

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7381827号
(P7381827)

(45)発行日 令和5年11月16日(2023.11.16)

(24)登録日 令和5年11月8日(2023.11.8)

(51)国際特許分類

F I

G 0 1 N 21/17 (2006.01)

G 0 1 N 21/17 6 2 0

G 0 1 B 9/02 (2022.01)

G 0 1 B 9/02

請求項の数 5 (全27頁)

(21)出願番号	特願2019-100827(P2019-100827)	(73)特許権者	000220343
(22)出願日	令和1年5月30日(2019.5.30)		株式会社トブコン
(65)公開番号	特開2020-193919(P2020-193919 A)		東京都板橋区蓮沼町 7 5 番 1 号
(43)公開日	令和2年12月3日(2020.12.3)	(73)特許権者	503359821
審査請求日	令和2年12月16日(2020.12.16)		国立研究開発法人理化学研究所
			埼玉県和光市広沢 2 番 1 号
		(74)代理人	110004060
			弁理士法人あお葉国際特許事務所
		(74)代理人	100187182
			弁理士 川野 由希
		(72)発明者	榎山 誉
			東京都板橋区蓮沼町 7 5 1 株式会社
			トブコン内
		(72)発明者	佐々木 芳彰
			宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 5 1 9 -
			最終頁に続く

(54)【発明の名称】 光干渉測定装置および光干渉測定方法

(57)【特許請求の範囲】

【請求項 1】

電磁波を測定対象物および参照面に照射し、前記測定対象物の反射面からの反射波と、前記参照面からの反射波とを干渉させて干渉波のインターフェログラムを取得する測定部と、

前記インターフェログラムをフーリエ変換することにより、深さ方向の強度プロファイルを構成する信号処理部とを備え、

前記信号処理部は、

測定対象物が、少なくとも 1 の反射面を有し、前記電磁波の進行方向に積層された層状構造物であると仮定した場合の、インターフェログラムのモデル式に基づいて、所定の仮定面数の範囲における各仮定面数について前記モデル式のパラメータを推定するモデルパラメータ推定部と、

前記各仮定面数について推定したパラメータを適用した前記モデル式から、統計学的手法により最良のモデル式を選択する最良モデル選択部と、

前記最良のモデル式に基づいて深さ方向の強度プロファイルを再構成する強度プロファイル再構成部とを備え、

前記仮定された層状構造物の反射面は、前記層状構造物の各層の空気または隣接層との界面であって、前記電磁波を反射または内面反射する面であり、

前記仮定面数は、前記層状構造物において仮定された反射面の数であり、

前記最良モデル選択部は、前記各仮定面数について推定したパラメータを適用した前記

モデル式を用いて、インターフェログラムを再構成し、再構成されたインターフェログラムと、元のインターフェログラムとの尤度を算出し、前記仮定面数を自由度として得られる情報量規準に基づいて最良のモデル式を選択することを特徴とする光干渉測定装置。

【請求項 2】

前記モデルパラメータ推定部は、測定対象物が、各層内の屈折率が一定で、少なくとも 1 の反射面数をもつ層状構造物であると仮定した場合のインターフェログラムのモデル式に基づいて、前記モデル式のパラメータを推定することを特徴とする請求項 1 に記載の光干渉測定装置。

【請求項 3】

前記仮定面数の範囲は、測定対象物の構造特性に基づいて決定されることを特徴とする請求項 1 または 2 に記載の光干渉測定装置。

10

【請求項 4】

前記仮定面数の範囲は、前記元のインターフェログラムより構成される深さ方向の強度プロファイルの、ピーク数に基づいて決定されることを特徴とする請求項 1 または 2 に記載の光干渉測定装置。

【請求項 5】

電磁波を測定対象物および参照面に照射し、前記測定対象物の反射面からの反射波と、前記参照面からの反射波とを干渉させて取得した干渉波のインターフェログラムをフーリエ変換することにより、深さ方向の強度プロファイルを構成するステップと、

測定対象物が、少なくとも 1 の反射面数を有し、前記電磁波の進行方向に積層された層状構造物であると仮定した場合のインターフェログラムのモデル式に基づいて、所定の仮定面数の範囲における各仮定面数について、前記モデル式のパラメータを推定するステップと、

20

前記各仮定面数について推定したパラメータを適用した前記モデル式から、統計学的手法により最良のモデル式を選択するステップと、

前記最良のモデル式に基づいて強度プロファイルを再構成するステップとを備え、

前記仮定された層状構造物の反射面は、前記層状構造物の各層の空気または隣接層との界面であって、前記電磁波を反射または内面反射する面であり、

前記仮定面数は、前記層状構造物において仮定された反射面の数であり、前記各仮定面数について推定したパラメータを適用した前記モデル式を用いて、インターフェログラムを再構成し、再構成されたインターフェログラムと、元のインターフェログラムとの尤度を算出し、前記仮定面数を自由度として得られる情報量規準に基づいて前記最良のモデル式を選択することを特徴とする光干渉測定方法。

30

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、光干渉測定装置および光干渉測定方法に関し、より詳細には、フーリエドメイン光干渉測定装置およびフーリエドメイン光干渉測定方法に関する

【背景技術】

40

【0002】

従来、測定対象物の内部構造を非接触・非侵襲で高分解能に画像化する技術として、光干渉断層撮影 (OCT, Optical Coherence Tomography) が知られている。

【0003】

フーリエドメイン OCT (FD-OCT) 計測では、まず、光のスペクトル成分毎に干渉光強度を測定し、干渉光強度から直流成分を差し引いて、インターフェログラムと呼ばれる強度分布を得る。インターフェログラムを高速フーリエ変換 (FFT) することで、深さ方向の反射光の強度スペクトルを取得する。特許文献 1 には、FD-OCT 計測を行う装置として、波長掃引型 OCT (SS-OCT, Swept Source OCT) が

50

開示されている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【文献】国際公開第2015/001918号

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

F D - O C Tを用いる三次元計測システムの深さ方向の強度スペクトルの分解能は、光源の周波数帯域幅によって制限される。これは、インターフェログラムを深さ方向の強度プロファイルに再構成する際に、高速フーリエ変換を使用しているためである。

10

【0006】

より具体的には、本来、測定対象物が離散的な間隔を持つ層状構造物で且つ光源の周波数帯域幅が無限であれば、そのフーリエ変換である、強度プロファイルはデルタ関数列で得られるはずである。しかし、実際には、周波数帯域幅は窓関数となり、そのため、そのフーリエ変換とインターフェログラムのフーリエ変換との畳み込み積分が強度プロファイルとして得られることになる。

【0007】

したがって強度プロファイルの深さ分解能を向上させるためには、光源の周波数帯域をより広げる必要がある。しかし、光源の周波数を広げるためには、装置の大型化や、コストの増大などの問題が生じるという問題があった。

20

【0008】

本発明は、係る事情に鑑みなされたものであり、光干渉測定技術において、広帯域な光源を用いることなく、深さ方向の強度プロファイルの分解能を改善することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0009】

上記目的を達成するために、本発明の第1の態様に係る光干渉測定装置は、電磁波を測定対象物および参照面に照射し、前記測定対象物の反射面からの反射波と、前記参照面からの反射波とを干渉させて干渉波のインターフェログラムを取得する測定部と、前記インターフェログラムをフーリエ変換することにより、深さ方向の強度プロファイルを構成する信号処理部とを備え、前記信号処理部は、測定対象物が、少なくとも1の反射面を有し、前記電磁波の進行方向に積層された層状構造物であると仮定した場合の、インターフェログラムのモデル式に基づいて、所定の仮定面数の範囲における各仮定面数について前記モデル式のパラメータを推定するモデルパラメータ推定部と、前記各仮定面数について推定したパラメータを適用した前記モデル式から、統計学的手法により最良のモデル式を選択する最良モデル選択部と、前記最良のモデル式に基づいて深さ方向の強度プロファイルを再構成する強度プロファイル再構成部とを備え、前記仮定された層状構造物の反射面は、前記層状構造物の各層の空気または隣接層との界面であって、前記電磁波を反射または内面反射する面であり、前記仮定面数は、前記層状構造物において仮定された反射面の数である。

30

40

【0010】

上記態様において、前記モデルパラメータ推定部は、測定対象物が、各層内の屈折率が一定で、少なくとも1の反射面数をもつ層状構造物であると仮定した場合のインターフェログラムのモデル式に基づいて、前記モデル式のパラメータを推定することも好ましい。

【0011】

また、上記態様において、前記最良モデル選択部は、前記各仮定面数について推定したパラメータを適用した前記モデル式を用いて、インターフェログラムを再構成し、再構成されたインターフェログラムと、元のインターフェログラムとの尤度を算出し、前記仮定反射面数を自由度として得られる情報量規準に基づいて最良のモデル式を選択することも好ましい。

50

【 0 0 1 2 】

また、上記態様において、前記仮定面数の範囲は、測定対象物の構造特性に基づいて決定されることも好ましい。

【 0 0 1 3 】

また、上記態様において、前記仮定面数の範囲は、前記元のインターフェログラムより構成される深さ方向の強度プロファイルの、ピーク数に基づいて決定されることも好ましい。

【 0 0 1 4 】

また、本発明の第2の態様に係る光干渉測定方法は、電磁波を測定対象物および参照面に照射し、前記測定対象物の反射面からの反射波と、前記参照面からの反射波とを干渉させて取得した干渉波のインターフェログラムをフーリエ変換することにより、深さ方向の強度プロファイルを構成するステップと、測定対象物が、少なくとも1の反射面数を有し、前記電磁波の進行方向に積層された層状構造物であると仮定した場合のインターフェログラムのモデル式に基づいて、所定の仮定面数の範囲における各仮定面数について、前記モデル式のパラメータを推定するステップと、前記各仮定面数について推定したパラメータを適用した前記モデル式から、統計学的手法により最良のモデル式を選択するステップと、前記最良のモデル式に基づいて強度プロファイルを再構成するステップとを備え、前記仮定された層状構造物の反射面は、前記層状構造物の各層の空気または隣接層との界面であって、前記電磁波を反射または内面反射する面であり、前記仮定面数は、前記層状構造物において仮定された反射面の数である。

【 発明の効果 】

【 0 0 1 5 】

上記構成に係る光干渉測定装置または光干渉測定方法によれば、広帯域な光源を用いることなく、深さ方向の強度プロファイルの分解能を改善することができる。

【 図面の簡単な説明 】

【 0 0 1 6 】

【 図 1 】 本発明の実施の形態に係る光干渉測定装置の概略構成を示すブロック図である。

【 図 2 】 同光干渉測定装置の測定部の概略構成図である。

【 図 3 】 同光干渉測定装置により得られるインターフェログラムの形状を示す図である。

【 図 4 】 同光干渉測定装置の信号処理部の機能構成図である。

【 図 5 】 層状構造物の構造を説明する図である。

【 図 6 】 第1のノイズ除去部によるノイズ除去の方法を説明する図である。

【 図 7 】 特異値分解によるノイズ除去によって除去されるノイズを説明する図である。

【 図 8 】 同光干渉測定装置を用いた光干渉測定方法の処理のフローチャートである。

【 図 9 】 同光干渉測定方法におけるノイズ除去の処理のフローチャートである。

【 図 10 】 同ノイズ除去のうち、フィルタによるノイズ除去の処理のフローチャートである。

【 図 11 】 同ノイズ除去のうち、特異値分解によるノイズ除去の処理のフローチャートである。

【 図 12 】 同光干渉測定方法におけるモデルパラメータの推定の処理のフローチャートである。

【 図 13 】 同方法における最良モデル選択の処理のフローチャートである。

【 図 14 】 同方法により推定したモデルパラメータを用いた強度プロファイル再構成のシミュレーション結果である。

【 図 15 】 同方法におけるフィルタによるノイズ除去の結果を示す図である。

【 図 16 】 上記フィルタによるノイズ除去後のインターフェログラムを用いた、特異値分解によるノイズ除去の結果を示す図である。

【 図 17 】 上記特異値分解によるノイズ除去後のインターフェログラムを用いて、最良モデルの選択を行った結果を示す図である。

【 図 18 】 本実施の形態の光干渉測定装置の1つの変形例に係る信号処理部の機能構成図

10

20

30

40

50

である。

【図 19】同信号処理部による仮定面数の範囲の設定のフローチャートである。

【発明を実施するための形態】

【0017】

以下、本発明の好適な実施の形態について、図面を参照して説明するが、本発明はこれに限定されるものではない。また、以下の実施の形態の説明において、同一の構成要素には同一の符号を付し、同様の構成要素には同一の名称を付して重複する説明は適宜省略する。

【0018】

[実施の形態]

1. 光干渉測定装置の全体構成

図 1 は、本発明の実施の形態に係る、光干渉測定装置 1 の概略構成を示すブロック図である。光干渉測定装置 1 は、SS-OCT であり、例えば、コンクリート構造物等の内部構造の検査に用いられるものである。

【0019】

図 1 に示すように、光干渉測定装置 1 は、測定部 2、制御処理部 3、操作部 4、表示部 5、および記憶部 6 を備える。

【0020】

図 2 は、測定部 2 の概略構成を示す図である。

測定部 2 は、主として、光源 21、ビームスプリッタ 22、測定対象物を設置するための自動ステージ 23、参照面 24 および検出器 25 とを備える。

【0021】

光源 21 は、可変周波数掃引光源であり、所定の波長帯域内において、波長を一定の周期で掃引させながら、電磁波ビームを射出する。光源 21 としては、半導体物質であるガンダイオード、ショットキーバリアダイオード (SBD, Shotkey Barrier Diode) を用いた発振源、波長可変半導体レーザ (LD) を種光として非線形結晶を用いた周波数変換による発振源等を用いることができる。あるいは、光源 21 として、タンネット (TUNNET) ダイオードや共鳴トンネルダイオード (RTD)、MMIC (Monolithic Microwave IC) の発振源を用いてもよい。

【0022】

ビームスプリッタ 22 は、例えば、分岐比 50 : 50 のビームスプリッタである。ビームスプリッタ 22 は、光源 21 からの光束 B を、測定光 B₁ と参照光 B₂ とに分割する。

【0023】

自動ステージ 23 は、測定対象物を保持して、測定面を設定する。測定面は、測定対象物の表面である。測定対象物の表面が、測定光 B₁ の光軸に直交する平面を XY 平面と仮定した X 軸 Y 軸の 2 軸方向に移動可能となるように構成されている。自動ステージ 23 は、後述する測定制御部により、駆動制御される。

【0024】

参照面 24 は、ミラーであり、参照光 B₂ を反射する。

検出器 25 は、例えば、導波管とアンテナが付設されたショットキーバリアダイオードであり、後述する参照光 B₂ の反射光と測定光 B₁ の反射光との干渉信号を検出する。

【0025】

光源 21 は、測定制御部 7 からの制御により、発振器の周波数を変化させる。検出器 25 には、微弱電流検出用のロックインアンプ 31 が接続されており、ファンクションジェネレータ 29 が、光源 21 に On - Off 変調をかけ、検出器 25 側のロックインアンプ 31 にリファレンス信号を与える。

【0026】

光源 21 から出射した光は、コリメートレンズ 26a を介して、ビームスプリッタ 22 に入射し、測定光 B₁ と参照光 B₂ とに分割される。参照光 B₂ は、コリメートレンズ 26b によりコリメートされつつ参照面 24 へと進行し、参照面 24 で反射し、その後、ビー

10

20

30

40

50

ムスプリッタ 2 2 を介して検出器 2 5 へと向かう。一方、測定光 B_1 はコリメートレンズ 2 6 c によってビームの形状を整形され、測定対象物へと向かい測定対象物の反射面で反射した光が、再度ビームスプリッタ 2 2 へと入射して、コリメートレンズ 2 6 d を介して検出器 2 5 へと向かう。

なお、本明細書において、測定対象物の「反射面」は測定対象物の表面および内部反射面を含む。従って、第 1 の反射面は、測定対象物の表面を意味する。

【 0 0 2 7 】

SS - OCT の原理によれば、光源 2 1 の周波数を掃引した時に、測定対象物からの測定光 B_1 の光路長と、参照光 B_2 の光路長との差に対応する干渉パターン（インターフェログラム）が生成される。干渉パターンは、検出器 2 5 により検出される。検出信号は、

10

【 0 0 2 8 】

図 2 に戻って、制御処理部 3 は、任意の電気回路（またはその部分）を参照してよく、電気回路は、たとえば、抵抗器、トランジスタ、キャパシタ、インダクタなどを含む電気部品を任意の個数含んでいる。この回路は、たとえば、集積回路、集積回路の集合、マイクロコントローラ、マイクロプロセッサ、プリント基板（PCB）上の個々の電気部品の集合などを含む、任意の形態であってよい。制御処理部 3 は、光干渉測定装置 1 の筐体内に組み込まれていてもよく、スタンドアロンでもよく、また、別体のパーソナルコンピュー

20

【 0 0 2 9 】

制御処理部 3 は、機能部として、測定部 2 での測定を制御する測定制御部 7、測定部 2 で取得した信号を処理する信号処理部 8、および出力部 9 を備える。以下に説明する更に詳細な機能部も含め、各機能部の機能は、回路によって実現されてもよく、またプログラムを実行することにより実現されてもよい。また、プログラムで実現する場合、プログラムは、磁気ディスク、フレキシブルディスク、光ディスク、コンパクトディスク、ブルーレイ（登録商標）ディスク、DVD 等の記憶媒体に記憶されていてもよい。

【 0 0 3 0 】

測定制御部 7 は、光源 2 1 の周波数を変調する。また、測定制御部 7 は、自動ステージ 2 3 の駆動を制御する。信号処理部 8 は、インターフェログラムから強度プロファイルを構成するための処理を行う。信号処理部 8 の詳細については後述する。出力部 9 は、信号処理部 8 において生成した強度プロファイルを表示部 5 に表示し、記憶部 6 に記憶する。

30

【 0 0 3 1 】

操作部は 4、光干渉測定装置 1 に対して、ユーザが指示を入力するための装置であり、例えば、マウス、タッチパッド、キーボード、操作パネル、ジョイスティック、ボタン、スイッチ等を含む。

【 0 0 3 2 】

表示部 5 は、例えば液晶ディスプレイであり、信号処理部 8 により生成した強度プロファイルその他の情報を表示する。

40

【 0 0 3 3 】

2 . 信号処理部の詳細構成

次に、図 4 を参照しながら、信号処理部 8 の詳細について説明する。信号処理部 8 は、FFT 解析部 1 0 と、超解像解析部 2 0 と、ノイズ除去部 3 0 とを備える。

【 0 0 3 4 】

FFT 解析部 1 0 は、インターフェログラムを、高速フーリエ変換することにより、深さ方向の強度プロファイル（以下、単に「強度プロファイル」ともいう。）に再構成する。この方法は公知の方法であるので説明は省略する。

【 0 0 3 5 】

超解像解析部 2 0 は、モデルパラメータ推定部 2 0 1、最良モデル選択部 2 0 2、およ

50

び強度プロファイル再構成部 203 を備える。

【0036】

モデルパラメータ推定部 201 は、光干渉測定装置 1 で測定したインターフェログラムをモデリングし、そのモデル式のパラメータを推定する。

【0037】

具体的には、図 5 に示すような、各層内の屈折率 n_l が一定で、少なくとも 1 である反射面数 L を有する、減衰と分散のない仮想の層状構造物 M を仮定する。

【0038】

層状構造物 M を測定して得られるインターフェログラム I () は、参照面側からの電場を E_r ()、測定対象物側からの電場を E_s () とすると、以下の様に書ける。なお、ここで、「反射面」は、層状構造物 M の各層の、空気または、隣接層との界面であって、測定光を反射または内面反射する面であり、すなわち、層状構造物 M の表面が第 1 の反射面 Z_1 である。

【数 1】

$$\begin{aligned} I(k) &= |E_r(k) + E_s(k)|^2 \\ &= |A_0(k)|^2 \left| 1 + \sum_{l=1}^L a_l e^{i2\pi k b_l} \right|^2 \quad (1) \end{aligned}$$

ここで、 $|A_0(k)|^2$ は光源の強度、 $a_l = \frac{n_{l+1} - n_l}{n_{l+1} + n_l}$ は各層間の反射係数（フレネル反射）、 $b_l = [\sum_{p=1}^l (z_p - z_{p-1}) n_p]$ は参照面から各層までの光路長差（以下、「光学的距離」という。）、 z は各層までの距離、 $l = 1, 2, 3, \dots, L$ は L までの反射面番号、 $p = 1, 2, 3, \dots, l$ は l までの反射面番号を表す。

【0039】

このインターフェログラム $I(k)$ を光源の強度 $|A_0(k)|^2$ で正規化し、サンプル内の多重反射が無いとすると以下の様に近似できる。

【数 2】

$$\begin{aligned} D_k &= \frac{I(k)}{|A_0(k)|^2} - 1 \\ &= \left| \sum_{l=1}^L a_l e^{i2\pi k b_l} \right|^2 \\ &= \sum_{l=1}^L (a_l e^{i2\pi b_l k} + a_l^* e^{-i2\pi b_l k}) + \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^L a_l a_m^* e^{-i2\pi (b_m - b_l) k} \\ D_k &\sim \sum_{l=1}^L (a_l e^{i2\pi b_l k_{\min}} e^{i2\pi b_l \Delta k \kappa} + a_l^* e^{-i2\pi b_l k_{\min}} e^{-i2\pi b_l \Delta k \kappa}) \quad (2) \end{aligned}$$

ここで、 k_{\min} は最小波数、 Δk は波数間隔、 $\kappa = 0, 1, 2, 3, \dots, K-1$ は波数番号を表す。

【 0 0 4 0 】

また、式(2)は、

【数3】

$$A_l = a_l e^{i2\pi b_l k_{\min}}, \gamma_l = e^{i2\pi b_l \Delta k}$$

とおくと、モデル式として、以下の様に簡素化できる。

【 0 0 4 1 】

【数4】

$$D_\kappa = \sum_{l=1}^L (A_l \gamma_l^\kappa + A_l^* \gamma_l^{*\kappa}) \quad (3)$$

10

このように、モデル式(3)は、 L , A_1 , γ_1 の3つのパラメータを有する。

【 0 0 4 2 】

モデル式(3)の基で、反射面数 L を仮定し、他のパラメータ A_1 , γ_1 を以下のように推定する。以下、仮定された反射面数を「仮定面数」という。

まず、フィルタ p_j の z 変換を

【 0 0 4 3 】

【数5】

$$P(x) = \prod_{l=1}^L (x^{-1} - \gamma_l^{-1})(x^{-1} - \gamma_l^{*-1}) = \sum_{j=0}^{2L} p_j x^{-j} \quad (4)$$

20

【 0 0 4 4 】

とすると、正規化されたインターフェログラムとフィルタの畳み込み積分は、

【 0 0 4 5 】

【数6】

$$\sum_{j=0}^{2L} p_j D_{\kappa-j} = 0, \quad \kappa = 2L, 2L+1, 2L+2, \dots, K-1 \quad (5)$$

30

【 0 0 4 6 】

である。これを行列で書き直すと、

【 0 0 4 7 】

【数7】

$$\begin{pmatrix} D_{2L} & D_{2L-1} & D_{2L-2} & \cdots & D_2 & D_1 & D_0 \\ D_{2L+1} & D_{2L} & D_{2L-1} & \cdots & D_3 & D_2 & D_1 \\ D_{2L+2} & D_{2L+1} & D_{2L} & \cdots & D_4 & D_3 & D_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ D_{K-2} & D_{K-3} & D_{K-4} & \cdots & D_{K-2L} & D_{K-1-2L} & D_{K-2-2L} \\ D_{K-1} & D_{K-2} & D_{K-3} & \cdots & D_{K+1-2L} & D_{K-2L} & D_{K-1-2L} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_{2L-1} \\ p_{2L} \end{pmatrix} = \mathbf{0} \quad (6)$$

$$\mathbf{Dp} = \mathbf{0} \quad (7)$$

40

50

【 0 0 4 8 】

と表せる。この時、D のデータ数は、 $2L + 1$ を満たす必要がある。しかし、実際の測定データ、すなわち D のデータセット

【数 8】

\tilde{D}

はノイズを含んでいるので、以下の最適化問題を解く事で p を求める。

【 0 0 4 9 】

【数 9】

10

$$\arg \min_p \|\tilde{D}p\|^2 \quad (8)$$

ここで、 p は p_j のデータセットである。

【 0 0 5 0 】

但しこの時、 $p = 0$ という自明解が存在するため、その様な解にならない制約条件を与える必要がある。式(6)は、展開すると、

【数 1 0】

20

$$\begin{aligned} P(x) &= \prod_{l=1}^L (x^{-1} - \gamma_l^{-1}) (x^{-1} - \gamma_l^{*-1}) \\ &= \sum_{j=0}^{2L} p_j x^{-j} \\ &= p_{2L} x^{-2L} + p_{2L-1} x^{-2L-1} + \dots + p_1 x^{-1} + p_0 x^0 \quad (9) \end{aligned}$$

30

【 0 0 5 1 】

となる。従って、

【 0 0 5 2 】

【数 1 1】

$$\text{subject to } p_{2L} = p_0 = 1 \quad (10)$$

【 0 0 5 3 】

という制約条件を与えて、式(8)の最適化問題を解く。得られた p を多項式(9)に代入し、解を求める事で γ_l と γ_l^* を得る。

40

【 0 0 5 4 】

また、式(3)を行列で書き直すと、

【 0 0 5 5 】

【数 1 2】

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & & 1 & 1 \\ \gamma_1^1 & \gamma_1^{*1} & \gamma_2^1 & \gamma_2^{*1} & & \gamma_L^1 & \gamma_L^{*1} \\ \gamma_1^2 & \gamma_1^{*2} & \gamma_2^2 & \gamma_2^{*2} & \cdots & \gamma_L^2 & \gamma_L^{*2} \\ \gamma_1^3 & \gamma_1^{*3} & \gamma_2^3 & \gamma_2^{*3} & & \gamma_L^3 & \gamma_L^{*3} \\ & \vdots & & \ddots & & \vdots & \\ \gamma_1^{(K-2)} & \gamma_1^{*(K-2)} & \gamma_2^{(K-2)} & \gamma_2^{*(K-2)} & & \gamma_L^{(K-2)} & \gamma_L^{*(K-2)} \\ \gamma_1^{(K-1)} & \gamma_1^{*(K-1)} & \gamma_2^{(K-1)} & \gamma_2^{*(K-1)} & \cdots & \gamma_L^{(K-1)} & \gamma_L^{*(K-1)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1 \\ A_1^* \\ A_2 \\ A_2^* \\ \vdots \\ A_L \\ A_L^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_0 \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ \vdots \\ D_{K-2} \\ D_{K-1} \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{Ga} = \mathbf{d} \quad (12)$$

10

【 0 0 5 6 】

と表せる。しかし、先ほどと同様に実際の測定データ

【 0 0 5 7 】

【数 1 3 】

 $\tilde{\mathbf{d}}$

【 0 0 5 8 】

はノイズを含んでいるので、以下の最適化問題(又はMoore-Penroseの擬似逆行列)を解く
事で

20

【数 1 4 】

 $\tilde{\mathbf{a}}$ 、すなわち A_1 (のセット)

が求められる。

【 0 0 5 9 】

【数 1 5 】

$$\tilde{\mathbf{a}} = \arg \min_{\mathbf{a}} \|\mathbf{Ga} - \tilde{\mathbf{d}}\|_{p=2}^2 = (\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \tilde{\mathbf{d}} \quad (13)$$

30

ここで、 $(\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T$ は、 \mathbf{G} の擬似逆行列である。

【 0 0 6 0 】

このようにして、モデルパラメータ推定部 2 0 1 は、仮定面数 L の場合のパラメータ A_1
および b_1 を推定する。

【 0 0 6 1 】

さらにモデルパラメータ推定部 2 0 1 は、推定したパラメータ A_1 および b_1 から、測
定対象反射係数 a_1 , および光学的距離 b_1 を算出する。

40

まず、得られた A_1 の絶対値をとることで a_1 を求める。

【 0 0 6 2 】

【数 1 6 】

$$a_l = |A_l| = |a_l e^{i2\pi b_l k_{\min}}| \quad (14)$$

【 0 0 6 3 】

また、式(15)を用いて、 b_1 から b_1 を得る。

【 0 0 6 4 】

50

【数 1 7】

$$b_l = \frac{\varphi}{2\pi\Delta k} \quad (15)$$

ここで、 φ_l は複素数の a_l の偏角である。

このようにして、仮定面数 L における強度プロファイル a_l , b_l を得ることができる。

【0 0 6 5】

しかし、実際の計測において、上記モデル式 (3) を適用しようとする場合、測定対象物の反射面数 L は不明である。このため、予め仮定面数 L の範囲を決定して、その範囲の各仮定面数について、上記のモデルパラメータ A_l , φ_l 、および強度プロファイル a_l , b_l を求める。

【0 0 6 6】

仮定面数 L の範囲の決定は、例えば、測定対象物の構造特性に基づいて行ってもよい。具体的には、トンネル壁面等のコンクリート製の構造物は、構造上反射面数が一定の範囲 (例えば 1 ~ 10 の範囲等) であることが想定できる。このために、光干渉測定装置 1 は、ユーザにより、測定又は演算に先立って、測定対象物の仮定面数 L の範囲 (L の最小値 L_{min} および L の最大値 L_{max}) を、予め装置に入力可能にまたは設定可能に構成されていてもよい。

【0 0 6 7】

モデルパラメータ推定部 201 は、上記モデルパラメータ A_l , φ_l の推定および強度プロファイル a_l , b_l の演算を、指定された仮定面数 L の範囲 (例えば 1 , 2 , . . . , 10) の各仮定面数 L について行う。

【0 0 6 8】

強度プロファイル再構成部 203 は、モデルパラメータ推定部 201 で得られた式 (15) , 式 (16) から、強度プロファイル a_l , b_l を再構成する。

【0 0 6 9】

最良モデル選択部 202 は、モデルパラメータ推定部 201 で、推定した、各反射面数それぞれにおけるパラメータ A_l , φ_l を、モデル式 (3) に代入して再構成された再構成インターフェログラムと、測定により得られた測定インターフェログラムとの尤度を算出する。最良モデル選択部 202 は、仮定面数 L を自由度として、該自由度と算出した尤度に基づいて、情報量規準に適用し、最良のモデル、即ち最良モデルを構成する仮定面数 L を選択する。

【0 0 7 0】

なお、適用される情報量規準としては、特に限定されないが、赤池情報量規準 (A I C) , 有限修正 A I C (A I C c) , ベイジアン情報量規準 (B I C) 等を用いることができる。尤度の算出、および、情報量規準への適用については公知の手法を用いることができる。

【0 0 7 1】

ノイズ除去部 30 は、第 1 のノイズ除去部 301 と、第 2 のノイズ除去部 302 とを備える。

【0 0 7 2】

まず、光干渉測定装置 1 での測定において、取得されるインターフェログラムは、理論的には、図 3 に示す形状を示す。しかし、実際の測定では図 6 (A) の様にノイズが含まれている。ノイズには測定系内での多重反射等に起因する周期的なノイズと、ランダム性のホワイトガウシアンノイズとがある。第 1 のノイズ除去部 301 は、周期的なノイズを、第 2 のノイズ除去部 302 は、ホワイトガウシアンノイズを除去する。

【0 0 7 3】

第 1 のノイズ除去部 301 について、説明する。FFT 解析部 10 は、インターフェログラムを高速フーリエ変換 (FFT) により、強度プロファイルに変換する。図 6 (A) のようにノイズを含むインターフェログラムを高速フーリエ変換により強度プロファイル

10

20

30

40

50

に変換すると、図 6 (B) の様に、測定対象物の表面を測定対象物設置位置とした時に、測定対象物設置位置付近の領域以外にもピークが見られることがわかる。これらが、周期的なノイズ成分である。

【 0 0 7 4 】

そこで、第 1 のノイズ除去部 3 0 1 は、強度プロファイルに、測定対象物の深さ方向の光学的距離における、測定対象物設置位置を基準として設定した領域をパス領域とし、それ以外の領域を削除領域とする窓関数を掛け合わせて、削除領域のデータを削除するフィルタリングを行う。図 6 (C) は、矩形窓を用いて、フィルタリングを行った強度プロファイルを示す。

【 0 0 7 5 】

パス領域は、図示の様に、測定対象物の表面位置を測定対象物設置位置として、測定対象物設置位置を基準として、その前後の所定の範囲を指定することにより設定してもよい。例えば、測定対象物の厚みが 1 0 m m で、測定対象物の表面位置 (測定対象物設置位置) が 1 0 0 m m の場合、測定対象物設置位置の前後 5 0 m m すなわち、5 0 m m ~ 1 5 0 m m の範囲として設定することができる。このように、第 1 のノイズ除去部 3 0 1 は、一種のバンドパスフィルタのように作用する。

【 0 0 7 6 】

あるいは、測定対象物の中央位置を測定対象物設置位置として、測定対象物設置位置を基準として、前後に測定対象物の厚みの半分に所定のマージンを加えた範囲を、パス領域として設定し、その他の部分を削除領域としてもよい。

【 0 0 7 7 】

また、窓関数としては、図示のような矩形窓に限定されず、ガウス窓、ハン窓、ハミング窓等、フィルタリングに用いられる種々の窓関数を用いることができる。

【 0 0 7 8 】

次に、第 1 のノイズ除去部 3 0 1 は、削除領域のデータを削除した強度プロファイルを逆高速フーリエ変換 (I F F T) により、図 6 (D) のように、インターフェログラムに変換する。

【 0 0 7 9 】

このようにして、インターフェログラムから周期的なノイズを効果的に削除することが可能となる。

【 0 0 8 0 】

第 2 のノイズ除去部 3 0 2 について説明する。

図 7 は、第 2 のノイズ除去部 3 0 2 により除去されるホワイトガウシアンノイズを説明した図である。図中、黒線は、理論的なインターフェログラムを示し、灰色線はホワイトガウシアンノイズを含むインターフェログラムを示す。理論的なインターフェログラムとノイズを含むインターフェログラムとは、概ね重なり合っているが、理論的なインターフェログラムのピークのエンベロープが滑らかな波形となって連なる形状を有するのに対して、ホワイトガウシアンノイズを含むインターフェログラムのエンベロープは、矢印で示すようにランダムに突出する部分が存在し、エンベロープが滑らかに連ならない。第 2 のノイズ除去部 3 0 2 は、以下のようにして、このようなノイズを削除する。

【 0 0 8 1 】

(a) 第 2 のノイズ除去部 3 0 2 は、インターフェログラムから式 (8) と同様に、測定データ

【数 1 8 】

\tilde{D}

を行列表示して、要素数が $(- 2 L - 1) \times (2 L + 1)$ の一定対角行列

【数 1 9 】

10

20

30

40

50

$$\begin{pmatrix} D_{2L} & D_{2L-1} & D_{2L-2} & \cdots & D_2 & D_1 & D_0 \\ D_{2L+1} & D_{2L} & D_{2L-1} & \cdots & D_3 & D_2 & D_1 \\ D_{2L+2} & D_{2L+1} & D_{2L} & \cdots & D_4 & D_3 & D_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ D_{K-2} & D_{K-3} & D_{K-4} & \cdots & D_{K-2L} & D_{K-1-2L} & D_{K-2-2L} \\ D_{K-1} & D_{K-2} & D_{K-3} & \cdots & D_{K+1-2L} & D_{K-2L} & D_{K-1-2L} \end{pmatrix} \quad (16)$$

を作成する。

【 0 0 8 2 】

(b) 第 2 のノイズ除去部 3 0 2 は、行列

【数 2 0 】

\tilde{D}

を、式 (1 7) のように特異値分解 (S V D , Singular・Value・Decomposition) する。

【数 2 1 】

$$\tilde{D} = USV^T \quad (17)$$

(ここで、

U は、要素数が (K - 2 L - 1) × (2 L + 1) のユニタリ行列(複素数 , U U* = U* U = I)であり、

S は、要素数が (2 L + 1) × (2 L + 1) の対角行列であり、

V は、要素数が (2 L + 1) × (2 L + 1) のユニタリ行列である。)

【 0 0 8 3 】

(c) 次に、第 2 のノイズ除去部 3 0 2 は、特異値の対角行列 S を、式 (1 8) の通り求める。

【数 2 2 】

$$S = \begin{pmatrix} \sigma_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \sigma_{2L+1} \end{pmatrix} \quad (18)$$

(ここで、特異値 σ_n は、の $\tilde{D}\tilde{D}^T$ の固有値の平方根である。)

【 0 0 8 4 】

(d) 次に、第 2 のノイズ除去部 3 0 2 は、特異値の対角行列 S から評価値 V_e を算出する。評価値 V_e は、例えば対角行列 S の (2 L + 1) 番目の要素の値 σ_{2L+1} をノイズ成分とみなし、2 L 番目の要素の値 σ_{2L} をシグナル成分とみなして、式 (1 9) のように設定してもよい。

【数 2 3 】

$$V_e = \frac{\sigma_{2L+1}}{\sigma_{2L}} \quad (19)$$

10

20

30

40

50

【 0 0 8 5 】

(e) 次に、第 2 のノイズ除去部 3 0 2 が、求めた特異値の対角行列 S から、ノイズ要素として、少なくとも最小の特異値 σ_{2L+1} を削除して、対角行列 S' を式 (2 0) の通り構築する。

【数 2 4 】

$$S' = \begin{pmatrix} \sigma_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 \end{pmatrix} \quad (20)$$

10

【 0 0 8 6 】

なお、必ずしも、最小の特異値のみを削除するのではなく、不要と考えられる成分の特異値を全て削除してもよい。

【 0 0 8 7 】

(f) また、算出した対角行列 S' から、インターフェログラム

【数 2 5 】

 \tilde{D}'

を式 (2 1) のように再構成する。

20

【数 2 6 】

$$US'V^T = \tilde{D}' \quad (21)$$

ここで、 \tilde{D}' は、 \tilde{D} に対する最小二乗近似であり、すなわち、 $\tilde{D} - \tilde{D}'$ の各要素の二乗誤差が最小となっている。

【 0 0 8 8 】

ノイズを除去した

【数 2 7 】

30

 \tilde{D}'

は必ずしも対角一定行列とはならない。そこで、

【数 2 8 】

\tilde{D}' の対角に沿った平均値を用いて、対角一定行列
 \tilde{D}'_{ave}

40

に再構築する。

【 0 0 8 9 】

(g) 再構成した対角一定行列

【数 2 9 】

 \tilde{D}'_{ave}

を用いて、評価値 V_e が所定の閾値 T_h よりも小さくなるまで (b) ~ (f) の動作を繰り返す。そして、評価値 V_e が所定の閾値 T_h よりも小さくなるインターフェログラム

【数 3 0 】

50

\tilde{D}'_{ave}

をノイズ除去後のインターフェログラムとして再構成する。

【 0 0 9 0 】

第 1 のノイズ成分の除去と、特異値分解による第 2 のノイズ成分の除去は、例えば、第 1 のノイズ成分の影響が大きく、第 2 のノイズ成分の影響が小さいと考えられる場合には、第 1 のノイズ成分の除去のみを行い、第 2 のノイズ成分の影響が大きく、第 1 のノイズ成分の影響が小さいと考えられる場合には、第 2 のノイズ成分の除去のみを行うというように、一方のみを行ってもよい。

10

【 0 0 9 1 】

また、第 1 のノイズ成分の除去と、第 2 のノイズ成分の除去の両方を行う場合において、その順序は特に限定されないが、第 1 のノイズ成分の影響が大きく、第 2 のノイズ成分の影響が小さいと考えられる場合には、第 1 のノイズ成分の除去を先に行い、第 2 のノイズ成分の影響が大きく、第 1 のノイズ成分の影響が小さいと考えられる場合には、第 2 のノイズ成分の除去を先に行うことが好ましい。

【 0 0 9 2 】

3 . 光干渉測定方法

以下、図 8 ~ 図 1 3 を参照して、光干渉測定装置 1 を用いた光干渉測定方法を説明する。なお、以下の各ステップにおいて、求められたパラメータ、インターフェログラム、強度プロファイル等は、必要に応じて記憶部に記憶され、後続のステップにおいて読み出される様になっているものとし、説明は省略する。

20

【 0 0 9 3 】

図 8 は、該光干渉測定方法の処理の概略的なフローチャートである。まず、処理を開始すると、ステップ S 1 0 1 で、ノイズ除去部 3 0 が測定インターフェログラムのノイズを除去する。次に、ステップ S 1 0 2 で、モデルパラメータ推定部 2 0 1 が、ノイズを除去したインターフェログラムを用いて、モデルのパラメータを推定する。次に、ステップ S 1 0 3 で、最良モデル選択部 2 0 2 が、最良モデルを選択する。次に、ステップ S 1 0 4 で、強度プロファイル再構成部 2 0 3 が、深さ方向の強度プロファイルを再構成する。以下、各ステップの詳細な処理を説明する。

30

【 0 0 9 4 】

図 9 は、ステップ S 1 0 1 のノイズ除去にかかる詳細な処理のフローチャートである。

【 0 0 9 5 】

ノイズ除去が開始すると、ステップ S 2 0 1 で、第 1 のノイズ除去部 3 0 1 が、フィルタによるノイズの除去を行い、ステップ S 2 0 2 で、第 2 のノイズ除去部 3 0 2 が特異値分解 (S V D) によるノイズの除去を行う。その後、処理はステップ S 1 0 2 に移行する。

【 0 0 9 6 】

図 1 0 は、ステップ S 2 0 1 のフィルタによるノイズ除去の詳細なフローチャートである。

【 0 0 9 7 】

40

フィルタによるノイズ除去が始まると、ステップ S 3 0 1 で、 F F T 解析部 1 0 が、測定インターフェログラムを高速フーリエ変換により強度プロファイルに変換する。

【 0 0 9 8 】

次に、ステップ S 3 0 2 で、第 1 のノイズ除去部 3 0 1 が、強度プロファイルのうち、測定対象物設置位置を基準とする領域をパス領域とし、それ以外の領域を削除領域として、削除領域のデータを削除するフィルタリングを行う。

【 0 0 9 9 】

次に、ステップ S 3 0 3 で、第 1 のノイズ除去部 3 0 1 が、ステップ S 3 0 2 で得られたフィルタリング後の強度プロファイルを、逆高速フーリエ変換によってインターフェログラムに変換し、処理を終了する。その後、処理はステップ S 2 0 2 に移行する。

50

【 0 1 0 0 】

図 1 1 は、ステップ S 2 0 2 の特異値分解によるノイズ除去の詳細な処理のフローチャートである。

【 0 1 0 1 】

特異値分解によるノイズの除去を開始すると、ステップ S 4 0 1 では、第 2 のノイズ除去部 3 0 2 が、インターフェログラムから対角一定行列 D を作成する。

【 0 1 0 2 】

次に、ステップ S 4 0 2 で、第 2 のノイズ除去部 3 0 2 が、行列 D を特異値分解し、特異値の対角行列 S (式 (1 8)) を算出する。

【 0 1 0 3 】

次にステップ S 4 0 3 で、第 2 のノイズ除去部 3 0 2 が、特異値 S から評価値 V_e (式 (1 9)) を算出する。

【 0 1 0 4 】

次に、ステップ S 4 0 4 で、第 2 のノイズ除去部 3 0 2 が、評価値 V_e と、所定の閾値 T_h を比較して、評価値 V_e が閾値 T_h よりも小さいか否かを判断する。

【 0 1 0 5 】

評価値 V_e が閾値 T_h 以上の場合 (No)、ステップ S 4 0 5 で、第 2 のノイズ除去部 3 0 2 が、特異値の行列 S からノイズ要素を削除して、特異値 S' を算出する (式 (2 0))。

【 0 1 0 6 】

次に、ステップ S 4 0 6 で、特異値 S' を用いてインターフェログラムの行列

【数 3 1】

\tilde{D}'

を再構成する。

【 0 1 0 7 】

次に、ステップ S 4 0 7 で、行列

【数 3 2】

\tilde{D}'

の対角成分を平均化し、対角一定行列

【数 3 3】

\tilde{D}'_{ave}

として、ステップ S 4 0 8 で

【数 3 4】

$\tilde{D} = \tilde{D}'_{ave}$

として、ステップ S 4 0 2 に戻り、ステップ S 4 0 2 ~ S 4 0 4 を繰り返す。

【 0 1 0 8 】

一方、ステップ S 4 0 4 で、評価値 V_e が閾値 T_h よりも小さい場合 (Yes)、インターフェログラム D をノイズ除去後のインターフェログラムとして処理を終了し、処理は、ステップ S 1 0 2 に移行する。

【 0 1 0 9 】

あるいは、閾値を設けて、評価値が閾値を満たすまでノイズ成分の削除を繰り返すのに代えて、予め、繰り返しの回数を設定し、該回数を満たすまで繰り返すこととしてもよい。

10

20

30

40

50

【 0 1 1 0 】

図 1 2 は、ステップ S 1 0 2 のモデルのパラメータの推定に係る詳細なフローチャートである。モデルのパラメータの設定が始まると、ステップ S 5 0 1 で、モデルパラメータ推定部 2 0 1 は、ユーザの入力等に基づいて、仮定面数 L の範囲（すなわち、最小値 L_{min} および最大値 L_{max} ）を設定する。

【 0 1 1 1 】

次に、ステップ S 5 0 2 で、モデルパラメータ推定部 2 0 1 は、仮定面数 L を $L = L_{min}$ として初期化する。

【 0 1 1 2 】

次に、ステップ S 5 0 3 で、モデルパラメータ推定部 2 0 1 は、仮定面数 L_{min} の下で、上記式 (4) から (1 2) の計算により、モデル式 (3) のパラメータ β_1 を算出する。

10

【 0 1 1 3 】

次に、ステップ S 5 0 4 で、モデルパラメータ推定部 2 0 1 は、式 (1 6) を用いて、ステップ S 5 0 3 求めたパラメータ β_1 から、光学的距離 b_1 を算出する。

【 0 1 1 4 】

次に、ステップ S 5 0 5 で、モデルパラメータ推定部 2 0 1 は、式 (1 2) ~ (1 4) の計算により、インターフェログラムとパラメータ β_1 から、パラメータ A_1 を算出する。

【 0 1 1 5 】

次に、ステップ S 5 0 6 で、モデルパラメータ推定部 2 0 1 は、式 (1 5) を用いて、パラメータ A_1 から、反射係数 a_1 を算出する。

20

【 0 1 1 6 】

次に、ステップ S 5 0 7 で、モデルパラメータ推定部 2 0 1 は、仮定面数 L が L_{max} 以上であるかどうか、すなわちステップ S 5 0 1 で設定した仮定面数 L の範囲にある、各仮定面数 L での解析が、全て終了したかどうかを判定する。

【 0 1 1 7 】

L が L_{max} 以上の場合 (Yes)、処理は終了して、ステップ S 1 0 4 に移行する。 L が L_{max} よりも小さい場合 (No)、ステップ S 5 0 8 でモデルパラメータ推定部 2 0 1 は、仮定面数 L をインクリメントして、 $L = L + 1$ とし、ステップ S 5 0 1 に戻り、仮定面数 L が L_{max} 以上となるまでステップ S 5 0 1 ~ S 5 0 7 を繰り返す。

【 0 1 1 8 】

30

図 1 3 は、ステップ S 1 0 3 の最良のモデルの選択に係る詳細なフローチャートである。

【 0 1 1 9 】

処理が開始すると、最良モデル選択部 2 0 2 はステップ S 5 0 1 で設定された仮定面数 L の範囲（すなわち、最小値 L_{min} および最大値 L_{max} ）を設定する。

【 0 1 2 0 】

次にステップ S 6 0 2 で、最良モデル選択部 2 0 2 は、仮定面数 L を $L = L_{min}$ として初期化する。

【 0 1 2 1 】

次にステップ S 6 0 3 で、最良モデル選択部 2 0 2 は、モデルパラメータ推定部 2 0 1 が、仮定面数 $L = L_{min}$ において推定したパラメータ A_1 , β_1 を用いて、インターフェログラムを再構成する。

40

【 0 1 2 2 】

次にステップ S 6 0 4 で、最良モデル選択部 2 0 2 は、ステップ S 1 0 1 でノイズを除去した測定インターフェログラムと、ステップ S 6 0 3 の再構成インターフェログラムの尤度を算出する。

【 0 1 2 3 】

次にステップ S 6 0 5 で、最良モデル選択部 2 0 2 は、仮定面数 L を自由度とし、ステップ S 6 0 4 で求めた尤度を用いて、仮定面数 L における情報量規準を算出する。

【 0 1 2 4 】

次に、ステップ S 6 0 6 で、最良モデル選択部 2 0 2 は、仮定面数 L が L_{max} 以上であ

50

るかどう、すなわちステップ S 5 0 1 で設定した仮定面数 L の範囲にある、全ての仮定面数 L での解析が終了したかどうかを判定する。

【 0 1 2 5 】

L が L_{max} 以上の場合 (Y e s)、ステップ S 6 0 7 で、最良モデル選択部 2 0 2 は、全ての仮定面数 L における情報量規準の値を比較して、情報量基準の値が最も小さくなる仮定面数 L におけるモデルを、最良のモデルとして選択し、処理を終了する。

【 0 1 2 6 】

一方、ステップ S 6 0 6 で L が L_{max} よりも小さい場合 (N o の場合)、ステップ S 6 0 8 で最良モデル選択部 2 0 2 は、仮定面数をインクリメントして、 $L = L + 1$ とし、ステップ S 6 0 3 に戻り、仮定面数 L が L_{max} 以上になるまでステップ S 6 0 3 ~ S 6 0 6 を繰り返す。

10

【 0 1 2 7 】

このようにして、選択された最良のモデルにかかる仮定面数がステップ S 1 0 4 で、強度プロファイル再構成部 2 0 3 による強度プロファイルの再構成に供される。

【 0 1 2 8 】

このようにして、再構成された強度プロファイルは、深さ方向の強度プロファイルを解析するために用いられるだけではなく、 $X - Y$ の 2 軸を走査して測定したインターフェログラムについて求めることにより、3 次元画像を構成するために用いることができる。

【 0 1 2 9 】

4 . 実施例

20

4 - 1 実施例 1 : モデルパラメータの推定に基づくシミュレーション結果

図 1 4 は、光干渉測定装置 1 を用いて、光源 2 1 を 6 0 0 ~ 6 6 5 G H z で周波数変調した場合の強度プロファイルをシミュレーションした結果である。測定対象物は、その表面 (第 1 の反射面) の光学的距離が 8 0 m m となるように設定した。上段、中段、下段のグラフはそれぞれ、試料が表 1 に示す構造を有し、屈折率が 1 . 5 3 で一定であるとした場合の結果を示す。

【 0 1 3 0 】

【表 1】

表 1 実施例 1 のシミュレーション条件

図 1 4	試料構造	
	反射面数	厚さ (mm)
上段	2	<u>1 0</u>
中段	2	<u>5</u>
下段	2	<u>1</u>

30

【 0 1 3 1 】

図中、黒線は、本実施の形態において、仮定面数 $L = 2$ とし、モデル式 (3) からモデルパラメータ a_1 , A_1 を推定し、推定したモデルパラメータ a_1 , A_1 に基づいて再構成した強度プロファイル a_1 , b_1 を示す。また、灰色線は、比較として、同じインターフェログラムを高速フーリエ変換のみにより強度プロファイルに変換した結果を示す。

40

【 0 1 3 2 】

灰色線は、いずれもブロードなピークとして現れ、黒色線はシャープなピークとして現れる。高速フーリエ変換による強度プロファイルは、厚さ 1 0 m m の場合は、第 1 の面のピークと、第 2 の面のピークが分離されているものの、厚さ 5 m m ではピークが重なり合い、厚さ 1 m m では、まったく分離されていない。一方、本実施の形態のモデルパラメータの推定に基づいて再構成された強度プロファイルでは、何れの厚さにおいても、第 1 の面と第 2 の面のピークが分離されている。

【 0 1 3 3 】

これにより、モデル式 (3) を用いて、モデルパラメータの推定をおこない、推定した

50

モデルパラメータに基づいて強度プロファイルを再構成することにより、深さ方向の強度プロファイルを、一般的なフーリエ変換による手法よりも高い分解能で計測することができる。

【 0 1 3 4 】

4 - 2 実施例 2 : 実測実験

(1) フィルタによるノイズ除去

次に、光干渉測定装置 1 を用いた実測実験を行った。測定対象物（試料）として、表 2 に示す構造を有する、屈折率が一定のプラスチック製の平板を用いた。測定は、測定対象物を、その表面（第 1 の反射面）の光学的距離が 8 0 m m となるように設置して、光源を 6 0 0 ~ 6 6 5 G H z の範囲で周波数変調して行った。図 1 5 は、実測したインターフェ

10

【表 2】

表 2 実測実験条件

図 1 5 ~ 1 7	試料構造		
	反射面数	厚さ (mm)	材質
上段	2	1 0	ポリエチレン
中段	2	5	ポリエチレン
下段	2	1	ポリスチレン

20

【 0 1 3 5 】

また、図 1 5 (A) において、灰色線は、フィルタリング前のインターフェログラムを示し、これを高速フーリエ変換した強度プロファイルが、図 1 5 (B) の灰色線である。また、図 1 5 (B) の黒線は、フィルタリング後の強度プロファイルを示し、これを逆高速フーリエ変換したインターフェログラムが図 1 5 (A) の黒線である。

【 0 1 3 6 】

30

図 1 5 (B) に示すように、何れの厚さの試料においても、試料表面の位置、すなわち試料設置位置を基準として、パス領域を設定して、フィルタリングを行うことで、試料に起因しないノイズが的確に削除されていることがわかる。また、フィルタリングした強度プロファイルを逆高速フーリエ変換して得られるインターフェログラムからは、周期的なノイズが削除されていることがわかる。

【 0 1 3 7 】

このように、インターフェログラムをフーリエ変換することにより、強度プロファイルを構成し、強度プロファイルにおいて、試料設置位置を基準として、パス領域を設定し、パス領域以外の領域のデータを削除することにより強度プロファイルをフィルタリングし、フィルタリング後の強度プロファイルを逆フーリエ変換することにより、インターフェ

40

【 0 1 3 8 】

(2) 特異値分解 (S V D) によるノイズ除去

図 1 6 は、上記フィルタによるノイズ除去後のインターフェログラムを用いて、特異値分解によりノイズ除去をおこなった結果を示す。

【 0 1 3 9 】

図 1 6 において、灰色線は、特異値分解によるノイズ除去前のインターフェログラムであり、黒線は、特異値分解によるノイズ除去後のインターフェログラムである。いずれの厚さにおいても、ノイズ除去後のインターフェログラムの、特に矢印で示す部分で顕著なように、ノイズ除去前にエンベロープからはみ出していた部分が除去され、エンベロープが

50

滑らかにつながっていることがわかる。

【 0 1 4 0 】

このように、インターフェログラムから対角一定行列を生成し、その対角一定行列を特異値分解して特異値の対角行列を算出し、特異値の対角行列からノイズ成分を削除することにより、インターフェログラムからランダム性のホワイトガウシアンノイズを除去することが可能となる。

【 0 1 4 1 】

(3) 最良のモデルによる強度プロファイルの再構成

次に、上記実測実験における特異値分解によるノイズ除去を行った後のインターフェログラムを用い、仮定面数 L の範囲を $1 \sim 10$ として、各仮定面数におけるモデルパラメータの推定を行った。さらに、このモデルパラメータを用いて、各仮定面数におけるインターフェログラムを再構成し、ノイズ除去後のインターフェログラムと、再構成インターフェログラムとの尤度を算出し、仮定面数を自由度として、各仮定面数における AIC 値を求め、 AIC 値が最小となるモデルを最良のモデルとして選択した。 AIC 値が最小となる仮定面数 L は、厚さ 10 mm , 5 mm , 1 mm の場合において、それぞれ、 7 , 7 , 6 であった

【 0 1 4 2 】

図 17 (A) は強度プロファイルを示し、灰色線は、上記特異値分解によるノイズ除去後のインターフェログラムをフーリエ変換して得られた強度プロファイルを示し、黒色線は、選択された最良のモデルに基づいて再構成された強度プロファイルを示す。

また、図 17 (B) はインターフェログラムを示し、灰色線は上記特異値分解によるノイズ除去後のインターフェログラムを示し、黒線は、最良のモデルにより再構成されたインターフェログラムを示す。

【 0 1 4 3 】

図 17 (A) から、何れの厚さにおいても、最良のモデルに基づいて再構成された強度プロファイルが、フーリエ変換により生成した強度プロファイルよりも高い分解能で観察でき、厚さ 1 mm においても、第 1 の反射面と、第 2 の反射面とのピークが分離できていることがわかる。

【 0 1 4 4 】

次に、図 17 (B) から、何れの厚さにおいても、最良モデルにより再構成されたインターフェログラムが、入力データであるノイズ除去後のインターフェログラムを、概ね再現できていることがわかる。

【 0 1 4 5 】

このように、各仮定面数について推定したパラメータを適用したモデル式を用いて、インターフェログラムを再構成し、再構成されたインターフェログラムと、元のインターフェログラムとの尤度を算出し、仮定面数を自由度として得られる情報量規準に基づいて最良のモデル式を選択することで、最良のモデル式を用いて強度プロファイルを再構成することができ、その結果、一般的なフーリエ変換による手法よりも高い分解能で、深さ方向の強度プロファイルを計測することができる。

【 0 1 4 6 】

なお、上記実施例においては、いずれも反射面数 L が 2 の試料についてシミュレーションおよび実測実験を行った結果を示したが、反射面数 L が 1 および 3 以上の場合においても同等の結果が得られた。

【 0 1 4 7 】

以上の通り、本実施の形態に係る、光干渉測定方法は、ノイズを除去するノイズ除去方法と、モデルパラメータを推定し、最良モデルを選択し、最良モデルに基づいて、強度プロファイルを再構成する超解像解析法とを含む。またノイズ除去方法は、フィルタによるノイズ除去方法と、特異値分解によるノイズ除去方法とを含む。しかし、上記実験の結果から明らかなように、これらの方法はいずれも独立して効果を奏するものであり、ノイズ除去を目的として、ノイズ除去のみを行ってもよく、あるいは、分解能の向上を目的とし

10

20

30

40

50

て、超解像解析法のみを行ってもよい。ノイズ除去方法と、超解像解析法を合わせて実施すると、分解能の向上が顕著となり有利である。

【0148】

5．変形形態

本実施の形態の一つの変形として、ステップS501およびステップS601を自動的に設定するように構成してもよい。図18は、該変形形態に係る光干渉測定装置1aの信号処理部8aの機能構成図である。光干渉測定装置1aは光干渉測定装置1と概略同様の構成を有するが、信号処理部8aが、モデルパラメータ推定部201および最良モデル選択部202に代えて、それぞれモデルパラメータ推定部201aおよび最良モデル選択部202aを備える点で異なる。

10

【0149】

モデルパラメータ推定部201aは、モデルパラメータの推定において、ステップS501に代えて、図19に示す処理を行う。すなわち、仮定面数Lの範囲の設定を開始すると、ステップS701で、モデルパラメータ推定部201aは、(例えばステップS301等において)FFT解析部10によるインターフェログラムのフーリエ変換により得られた強度プロファイルを参照し、ピーク数に基づいて仮定面を決定する。具体的には、図14に灰色線で表されるようにピークが2つ確認される場合には、ピーク数 2 ± 5 の範囲(ただし、仮定面数Lは自然数)と設定し、仮定面数Lの範囲を1~7と決定する。

【0150】

次にステップS702で、上記決定に基づいて仮定面数Lの範囲(すなわち最小値 L_{min} 、最大値 L_{max})を設定し、処理を終了して、ステップS502に移行する。

20

【0151】

最良モデル選択部202aにおいても、同様である。

このように構成すると、適切な仮定面数Lの範囲を自動的に設定することができるので、測定作業が容易になる。

【0152】

なお、本発明は、上記した実施の形態に限定されるものではなく、様々な変更を含んでもよい。また、上記実施形態の説明は、本発明のより良い理解のために詳細に説明したものであり、必ずしも説明の全ての構成を備えるものに限定されるのではない。例えば、上記説明では、光干渉測定装置が、SS-OCTである場合について述べたが、これに限らず、本発明は、フーリエ変換により、深さ方向の強度プロファイルを得るSD-OCTなどの光干渉測定装置に適用することもできる。また、各実施例の構成の一部について、他の構成の追加・削除・置換をすることも可能である。

30

【符号の説明】

【0153】

1, 1a 光干渉測定装置

8, 8a 信号処理部

20 超解像解析部

201, 201a モデルパラメータ推定部

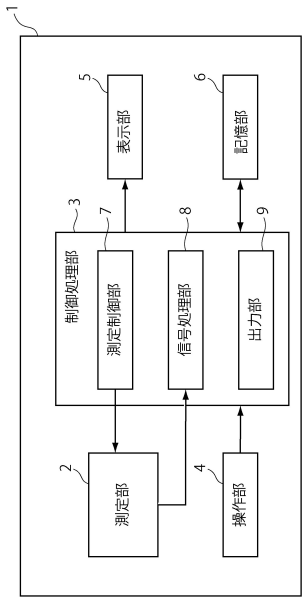
202, 202a 最良モデル選択部

203 強度プロファイル再構成部

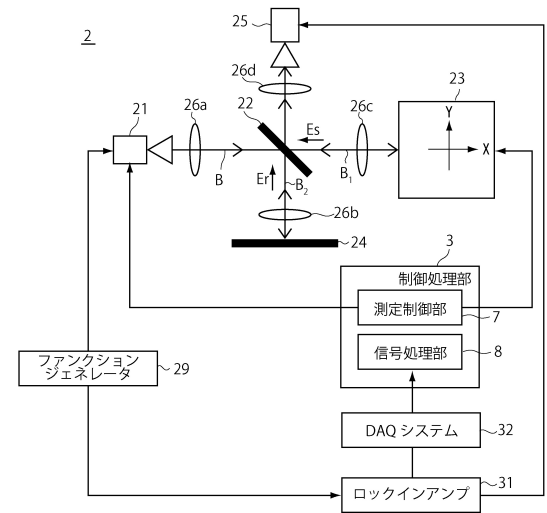
40

【図面】

【図 1】



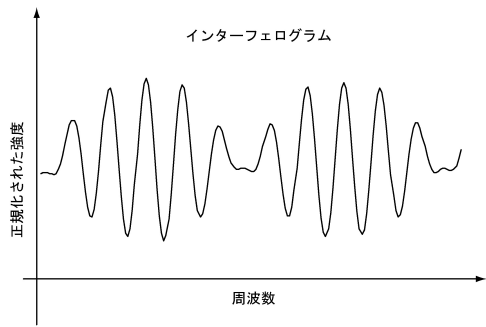
【図 2】



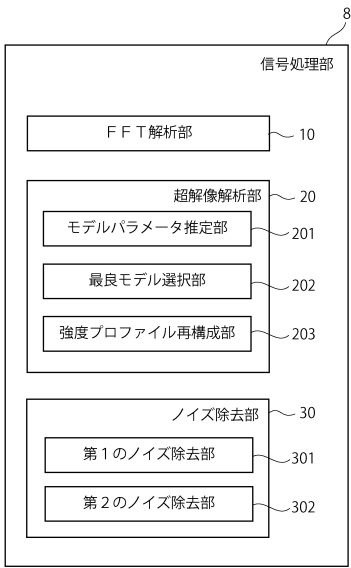
10

20

【図 3】



【図 4】

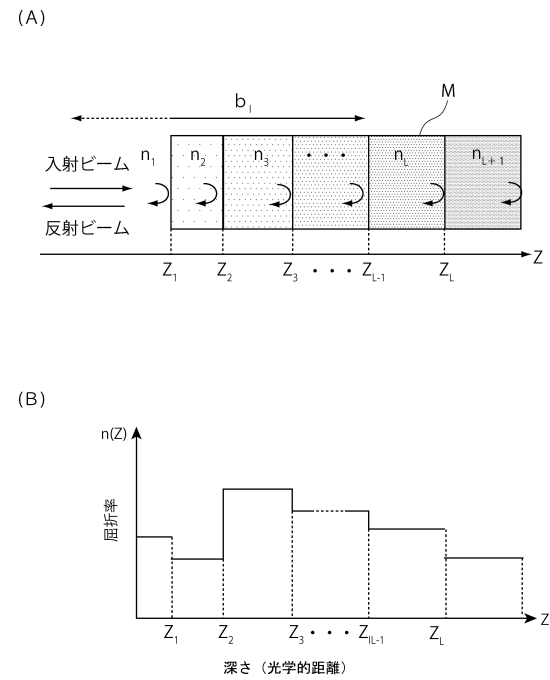


30

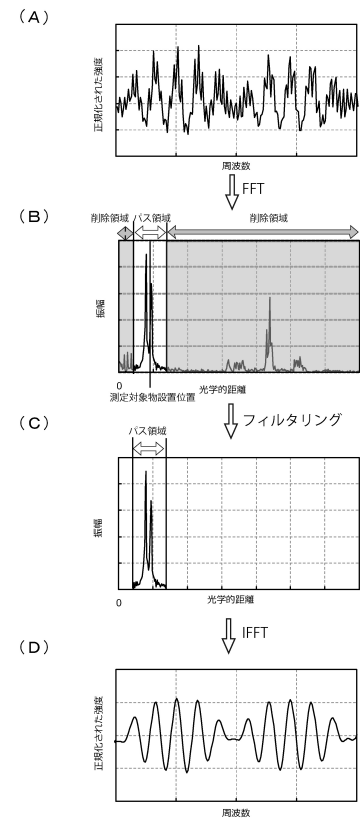
40

50

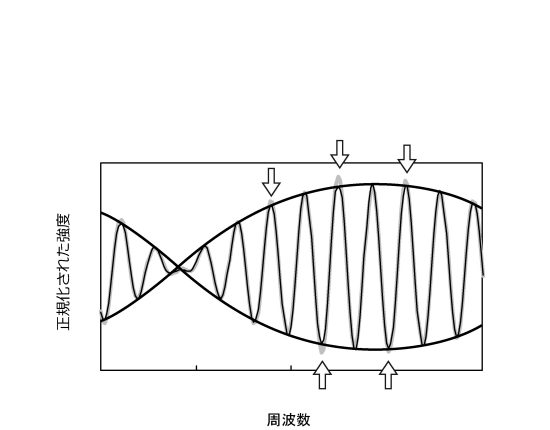
【図 5】



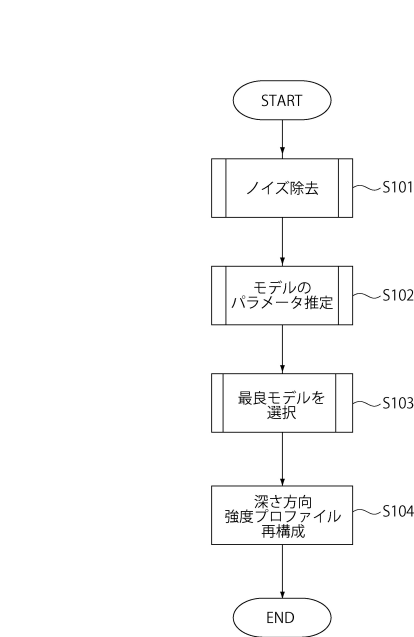
【図 6】



【図 7】



【図 8】



10

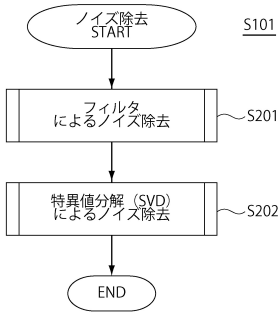
20

30

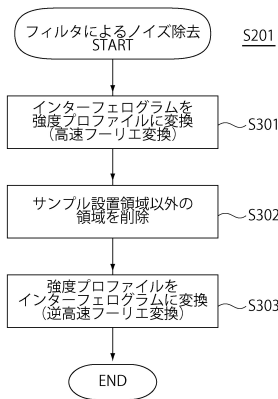
40

50

【図 9】



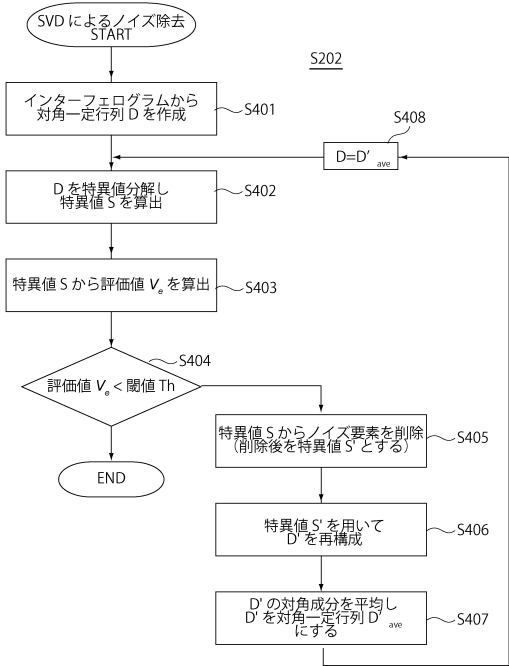
【図 10】



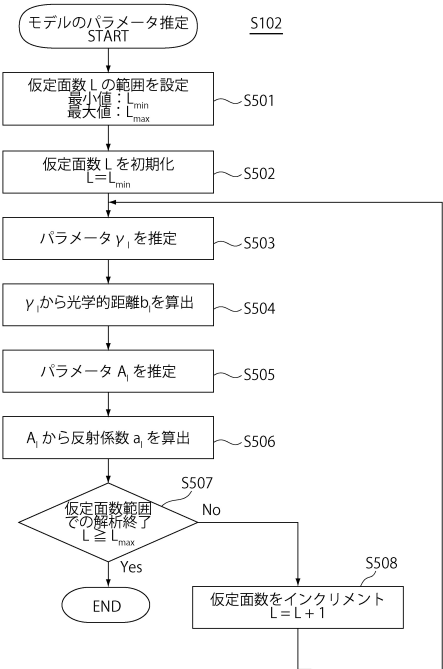
10

20

【図 11】



【図 12】

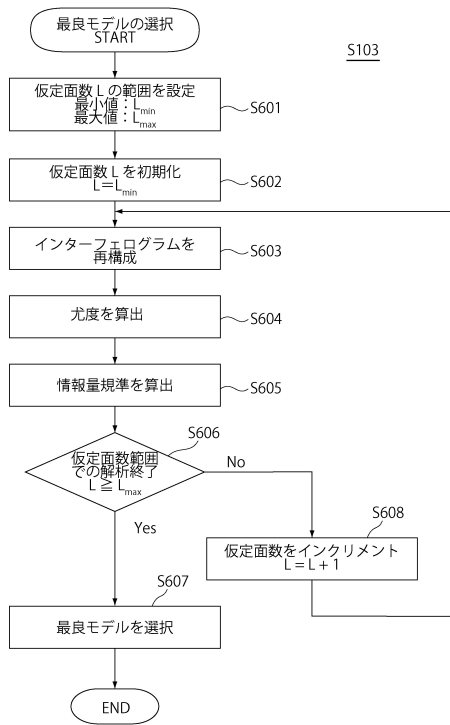


30

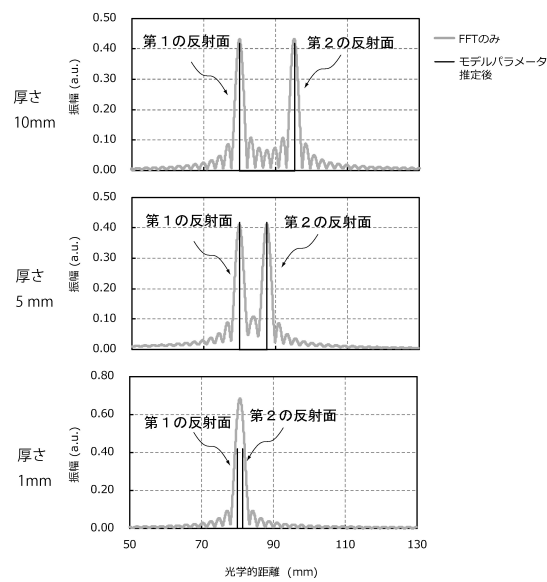
40

50

【図 1 3】



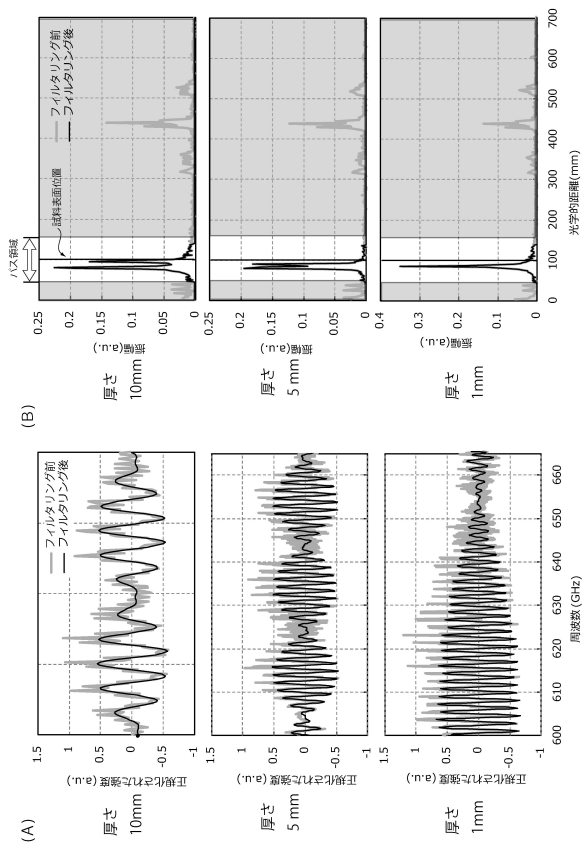
【図 1 4】



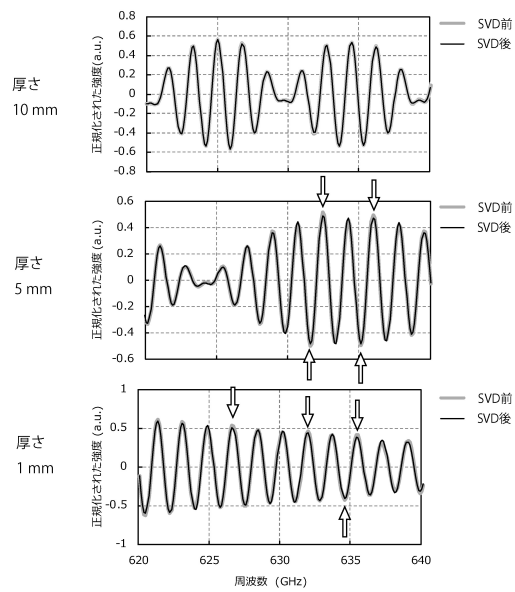
10

20

【図 1 5】



【図 1 6】

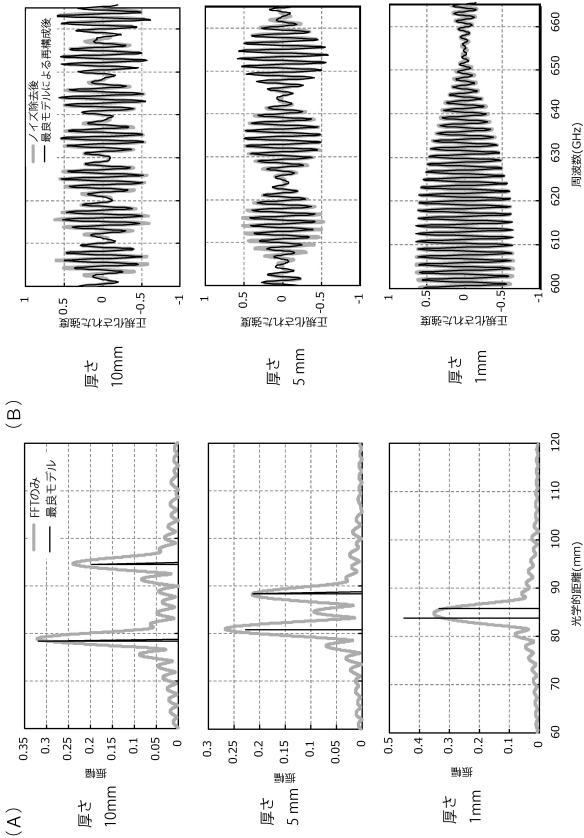


30

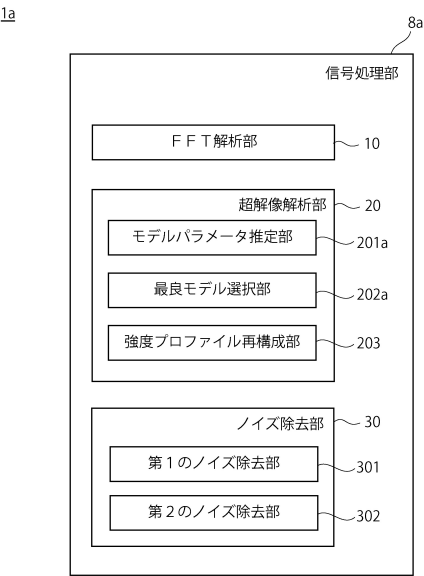
40

50

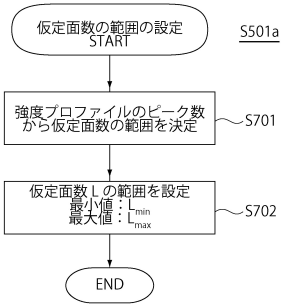
【図 17】



【図 18】



【図 19】



フロントページの続き

1 3 9 9 国立研究開発法人理化学研究所内

(72)発明者 吉峯 功

宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 5 1 9 - 1 3 9 9 国立研究開発法人理化学研究所内

(72)発明者 大谷 知行

宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 5 1 9 - 1 3 9 9 国立研究開発法人理化学研究所内

(72)発明者 湯浅 哲也

山形県米沢市中央 3 - 1 0 - 2 0 - 1 5 0 2

審査官 平田 佳規

(56)参考文献 特開 2 0 2 0 - 1 9 3 9 2 0 (J P , A)

特開 2 0 1 4 - 1 2 1 6 1 4 (J P , A)

特表 2 0 0 9 - 5 1 6 1 8 1 (J P , A)

IEEE TRANSACTIONS ON SIGNAL PROCESSING , 2014年10月01日 , Vol.62 No.19 , p.502
0 ~ 5029

(58)調査した分野 (Int.Cl. , D B 名)

G 0 1 N 2 1 / 0 0 - G 0 1 N 2 1 / 0 1

G 0 1 N 2 1 / 1 7 - G 0 1 N 2 1 / 6 1

G 0 1 B 9 / 0 2 - G 0 1 B 9 / 0 2 9

G 0 1 B 1 1 / 0 0 - G 0 1 B 1 1 / 3 0

A 6 1 B 1 / 0 0

A 6 1 B 3 / 1 0 - A 6 1 B 3 / 1 2 5