが、この際、ダミー光を重畳させた試験光の誘導ブリルアン散乱光が発生する場合がある。誘導ブリルアン散乱は、例えば非特許文献2に記載のように、直流成分に近い低周波数領域においてある一定の強度ゆらぎを有することが知られており、このゆらぎに対応する周波数成分が、バランス光受信された干渉ビート信号に含まれ雑音成分となるという課題がある。具体的には、複数の周波数成分を有する試験光パルスと局発光との周波数差が、誘導ブリルアン散乱の強度変調周波数に近い場合、特許文献1の提案技術により得られる雑音は周波数応答特性を持つことになり、これを考慮した雑音レベルの減算手法を用いる必要がある。特に、FSAシステムでは、微弱な誘導ブリルアン散乱光であったとしても、光増幅器にて増幅されて受信器側に戻ってくることになり、中継器の数が多段になればなるほど、その影響は顕著になる。

10

【0008】

上記の課題に対して、例えば複数の周波数成分を有する試験光パルスと局発光のビート信号を、誘導ブリルアン散乱の低周波数領域の雑音を避けるように、前記複数の周波数成分を設計する、またはバランス型光受信器の後段に電気段にてミキシングして任意の周波数領域のみを取り出すという方法もある。しかしながら、これらの場合はバランス光受信器や数値化処理器の受信帯域をより広帯域にせざるを得なく、受信感度の低下を招いたり、受信回路構成が複雑で高価なものになってしまうという課題がある。

20

【先行技術文献】

【特許文献】

【0009】

【特許文献1】特開2011-164075号公報

【特許文献2】特開平6-294705号公報

【非特許文献】

30

【0010】

【非特許文献1】H. Izumita et al, "The Performance Limit of Coherent OTDR Enhanced with Optical Fiber Amplifiers due to Optical Nonlinear Phenomena" JLT., vol. 12, no. 7, pp. 1230-1238 (1994)

【非特許文献2】飯田, 伊藤, "誘導ブリルアン散乱参照光を用いた低周波温度センシング", 信学技報OFT2008-43, pp. 45-50, Oct. 2008

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0011】

以上のように、従来では、OTDRのダイナミックレンジ拡大（長距離測定）を目的に、コヒーレント検波を用いるC-OTDRによる海底光増幅中継伝送（FSA）システム等の光伝送システムの監視にあたっては、（1）測定時間の短縮、（2）光サージ現象の防止、が課題となっており、（1）の課題に対して、周波数多重の試験光を入射し得られた後方散乱光を周波数成分毎に分解する方式、（2）の課題に対して、試験光に波長の異なるダミー光を重畳させて試験光の強度変動を抑え、通信用信号の光強度と同程度に調整して光サージを抑制する方式、が提案されている。しかしながら、この対策を講じる場合、ダミー光を重畳した周波数多重の試験光に起因する誘導ブリルアン散乱光（強度変調周波数成分）が発生し、C-OTDRで受信する干渉ビート信号において、無視できない雑音成分になってしまう、という問題があった。

40

【0012】

50

そこで本発明は、C - O T D Rを採用する光伝送システムの監視において、誘導ブリルアン散乱光による雑音成分を効率よく除去することを実現する光パルス試験装置及び光パルス試験方法を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0013】

上記の課題を解決するため、本発明に係る光パルス試験装置は、以下の態様で構成される。

(1) コヒーレントな第1の信号光を発する第1の光源と、前記第1の光源からの出力光を分岐して局発光と試験光とを生成する分岐手段と、前記試験光の周波数を所定の時間間隔毎に所定間隔変化させる光周波数制御手段と、前記光周波数制御手段の出力を光パルス化して試験光パルスを生成する光パルス化手段と、前記第1の光源の出力光とは異なる波長の第2の信号光を発生する第2の光源と、前記第2の光源からの出力光を前記試験光パルスに重畳して光パルス信号を生成する光重畳手段と、前記光パルス信号を被試験光ファイバに入射し、前記被試験光ファイバの各地点で反射または散乱により発生した後方散乱光を取得する後方散乱光取得手段と、前記後方散乱光と前記局発光を光結合する光結合手段と、前記光結合された光信号を光受信して電流信号を取得する光受信手段と、前記電流信号を複数の周波数成分毎に分離する周波数分離手段と、前記試験光の被試験光ファイバからの反射光及び後方散乱光の反射率分布を求める演算処理手段とを具備し、前記演算処理手段は、前記複数の周波数成分の各々における複数の反射率分布を加算平均化処理し、前記加算平均化処理された反射率分布における雑音の平均値を前記加算平均化処理された反射率分布から減算処理し、前記減算処理された反射率分布を前記複数の周波数成分で加算平均化処理する態様とする。

【0014】

(2) (1)において、前記試験光パルスに含まれる複数の周波数成分の各々と前記局発光の周波数の差の少なくとも1つが20MHz以下にある態様とする。

また、本発明に係る光パルス試験方法は、以下の態様で構成される。

(3) コヒーレントな第1の信号光を分岐して局発光と試験光とを生成し、前記試験光に対して周波数を所定の時間間隔毎に所定間隔変化させる光周波数制御を施し、前記光周波数制御された試験光を光パルス化して試験光パルスを生成し、前記第1の光源の出力光とは異なる波長の第2の信号光を前記試験光パルスに重畳して光パルス信号を生成し、前記光パルス信号を被試験光ファイバに入射し、前記被試験光ファイバの各地点で反射または散乱により発生した後方散乱光を取得し、前記後方散乱光と前記局発光を光結合し、前記光結合された光信号を光受信して電流信号を取得し、前記電流信号を複数の周波数成分毎に分離し、前記試験光の被試験光ファイバからの反射光及び後方散乱光の反射率分布を求める光パルス試験装置に用いられ、前記複数の周波数成分の各々における複数の反射率分布を加算平均化処理するステップと、前記加算平均化処理された反射率分布における雑音の平均値を前記加算平均化処理された反射率分布から減算処理するステップと、前記減算処理された反射率分布を前記複数の周波数成分で加算平均化処理するステップとを有する態様とする。

(4) (3)において、前記試験光パルスに含まれる複数の周波数成分の各々と前記局発光の周波数の差の少なくとも1つが20MHz以下にある態様とする。

【発明の効果】

【0015】

本発明では、具体的には、FUTから受信した後方散乱光と試験光（または局発光）とを結合した光を光電変換し、この電流信号を周波数成分毎に分解した後方散乱光の反射率分布を求め、この反射率分布を周波数成分毎に加算平均化するステップと、当該周波数成分における雑音の平均値を当該周波数成分の（加算平均化された）反射率分布から減算するステップと、（減算処理された）各周波数成分の（加算平均化された）反射率分布を加算平均化するステップにより雑音除去するものである。これにより、C - O T D Rによる長距離高精度測定を短時間（周波数多重の数によるが、測定時間が1/40程度に短縮）

に実施することができ、C - O T D R による F S A システム等の光伝送システムの監視品質が飛躍的に向上する。

【 0 0 1 6 】

したがって、本発明によれば、C - O T D R を採用する光伝送システムの監視において、誘導ブリルアン散乱光による雑音成分を効率よく除去することを実現する光パルス試験装置及び光パルス試験方法を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【 0 0 1 7 】

【図 1】本発明の一実施形態に係る光パルス試験装置の構成を示すブロック図。

【図 2】図 1 に示す光パルス試験装置の演算処理装置における演算処理内容を示すフローチャート。

【図 3】図 1 に示す光パルス試験装置のバランス型光受信装置の前段にて取得した後方散乱光のスペクトル結果の一例を示す波形図。

【図 4】図 1 に示す光パルス試験装置のバランス型光受信装置にて検出されたビート信号のパワースペクトルを測定した結果の一例を示す波形図。

【発明を実施するための形態】

【 0 0 1 8 】

添付の図面を参照して本発明の実施の形態を説明する。以下に説明する実施の形態は本発明の構成の例であり、本発明は、以下の実施の形態に制限されるものではない。

図 1 は F S A システムにおいて、本発明に係る実施形態の光パルス試験方法を採用する光パルス試験装置の構成を示すブロック図である。図 1 に示す光パルス試験装置は、試験光の各周波数成分による被試験光ファイバからの反射光および後方散乱光の反射率分布を求めることができるものであり、かつ光増幅器を光線形中継器として用いた F S A システムの測定において、試験光パルスの光サージを抑圧するものである。

【 0 0 1 9 】

コヒーレント光を発する第 1 光源 1 からの出力光は分岐素子 2 で 2 系統に分岐される。分岐された光の一方は局発光として用いられ、他方は試験光として光周波数制御装置 3 に入射される。この光周波数制御装置 3 は所定の時間間隔 W (秒) 毎に試験光の周波数を所定の周波数幅だけ全部で M 個の周波数を持つように段階的にシフトさせる。

【 0 0 2 0 】

ここで、第 1 光源 1 からの出力光の線幅は、光周波数制御装置 3 により所定周波数を持続させる時間 W の逆数よりも小さい必要がある。これは、光パルス試験装置に要求される距離分解能に対応した光の振幅および周波数の持続した時間幅の逆数よりも小さい線幅を持った光源を用意する必要があることを意味しており、本実施形態では 1 0 k H z 以下としている。

【 0 0 2 1 】

ここで、分岐素子 2 は具体的には光カブラまたはハーフミラーで構成される。また、光周波数制御装置 3 は、具体的には駆動源となる正弦波発生器 7 (パルス発生器 6 からの駆動パルスによって制御される) からの信号周波数に応じて変調側波帯の周波数が変化する機能をもつ外部変調器であればよく、LiNbO₃を用いた位相変調器や振幅変調器、S S B - S C (搬送波抑圧光単側波帯) 変調器がその機能を持つことは良く知られている。

【 0 0 2 2 】

光周波数制御装置 3 による周波数シフト間隔は、周波数を持続させる所定時間間隔 W の逆数の自然数倍である必要がある。これは、複数の周波数成分による後方散乱光の信号を周波数成分毎に分離し、測定するために必要であり、シフトさせた各周波数成分によるパワースペクトル成分がそれぞれ互いに直交するように設定しなければ、一つの周波数による後方散乱光パワーを測定することができないためである。

【 0 0 2 3 】

上記光周波数制御装置 3 で周波数制御を受けた試験光は、光増幅器 4 で信号光パワーが増幅された後、光パルス化装置 5 で光パルス化される。この光パルス化装置 5 は、具体的

10

20

30

40

50

には音響光学素子をパルス駆動した音響光学スイッチであるが、 LiNbO_3 を用いた電気光学素子をパルス駆動した導波路スイッチや高速な可変光減衰器で構成されてもよい。本実施形態では、光周波数制御装置 3 による周波数シフト間隔を 800 kHz として $M = 40$ 段シフトさせており、FUT11 への入射端において、局発光との周波数差にして $8.4 \sim 39.6\text{ MHz}$ になるような構成を用いている。

【0024】

なお、上記光周波数制御装置 3 と光パルス化装置 5 は互いに同期させるようにし、光パルス化させる時間幅を、光周波数制御装置 3 により全て周波数シフトさせた時間幅と等しくなるようにする。具体的には、パルス発生器 6 で発生されるパルスにより、正弦波発生器 7、光パルス化装置 5、9 及び後述の数値化装置 14 の動作タイミングを制御する。

10

【0025】

第 2 光源 8 は、第 1 光源 1 とは波長の異なる光源であり、ダミー光として試験光パルスに重畳させて試験光全体の強度変動を抑えることで、その強度を通信用の信号光強度とほぼ同程度に調整し、光サージの影響を抑制するためのものである。

上記第 2 光源 8 は、別の光パルス化装置 9 にて、試験光パルスとパルス周期が逆となるように駆動されており、光増幅器 4 からの試験光パルスと光パルス化装置 5 にて重畳され、FUT11 への入射端において、時間的に試験光パルスとダミー光パルスが重畳された光の強度がほぼ一樣になるように出力が調整されている。本実施形態では、FSA システムの光増幅器出力が約 10 dBm ほどであるため、一樣化された重畳光も強度も約 10 dBm 程度としている。

20

【0026】

ここで、第 2 光源 8 の波長は、本測定の受信には必要のない光信号となるため、第 1 光源 1 の波長とバランス型光受信装置 13 の受信帯域以上離しておく必要がある。一方、FSA システムにおける光増幅器には増幅利得波長依存性があり、増幅利得波長依存性による第 1 光源 1 からの試験光パルスと第 2 光源 8 からのダミー光パルスの強度差を抑制するため、波長は近い方が望ましい。本実施形態では、第 2 光源 8 と第 1 光源 1 の波長差は、約 $1 \sim 2\text{ nm}$ 程度としている。

【0027】

光パルス化装置 5 で光パルス化された試験光は、光サーキュレータ 10 を通過し、FUT11 に入射される。FUT11 では、試験光パルスによる後方散乱光が生じる。この後方散乱光は光サーキュレータ 10 に入射され、光パルス化装置 5 の方向には戻らず、光受信装置 13 側のみに向かう。光サーキュレータ 10 から出力された後方散乱光は、上記局発光と結合素子 12 で結合される。この結合素子 12 からの出力光は、バランス型光受信装置 13 で光受信されて電流信号となる。バランス型光受信装置 13 から出力される電流信号は、数値化装置 14 で数値化されてから演算処理装置 15 に入力される。

30

【0028】

ここで、よく知られたナイキストの定理により、バランス型光受信装置 13 及び数値化装置 14 の受信帯域は、前記局発光と試験光パルスの所定周波数シフト総量の 2 倍以上である必要がある。本実施形態では、バランス型光受信装置 13 及び数値化装置 14 の受信帯域は 100 MHz としている。前述の通り、局発光との周波数差にして $8.4 \sim 39.6\text{ MHz}$ (約 40 MHz 以下) になるような構成としているため、2 倍以上ある受信帯域 100 MHz で十分であることが分かる。

40

【0029】

図 2 は、上記演算処理装置 15 における最終的な OTDR 波形を得るまでの演算フローを示している。まず、1 回の試験光パルスを入射して得られる後方散乱光がバランス型光受信装置 13 及び数値化装置 14 を経て離散的な信号、すなわち M 個の周波数成分信号を含む離散データのサンプリング結果を入力する (ステップ S1)。なお、この信号には、上記光周波数制御装置 3 にて多重化された周波数成分が含まれる。また、この信号には、試験光パルスに重畳されたダミー光は、バランス型光受信装置 13 及び数値化装置 14 の受信帯域の範囲外となって含まれていない。

50

【 0 0 3 0 】

次に、上記入力信号のパワースペクトルを算出するため、窓関数処理および離散フーリエ変換処理を行う（ステップ S 2）。試験光パルスにおいてある一つの周波数を持続させる所定時間間隔が W（秒）の時、本実施形態に係る試験装置で得られる最小の距離分解能は W によって決定される。1 回の離散フーリエ変換を行う隣接点数 P は、数値化装置 1 4 のサンプリングレートが S（サンプル / 秒）の時、最小の距離分解能に相当する時間以下となるように設定される必要がある。具体的には、

$$P = W \cdot S \quad \dots (1)$$

で決定される。

【 0 0 3 1 】

なお、最終的な O T D R 波形上、すなわち距離軸上における反射率分布の最小サンプリング分解能 Q は、上記離散フーリエ変換を入力信号の何点毎に処理するかを意味することになり、本実施形態に係る試験装置で得られる最小の距離分解能の少なくとも半分以下とする必要があり、以下で示される。

$$Q = W \cdot v_g / 4 \quad \dots (2)$$

ここで、 v_g は光ファイバ中の光速であり、石英光ファイバでは 2×10^8 （m / 秒）である。

【 0 0 3 2 】

なお、本実施形態に係る試験装置においては、離散フーリエ変換による入力信号のパワースペクトル計算時に発生するサイドローブが測定誤差要因となるため、離散フーリエ変換前に上記サイドローブを効果的に低減することができるブラックマンハリス窓関数を適用することが望ましい。

【 0 0 3 3 】

次に、上記入力信号のパワースペクトルより、試験光パルスの入射した周波数成分は既知であるので、これに対応する M 個の周波数における振幅値が抽出して信号強度を算出する（ステップ S 3）。すなわち、上記光周波数制御装置 3 による周波数シフト間隔が既知であるので、各周波数に応じた振幅値を抽出し、絶対値の 2 乗を取ることで、1 回の離散フーリエ変換における複数の周波数毎の反射率が求められる。そこで、F U T 長分のデータ点数に相当する時間範囲でこれを繰り返す（ステップ S 4）。これによって、1 回の試験光パルスの入射毎に複数の周波数における F U T 全長に渡る反射率分布（ R_{f1} 、 R_{f2} ... R_{fM} ）を求めることができる。

【 0 0 3 4 】

次に、2 回目の試験光パルスを入射して同様に得られた反射率分布と上記 1 回目得られた反射率分布に加算する処理を、試験光パルスの入射繰り返し数 N 回分繰り返し、最後に N で割ることで、複数の周波数毎に加算平均化処理された（ P_{f1} 、 P_{f2} ... P_{fM} ）を得る（ステップ S 5，S 6）。

【 0 0 3 5 】

なお、本実施形態に係る試験装置における試験光パルス送出間隔 T については、F U T 長を光が往復伝搬する時間、後述する演算処理装置における演算処理時間も考慮して、

$$T = 2L / v_g + M \cdot W + T_n + T_c \quad \dots (3)$$

とする必要がある。ここで、L は F U T 長、 T_n はノイズレベル測定時間、 T_c は演算処理装置における処理時間である。したがって、 T_n を設けている分、F U T が無い部分、すなわちバランス型光検出器が検出する雑音のみを必ず取得できるようになっている。

【 0 0 3 6 】

次に、複数の周波数毎に加算平均化処理された反射率分布の各々に対して、 T_n で設定された時間で取得した雑音強度の平均値を計算し、複数の周波数毎に加算平均化処理された反射率分布全体の各々から減算処理を行い、複数の周波数成分の各々におけるノイズレベル減算波形（ P_{f1}' 、 P_{f2}' ... P_{fM}' ）を得る（ステップ S 7）。これによって、F U T 1 1 が有る部分、すなわち、測定対象の波形に重畳されている雑音を除去することができ、雑音レベルに相当するダイナミックレンジを向上することが可能である。

10

20

30

40

50

【 0 0 3 7 】

ここで、本実施形態に係る試験装置では、試験光パルスにおいてある一つの周波数を持続させる所定時間間隔がWであるので、試験光パルスは $M \cdot W$ で示される時間幅を有し、複数の周波数成分の各々から見れば、FUT11への入射時間に $(M - 1) \cdot W$ 時間だけ遅延が生じる。したがって各周波数成分の入射時間にあわせて位置を補正する。

【 0 0 3 8 】

最後に、今度は複数の周波数成分の各々におけるノイズレベル減算波形($Pf1'$ 、 $Pf2' \dots PfM'$)に対して、周波数多重数M回分の加算処理を行い、Mで除することで、周波数多重効果による加算平均化処理されたOTDR最終波形Aを得る(ステップS8)。

したがって、
$$A = \Sigma (PfM') / M \quad (M \text{ は } 1, 2 \dots M, \text{ 本実施形態では } M = 40)$$
となる。

【 0 0 3 9 】

ここで、本実施形態は、上記演算処理装置15において、複数の周波数成分の各々における複数の反射率分布を加算平均化処理するステップS5と、加算平均化処理された反射率分布における雑音の平均値を前記加算平均化処理された反射率分布から減算処理するステップS7と、減算処理された反射率分布を複数の周波数成分で加算平均化処理するステップS8を有することを特徴としている。

【 0 0 4 0 】

すなわち、本実施形態は、試験光パルスの繰り返し数回分の反射率分布及び複数の周波数成分の反射率波形を一度に加算平均化処理するのでは無く、複数の周波数成分で加算平均化処理する前にノイズの減算処理を行う点が特徴である。

この理由としては、本実施形態に係る試験装置における雑音については、大きく2種類があるためである。一つはホワイトノイズであり、光検出器の熱雑音等が要因で発生する周波数応答特性が無い様な雑音である。もう一つは、ダミー光による誘導ブリルアン散乱の強度ゆらぎによる変調周波数成分である。

【 0 0 4 1 】

図3は、本実施形態に係る試験装置において、バランス型光受信装置13の前段にて取得した後方散乱光のスペクトル結果の一例である。図3において、 λ_0 および λ_1 はそれぞれ試験光およびダミー光の波長に該当し、後方散乱光の反射ピークが確認できる。また、 λ_1 から約0.1nm離れた所において、ダミー光の線幅によって強度の違いはあるものの、ダミー光の誘導ブリルアン散乱による反射ピークを確認することができる。

【 0 0 4 2 】

図4は、本実施形態に係る試験装置において、バランス型光受信装置13にて検出されたビート信号のパワースペクトルを測定した結果の一例である。図4において、8.4~39.6MHzで40本のスペクトルピークが確認でき、これが試験光パルスの複数の周波数成分であることが分かる。また、ダミー光の線幅によって強度の違いはあるものの、直流~20MHz程度の範囲において各ピークのゼロレベル、すなわち本測定におけるノイズレベルに相当する、が周波数応答特性を有していることが分かる。これは、非特許文献2に記載されているように、誘導ブリルアン散乱光には強度変調周波数成分を有することが知られており、上記強度変調周波数成分が局発光と干渉して得られたビート信号として検出されたものであることが分かる。

【 0 0 4 3 】

上記誘導ブリルアン散乱光の強度変調周波数成分による雑音は、単一の周波数、または単一のビート周波数を用いた通常のOTDRやC-OTDRでは、影響されることはないが、本実施形態のように、FSAシステムに適用させるためにダミー光を重ねた周波数多重方式を有する測定装置においてのみ現れる現象である。

【 0 0 4 4 】

すなわち、通常のOTDRやC-OTDR、ダミー光を重ねさせない場合の周波数多重方式を用いたC-OTDRにおいては、単純に複数回または複数の周波数成分の数だけ取

10

20

30

40

50

得された反射率分布を加算平均した後に、光検出器にて生じるノイズレベルを反射率分布の全体から減算することでダイナミックレンジの向上を図ることができる。しかしながら、本実施形態に係る試験装置においては、雑音が周波数応答特性を有するため、これが実施することができない。

【 0 0 4 5 】

そこで、本実施形態では、複数の周波数成分を有する試験光とそれとは波長の異なるダミー光を重畳させた試験光パルスを F U T 1 1 に入射して得られる反射及び後方散乱光をコヒーレント検波し、周波数分離する特徴を有する C - O T D R を用いて、複数の周波数成分を有する反射率分布、かつ試験光パルスを繰り返し入射することで得られる複数の反射率分布に基づいて得られる加算平均化処理された反射率分布を効率良く雑音除去されたものにしているため、最終的に得られる反射率分布のダイナミックレンジが向上する。したがって、F S A システムの長距離かつ精度のよい測定が可能になる。

10

【 0 0 4 6 】

また、上記ホワイトノイズはランダムであるため、本来より多くのデータ点数からその平均レベルを算出することが望ましく、本実施形態によれば、M 個の反射率波形の各々においてノイズレベルの平均値を算出することから、等価的に従来の O T D R や C - O T D R の M 倍のデータ点数を用いることができる。

【 0 0 4 7 】

さらに、本実施形態によれば、広帯域のバランス光受信装置や数値化装置を用いる必要が無く、安価で受信感度の良い低帯域なバランス型光受信装置を用いることができる。

20

尚、本発明は上記実施形態そのままに限定されるものではなく、実施段階ではその要旨を逸脱しない範囲で構成要素を変形して具体化できる。また、上記実施形態に開示されている複数の構成要素の適宜な組み合わせにより、種々の発明を形成できる。例えば、実施形態に示される全構成要素から幾つかの構成を削除してもよい。さらに、異なる実施形態例に亘る構成要素を適宜組み合わせてもよい。

【 符号の説明 】

【 0 0 4 8 】

1 ... 第 1 光源、2 ... 分岐素子、3 ... 光周波数制御装置、4 ... 光増幅器、5 ... 光パルス化装置、6 ... パルス発生器、7 ... 正弦波発生器、8 ... 第 2 光源、9 ... 光パルス化装置、10 ... 光サーキュレータ、11 ... F U T、12 ... 結合素子、13 ... バランス型光受信装置、14 ... 数値化装置、15 ... 演算処理装置。

30

フロントページの続き

- (72)発明者 飯田 裕之
東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日本電信電話株式会社内
- (72)発明者 伊藤 文彦
東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日本電信電話株式会社内
- Fターム(参考) 2G086 CC02 CC04