

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2020年12月3日(03.12.2020)



(10) 国際公開番号

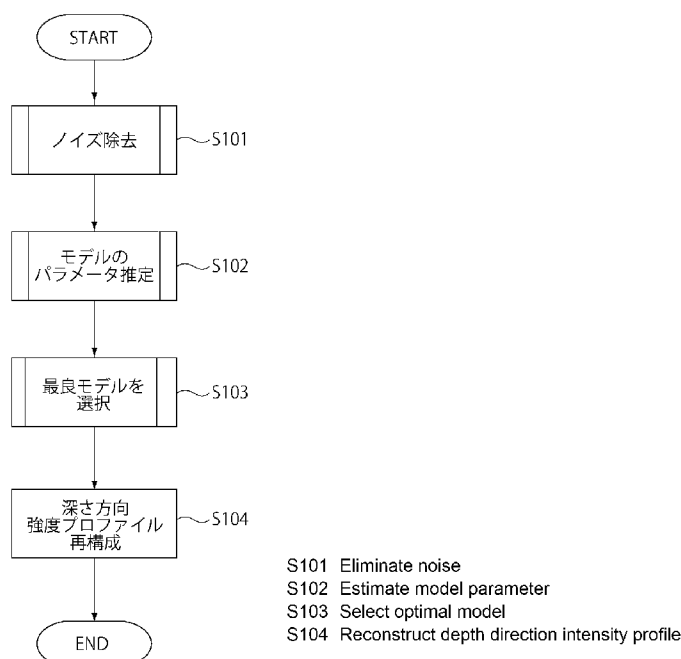
WO 2020/241583 A1

- (51) 国際特許分類:
G01B 9/02 (2006.01) *G01N 21/17* (2006.01) [JP/JP]; 〒3510198 埼玉県和光市広沢 2 番 1 号 Saitama (JP).
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2020/020582 (72) 発明者: 榎山 誉 (MOMIYAMA Homare); 〒1748580 東京都板橋区蓮沼町 7 5 番 1 号 株式会社トプコン内 Tokyo (JP). 佐々木 芳彰 (SASAKI Yoshiaki); 〒9800845 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 Miyagi (JP). 吉峯 功 (YOSHIMINE Isao); 〒9800845 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 Miyagi (JP). 大谷 知行 (OTANI Chiko); 〒9800845 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 Miyagi (JP). 湯浅 哲也
- (22) 国際出願日: 2020年5月25日(25.05.2020)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2019-100827 2019年5月30日(30.05.2019) JP
- (71) 出願人: 株式会社トプコン (TOPCON CORPORATION) [JP/JP]; 〒1748580 東京都板橋区蓮沼町 7 5 番 1 号 Tokyo (JP). 国立研究開発法人理化学研究所 (RIKEN)

(54) Title: LIGHT INTERFERENCE MEASUREMENT DEVICE AND LIGHT INTERFERENCE MEASUREMENT METHOD

(54) 発明の名称: 光干渉測定装置および光干渉測定方法

[図8]



(57) Abstract: Provided is light interference measurement technology that improves depth-direction intensity profile resolution without using a wideband light source. A light interference measurement device (1) comprises a measurement unit (2) for acquiring an interferogram of interference waves obtained by causing emitted electromagnetic waves that have been reflected by a reflection surface of an object under measurement and emitted electromagnetic waves that have been reflected by a reference surface to interfere and a signal processing unit (8) for constructing a depth-direction intensity

(YUASA Tetsuya); 〒9920045 山形県米沢市中
央3-10-20-1502 Yamagata (JP).

(74) 代理人: 八木 秀人, 外 (YAGI Hidehito et al.);
〒1030021 東京都中央区日本橋本石町3丁目
2番6号 ストックビルディング本石5階 あ
お葉国際特許事務所 Tokyo (JP).

(81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保
護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ,
BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH,
CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO,
DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT,
HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, KE, KG, KH,
KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY,
MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ,
NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT,
QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL,
ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG,
US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

(84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保
護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS,
MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM,
ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ,
TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ,
DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT,
LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS,
SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM,
GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

一 国際調査報告(条約第21条(3))

profile by subjecting the interferogram to a Fourier transform. The signal processing unit (8) comprises: a model parameter estimation unit (201) for, on the basis of an interferogram model expression assuming that the object under measurement is an object having a prescribed structure, estimating a parameter of the model expression for an assumed number of faces; an optimal model selection unit (202) for using a statistical method to select an optimal model from the model expression having the parameter estimated for the assumed number of faces applied thereto; and an intensity profile reconstruction unit (203) for reconstructing the intensity profile on the basis of the optimal model.

(57) 要約: 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した光干渉測定技術を提供する。光干渉測定装置(1)は、照射した電磁波の、測定対象物の反射面からの反射波と、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(2)と、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(8)とを備え、信号処理部(8)は、測定対象物が所定の構造を有する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、仮定面数について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(201)と、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から、統計学的手法により最良モデルを選択する最良モデル選択部(202)と、最良モデルに基づいて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(203)を備える。

明 細 書

発明の名称：光干渉測定装置および光干渉測定方法

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

[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）が開示されている。

先行技術文献

特許文献

[0004] 特許文献1：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] FD-OCT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。

[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くする必要がある。しかし、光源の周波数を広くするためには、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。

[0008] 本発明は、係る事情に鑑みなされたものであり、光断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の反射面を有する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る。

[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。

[0012] 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。

[0013] 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。

[0014] 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、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の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る。

発明の効果

[0015] 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

[0016] [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 B_2 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 B_1 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 B_2 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 B_2 の反射光と測定光 B_1 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 B_1 と参照光 B_2 とに分割される。参照光 B_2 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、ビームスプリッタ 22 を介して検出器 25 へと向かう。一方、測定光 B_1 はコリメートレンズ 26c 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 22 へと入射して、コリメートレンズ 26d を介して検出器 25 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。

[0027] $SS-OCOT$ の原理によれば、光源 21 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

25により検出される。検出信号は、DAQシステム（データ収集システム）32によりサンプリングおよびデジタル化され、画像データとして出力される。この画像データが、図3に示すインターフェログラムである。

[0028] 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タの一部であってもよい。

[0029] 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。

[0030] 測定制御部7は、光源21の周波数を変調する。また、測定制御部7は、自動ステージ23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。

[0031] 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。

[0032] 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。

[0033] 2. 信号処理部の詳細構成

次に、図3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10と、超解像解析部20と、ノイズ除去部30とを備える。

[0034] 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。

[0035] 超解像解析部20は、モデルパラメータ推定部201、最良モデル選択部202、およ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 $I(k)$ は、参照面側からの電場を $E_r(k)$ 、測定対象物側からの電場を $E_s(k)$ 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の反射面である。

[数1]

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

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]

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

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。

[0040] また、式(2)は、

[数3]

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

とおくと、モデル式として、以下の様に簡素化できる。

[0041] [数4]

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

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

[0042] 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_l 、 γ_l 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

[0043]

[数5]

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

[0044] 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

、

[0045] [数6]

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

[0046] である。これを行列で書き直すと、

[0047] [数7]

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

$$\mathbf{D}\mathbf{p} = \mathbf{0} \quad (7)$$

[0048] と表せる。この時、Dのデータ数は、 $K \geq 2L+1$ 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 κ のデータセット

[数8]

 $\tilde{\mathbf{D}}$

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。

[0049] [数9]

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

ここで、pは p_j のデータセットである。

[0050] 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10]

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

[0051] となる。従って、

[0052] [数11]

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

[0053] 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。

[0054] また、式(3)を行列で書き直すと、

[0055] [数12]

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

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

[0056] と表せる。しかし、先ほどと同様に実際の測定データ

[0057] [数13]

$\tilde{\mathbf{d}}$

[0058] 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

[数14]

$\tilde{\mathbf{a}}$ 、すなわち A_l (のセット)

が求められる。

[0059] [数15]

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

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

[0060] この様にして、モデルパラメータ推定部 201 は、仮定面数 L の場合のパラメータ A_l および γ_l を推定する。

[0061] さらにモデルパラメータ推定部 201 は、推定したパラメータ A_l および γ_l から、測定対象反射係数 a_l 、および光学的距離 b_l を算出する。

まず、得られた A_l の絶対値をとることで a_l を求める。

[0062] [数16]

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

[0063] また、式(15)を用いて、 γ_l から b_l を得る。

[0064] [数17]

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

ここで、 ϕ は複素数の γ_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。

[0065] 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 、 γ_l 、および強度プロファイル a_l 、 b_l を求める。

[0066] 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。

[0067] 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 、 γ_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。

[0068] 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。

[0069] 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 、 γ_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。

[0070] 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(AIC)、有限修正AIC(AICc)、ベイズアン情報量規準(BIC)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。

[0071] 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。

[0072] 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。

[0073] 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。

[0074] そこで、第1のノイズ除去部301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。

[0075] 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10mmで、測定対象物の表面位置（測定対象物設置位置）が100mmの場合、測定対象物設置位置の前後50mmすなわち、50mm～150mm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301は、一種のバンドパスフィルタのように作用する。

[0076] 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。

[0077] 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。

[0078] 次に、第1のノイズ除去部301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（ＩＦＦＴ）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。

[0079] 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。

[0080] 第２のノイズ除去部３０２について説明する。

図７は、第２のノイズ除去部３０２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３０２は、以下のようにして、このようなノイズを削除する。

[0081] （ａ）第２のノイズ除去部３０２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18]

$\tilde{D}$

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

[数19]

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

を作成する。

[0082] （ｂ）第２のノイズ除去部３０２は、行列

[数20]

$\tilde{\mathbf{D}}$

を、式 (17) のように特異値分解 (SVD, Singular Value Decomposition) する。

[数21]

$$\tilde{\mathbf{D}} = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{V}^T \quad (17)$$

(ここで、

$\mathbf{U}$ は、要素数が $(K - 2L - 1) \times (2L + 1)$ のユニタリ行列 (複素数, $\mathbf{U}\mathbf{U}^* = \mathbf{U}^*\mathbf{U} = \mathbf{I}$) であり、

$\mathbf{S}$ は、要素数が $(2L + 1) \times (2L + 1)$ の対角行列であり、

$\mathbf{V}$ は、要素数が $(2L + 1) \times (2L + 1)$ のユニタリ行列である。

)

[0083] (c) 次に、第2のノイズ除去部302は、特異値の対角行列 $\mathbf{S}$ を、式 (18) の通り求める。

[数22]

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

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

[0084] (d) 次に、第2のノイズ除去部302は、特異値の対角行列 $\mathbf{S}$ 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 $\mathbf{S}$ の $(2L + 1)$ 番目の要素の値 σ_{2L+1} をノイズ成分とみなし、 $2L$ 番目の要素の値 σ_{2L} をシグナル成分とみなして、式 (19) のように設定してもよい。

[数23]

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

[0085] (e) 次に、第2のノイズ除去部302が、求めた特異値の対角行列 $\mathbf{S}$ 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 (20) の通り構築する。

[数24]

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

[0086] 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。

[0087] (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25]

$$\tilde{D}'$$

を式 (21) のように再構成する。

[数26]

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

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。

[0088] ノイズを除去した

[数27]

$$\tilde{D}'$$

は必ずしも対角一定行列とはならない。そこで、

[数28]

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

に再構築する。

[0089] (g) 再構成した対角一定行列

[数29]

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

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30]

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

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。

[0090] 第1のノイズ成分の除去と、特異値分解による第1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。

[0091] 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。

[0092] 3. 光干渉測定方法

以下、図8～図13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。

[0093] 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S101で、ノイズ除去部30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S102で、モデルパラメータ推定部201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S103で、最良モデル選択部202が、最良モデルを選択する。次に、ステップS104で、強度プロファイル再構成部203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。

[0094] 図9は、ステップS101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。

[0095] ノイズ除去が開始すると、ステップS201で、第1のノイズ除去部301が、フィルタによるノイズの除去を行い、ステップS202で、第2のノイズ除去部302が特異値分解(SVD)によるノイズの除去を行う。その後、処理はステップS102に移行する。

[0096] 図10は、ステップS201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。

[0097] フィルタによるノイズ除去が始まると、ステップS301で、FFT解析部10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。

[0098] 次に、ステップS302で、第1のノイズ除去部301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。

[0099] 次に、ステップS303で、第1のノイズ除去部301が、ステップS302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S202に移行する。

[0100] 図11は、ステップS202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。

[0101] 特異値分解によるノイズの除去を開始すると、ステップS401では、第2のノイズ除去部302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。

[0102] 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。

[0103] 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。

[0104] 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。

[0105] 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））。

[0106] 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31]

$$\tilde{\mathbf{D}}'$$

を再構成する。

[0107] 次に、ステップS 4 0 7で、行列

[数32]

$$\tilde{\mathbf{D}}'$$

の対角成分を平均化し、対角一定行列

[数33]

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

として、ステップS 4 0 8で

[数34]

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

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。

- [0108] 一方、ステップS404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S102に移行する。
- [0109] 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。
- [0110] 図12は、ステップS102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S501で、モデルパラメータ推定部201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。
- [0111] 次に、ステップS502で、モデルパラメータ推定部201は、仮定面数 L を $L = L_{min}$ として初期化する。
- [0112] 次に、ステップS503で、モデルパラメータ推定部201は、仮定面数 L_{min} の下で、上記式（4）から（12）の計算により、モデル式（3）のパラメータ γ_i を算出する。
- [0113] 次に、ステップS504で、モデルパラメータ推定部201は、式（16）を用いて、ステップS503求めたパラメータ γ_i から、光学的距離 b_i を算出する。
- [0114] 次に、ステップS505で、モデルパラメータ推定部201は、式（12）～（14）の計算により、インターフェログラムとパラメータ γ_i から、パラメータ A_i を算出する。
- [0115] 次に、ステップS506で、モデルパラメータ推定部201は、式（15）を用いて、パラメータ A_i から、反射係数 a_i を算出する。
- [0116] 次に、ステップS507で、モデルパラメータ推定部201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S501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。
- [0117] L が L_{max} 以上の場合（Yes）、処理は終了して、ステップS104に移

行する。 L が L_{max} よりも小さい場合（No）、ステップS508でモデルパラメータ推定部201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S501に戻り、仮定面数 L が L_{max} 以上となるまでステップS501～S507を繰り返す。

[0118] 図13は、ステップS103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。

[0119] 処理が開始すると、最良モデル選択部202はステップS501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。

[0120] 次にステップS602で、最良モデル選択部202は、仮定面数 L を $L=L_{min}$ として初期化する。

[0121] 次にステップS603で、最良モデル選択部202は、モデルパラメータ推定部201が、仮定面数 $L=L_{min}$ において推定したパラメータ A_1 , γ_1 を用いて、インターフェログラムを再構成する。

[0122] 次にステップS604で、最良モデル選択部202は、ステップS101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S603の再構成インターフェログラムの尤度を算出する。

[0123] 次にステップS605で、最良モデル選択部202は、仮定面数 L を自由度とし、ステップS604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。

[0124] 次に、ステップS606で、最良モデル選択部202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S501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。

[0125] L が L_{max} 以上の場合（Yes）、ステップS607で、最良モデル選択部202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。

[0126] 一方、ステップS606で L が L_{max} よりも小さい場合（Noの場合）、ス

ステップS608で最良モデル選択部202は、仮定面数をインクリメントして、 $L = L + 1$ とし、ステップS603に戻り、仮定面数 L が L_{max} 以上になるまでステップS603～S606を繰り返す。

[0127] 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S104で、強度プロファイル再構成部203による強度プロファイルの再構成に供される。

[0128] 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。

[0129] 4. 実施例

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14は、光干渉測定装置1を用いて、光源21を600～665GHz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80mm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1.53で一定であるとした場合の結果を示す。

[0130] [表1]

表1 実施例1のシミュレーション条件

図14	試料構造	
	反射面数	厚さ (mm)
上段	2	100
中段	2	50
下段	2	10

[0131] 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 γ_1 , A_1 を推定し、推定したモデルパラメータ γ_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。

[0132] 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100mm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50mmではピークが重なり合い、厚さ10mm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。

[0133] 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ことがわかる。

[0134] 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80mmとなるように設置して、光源を600~665GHzの範囲で周波数変調して行った。図15は、実測したインターフェログラムを用い、S201のフィルタによるノイズ除去を行った結果である。上段、中段、下段のグラフはそれぞれ、表2に示す条件での実験結果を示す。また、パス領域は、試料表面の位置(80mm)を基準として-34mm~+57mm(すなわち、光学的距離が、46~137mm)となるように設定した。

[表2]

表2 実測実験条件

図15~17	試料構造		
	反射面数	厚さ (mm)	材質
上段	2	10	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

[0135] また、図15(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15(B)の灰色線である。また、図15(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15(A)の黒線である。

[0136] 図15(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。

[0137] 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、インターフェログラムから周期的なノイズを除去することが可能となる。

[0138] (2) 特異値分解(SVD)によるノイズ除去

図16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。

[0139] 図16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ていた部分が除去され、エンベロープが滑らかにつらなっていることがわかる。

[0140] 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。

[0141] (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1～10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10mm, 5mm, 1mmの場合において、それぞれ、7, 7, 6であった。

[0142] 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。

[0143] 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1mm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。

[0144] 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。

[0145] 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。

[0146] 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。

[0147] 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。

[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数を決定する。具体的には、図14（A）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。

[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いてもよい。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。

符号の説明

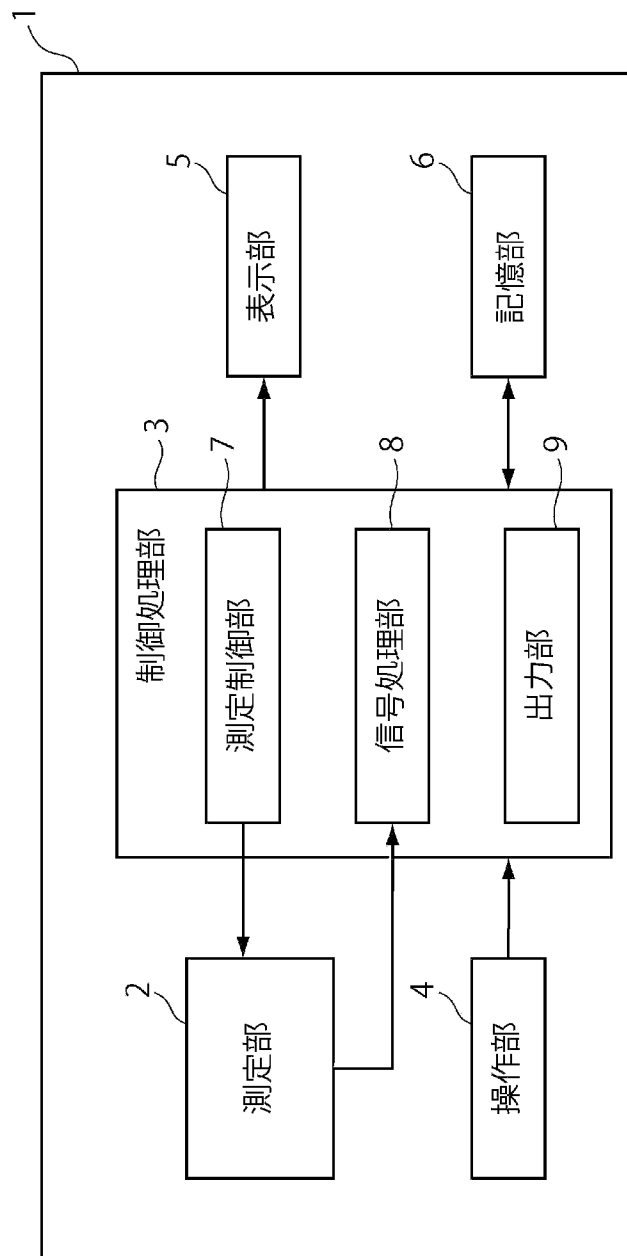
- [0153] 1, 1a 光干渉測定装置
8, 8a 信号処理部
20 超解像解析部
201, 201a モデルパラメータ推定部
202, 202a 最良モデル選択部
203 強度プロファイル再構成部

請求の範囲

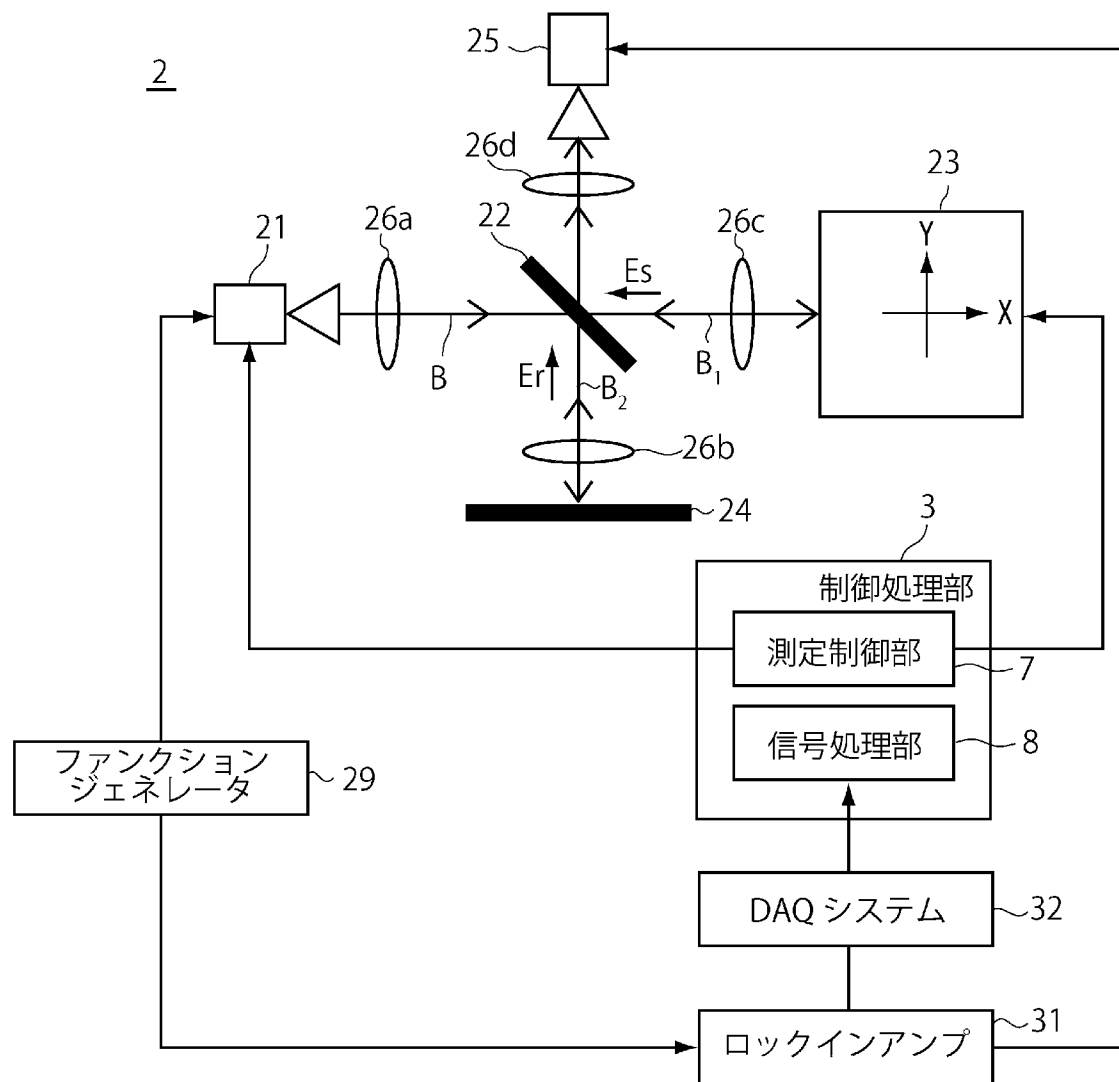
- [請求項1] 電磁波を測定対象物および参照面に照射し、前記測定対象物の反射面からの反射波と、前記参照面からの反射波とを干渉させて干渉波のインターフェログラムを取得する測定部と、
- 前記インターフェログラムをフーリエ変換することにより、深さ方向の強度プロファイルを構成する信号処理部とを備え、
- 前記信号処理部は、
- 測定対象物が少なくとも1の反射面を有する層状構造物であると仮定した場合の、インターフェログラムのモデル式に基づいて、所定の仮定面数の範囲における各仮定面数について前記モデル式のパラメータを推定するモデルパラメータ推定部と、
- 前記各仮定面数について推定したパラメータを適用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4] 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1～3のいずれかに記載の光干渉測定装置。
- [請求項5] 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1～3のいずれかに記載の光干渉測定装置。
- [請求項6] 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、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の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
- を備えることを特徴とする光干渉測定方法。

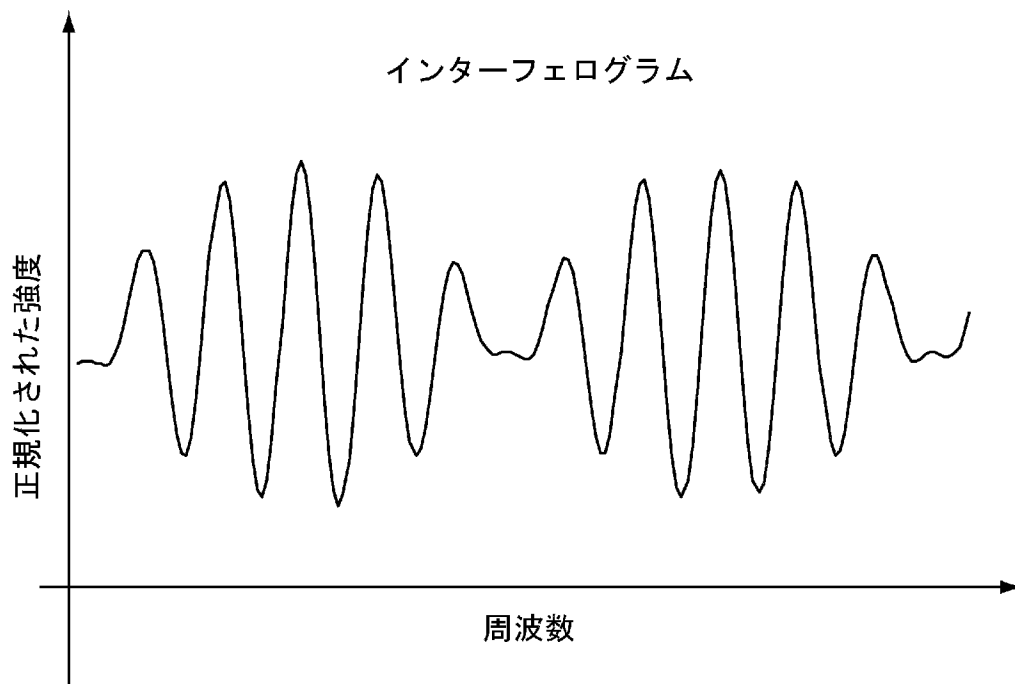
[図1]



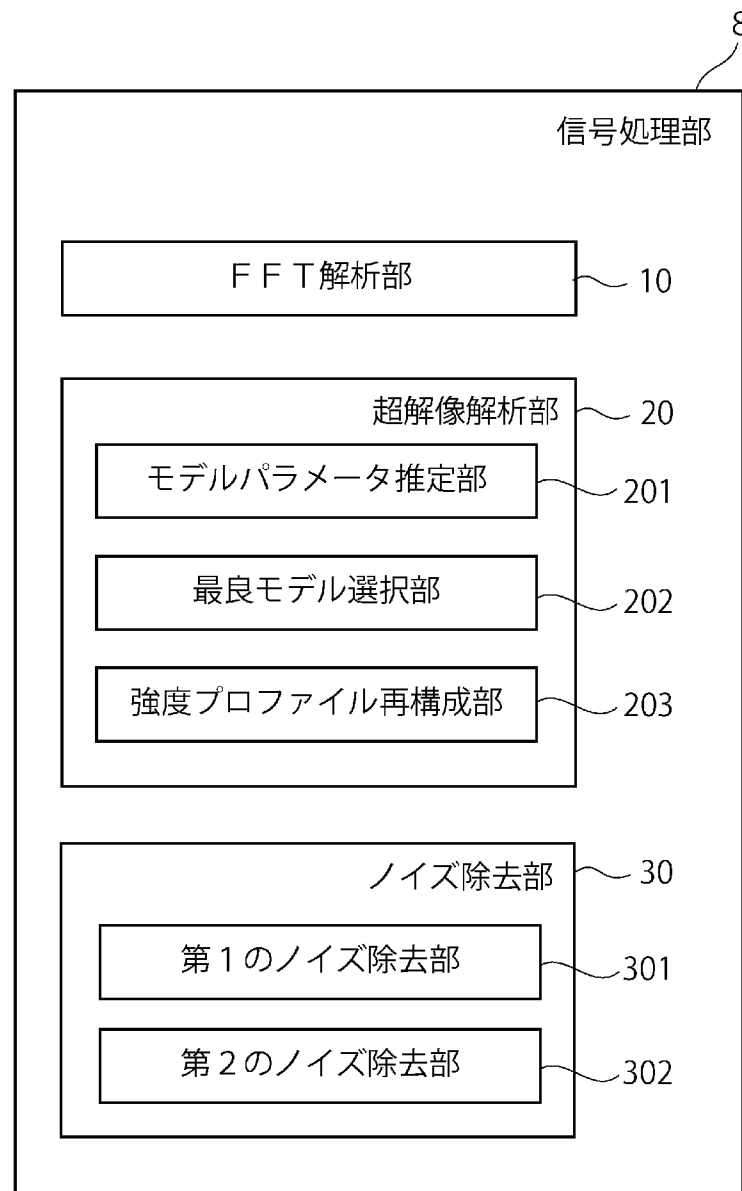
[図2]



[図3]

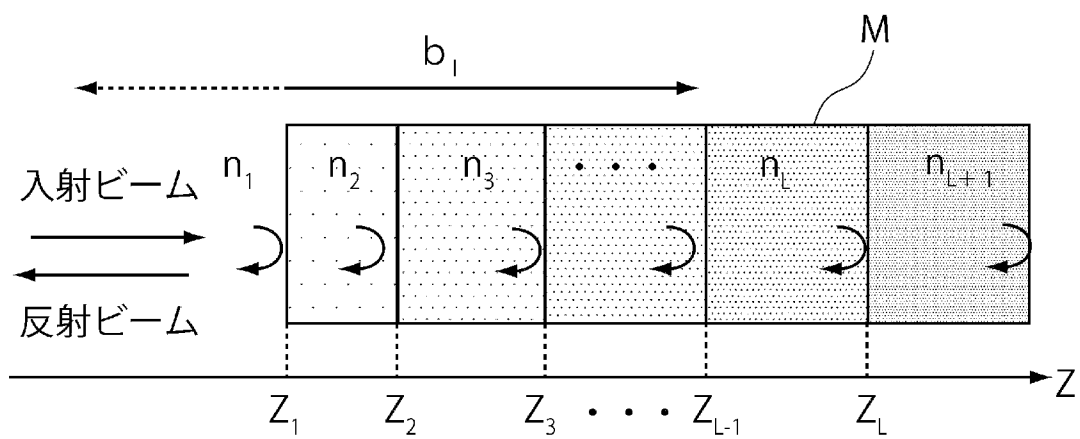


[図4]

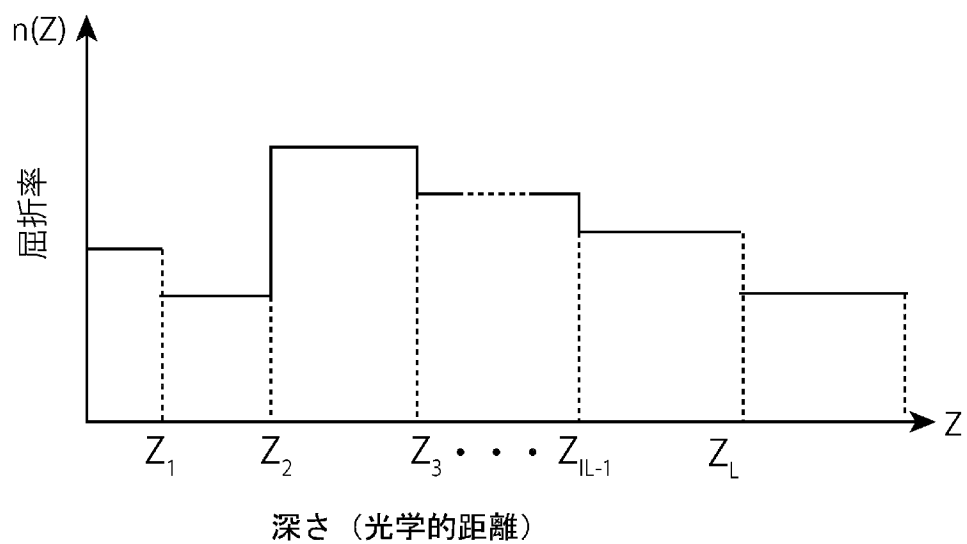


[図5]

(A)

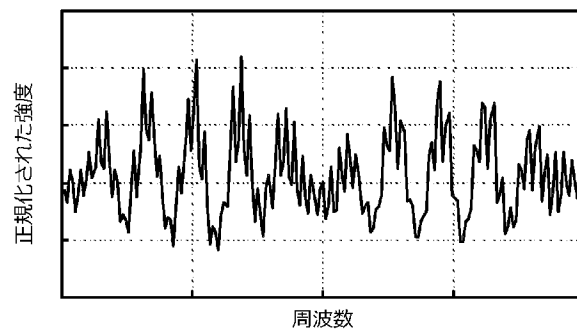


(B)



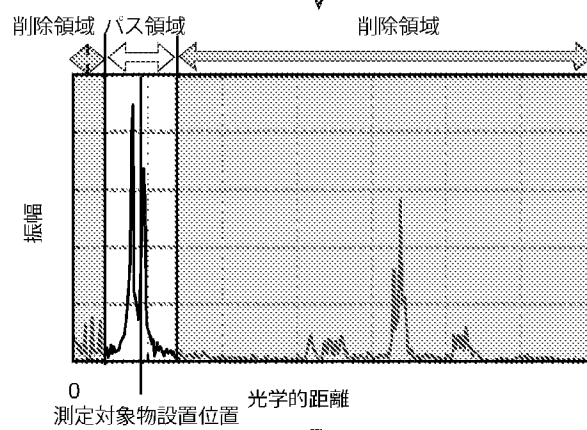
[図6]

(A)



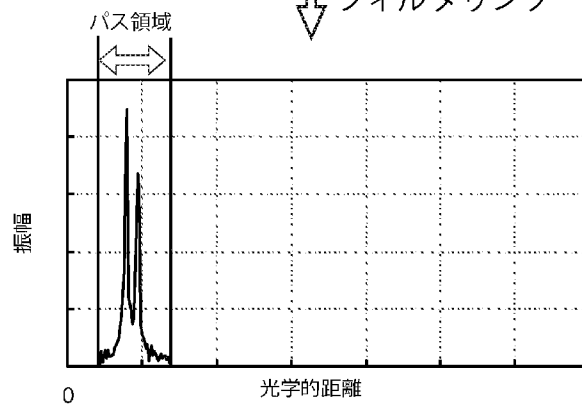
周波数
↓ FFT

(B)



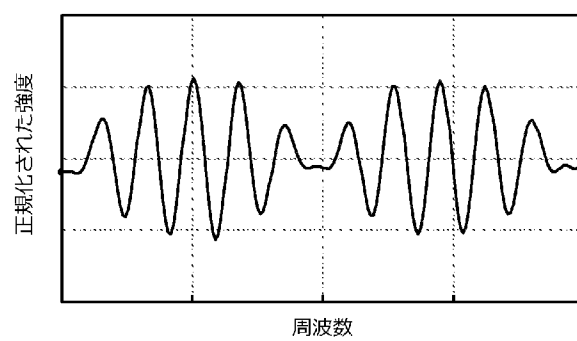
↓ フィルタリング

(C)

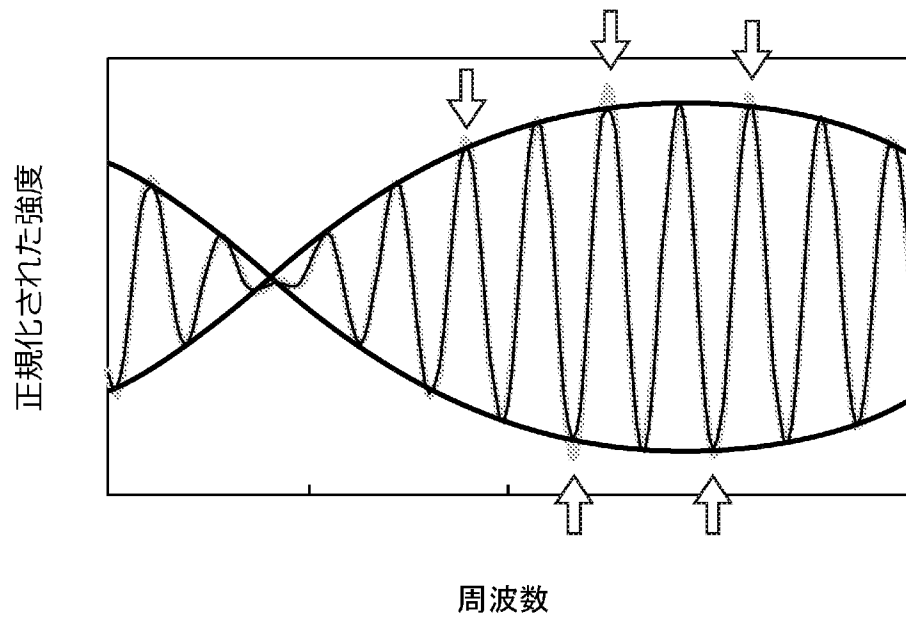


↓ IFFT

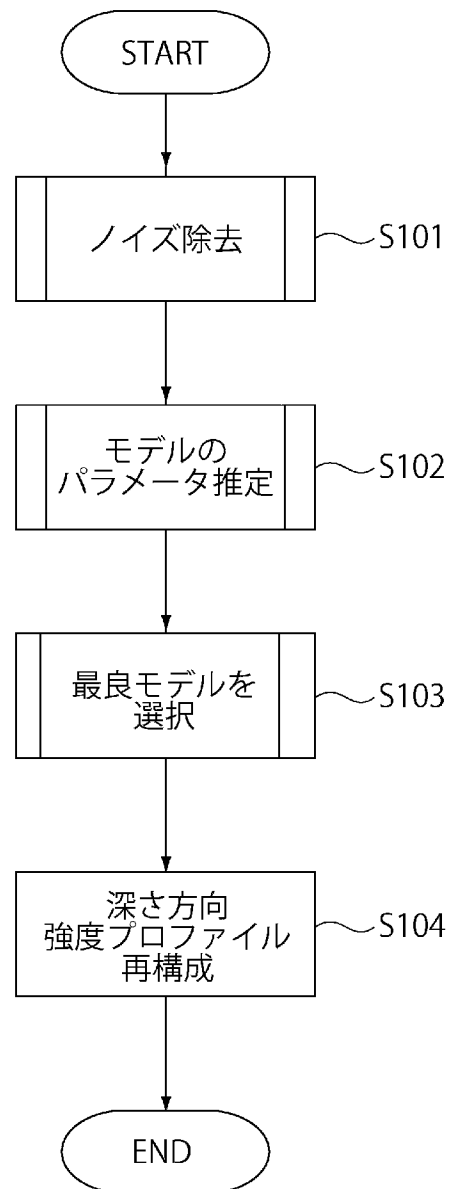
(D)



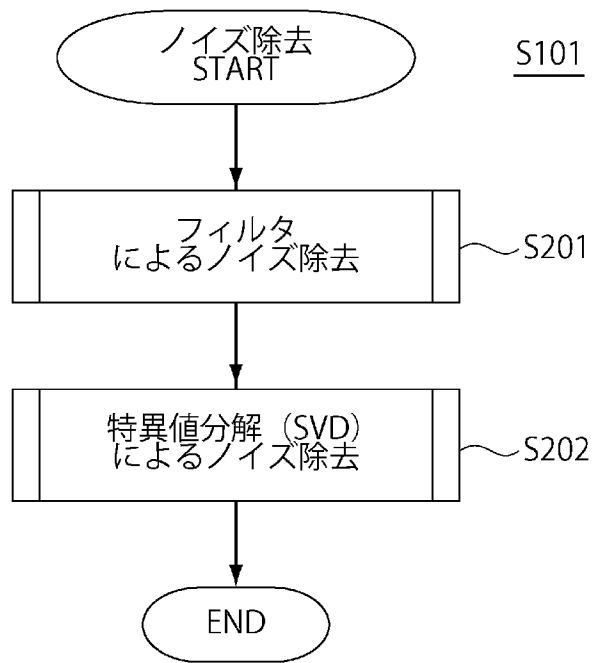
[図7]



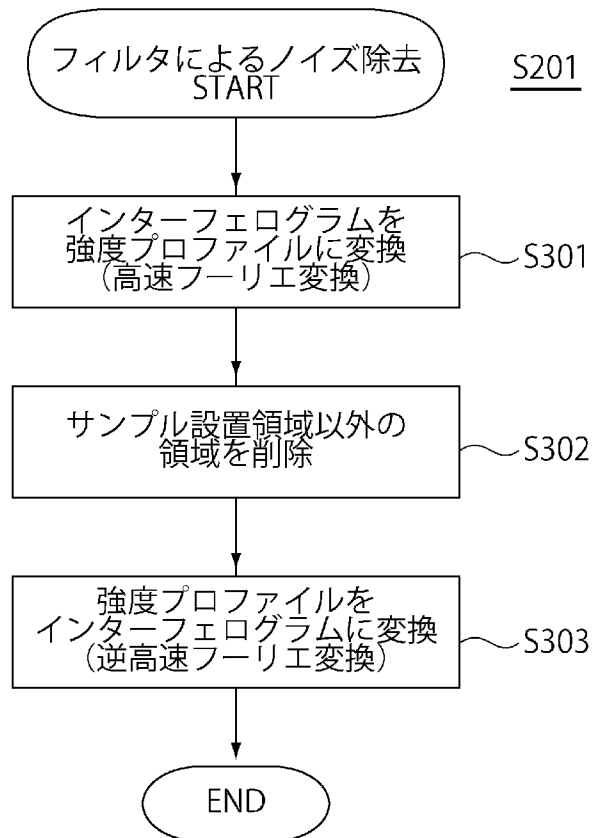
[図8]



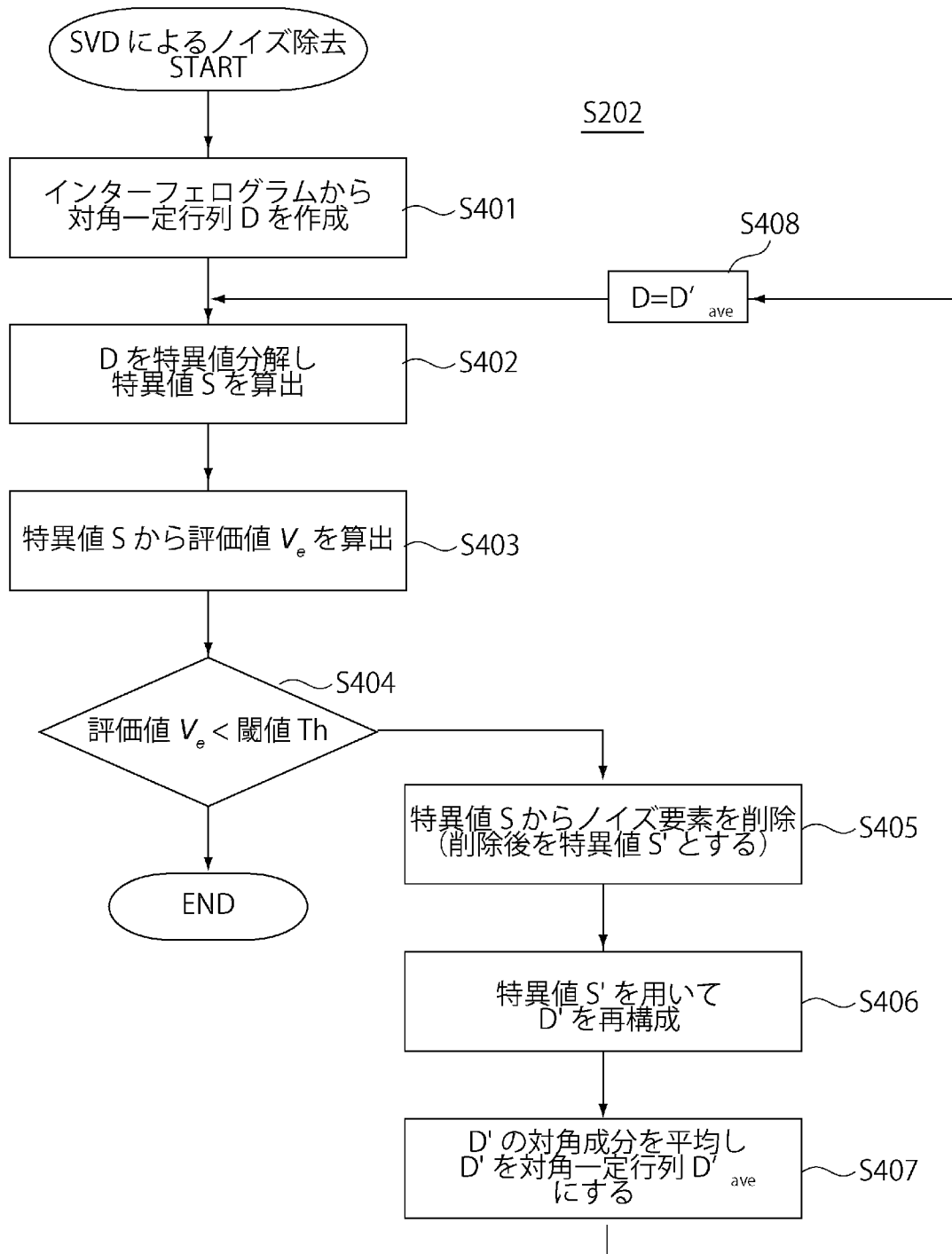
[図9]



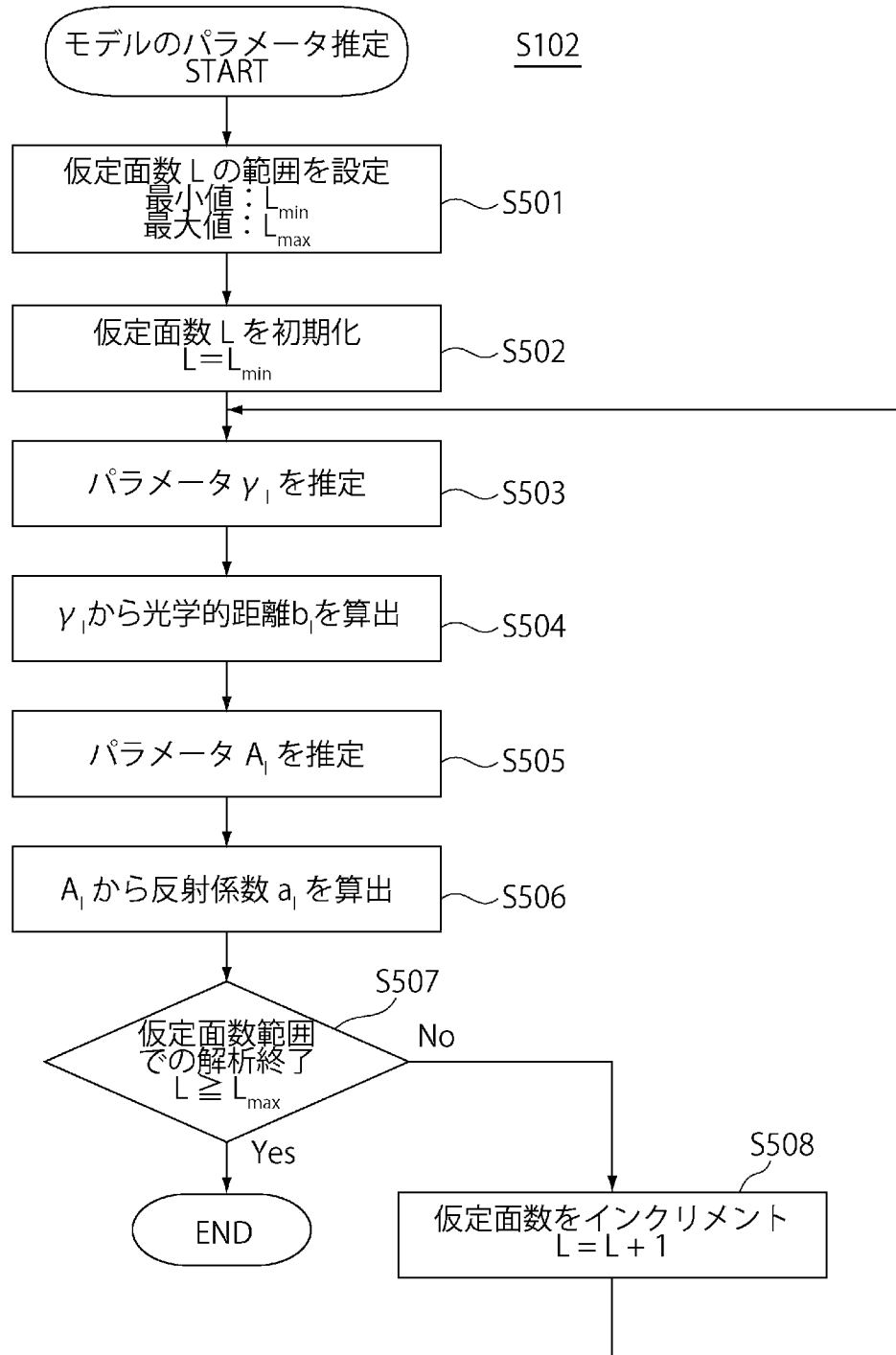
[図10]



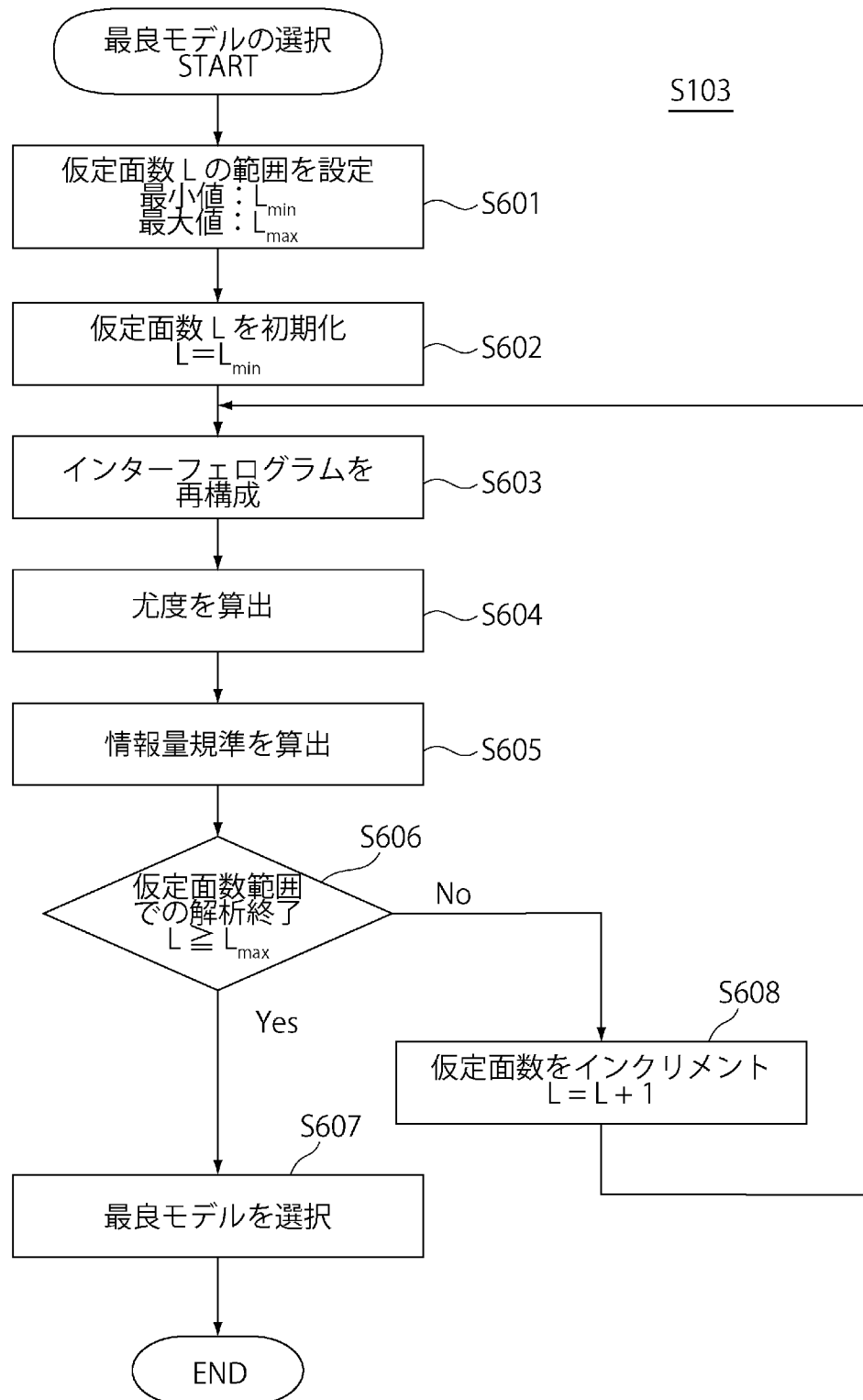
[図11]



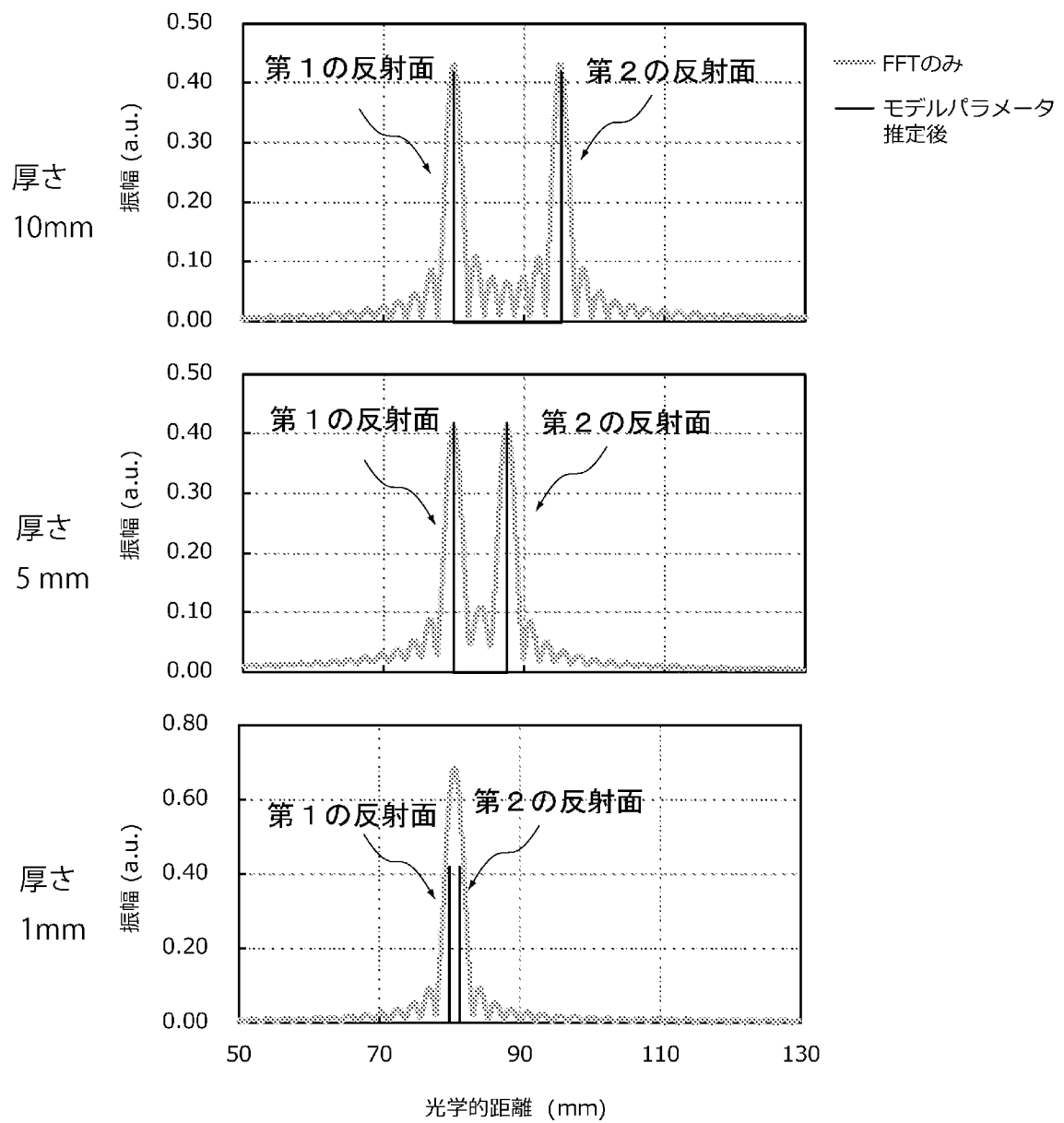
[図12]



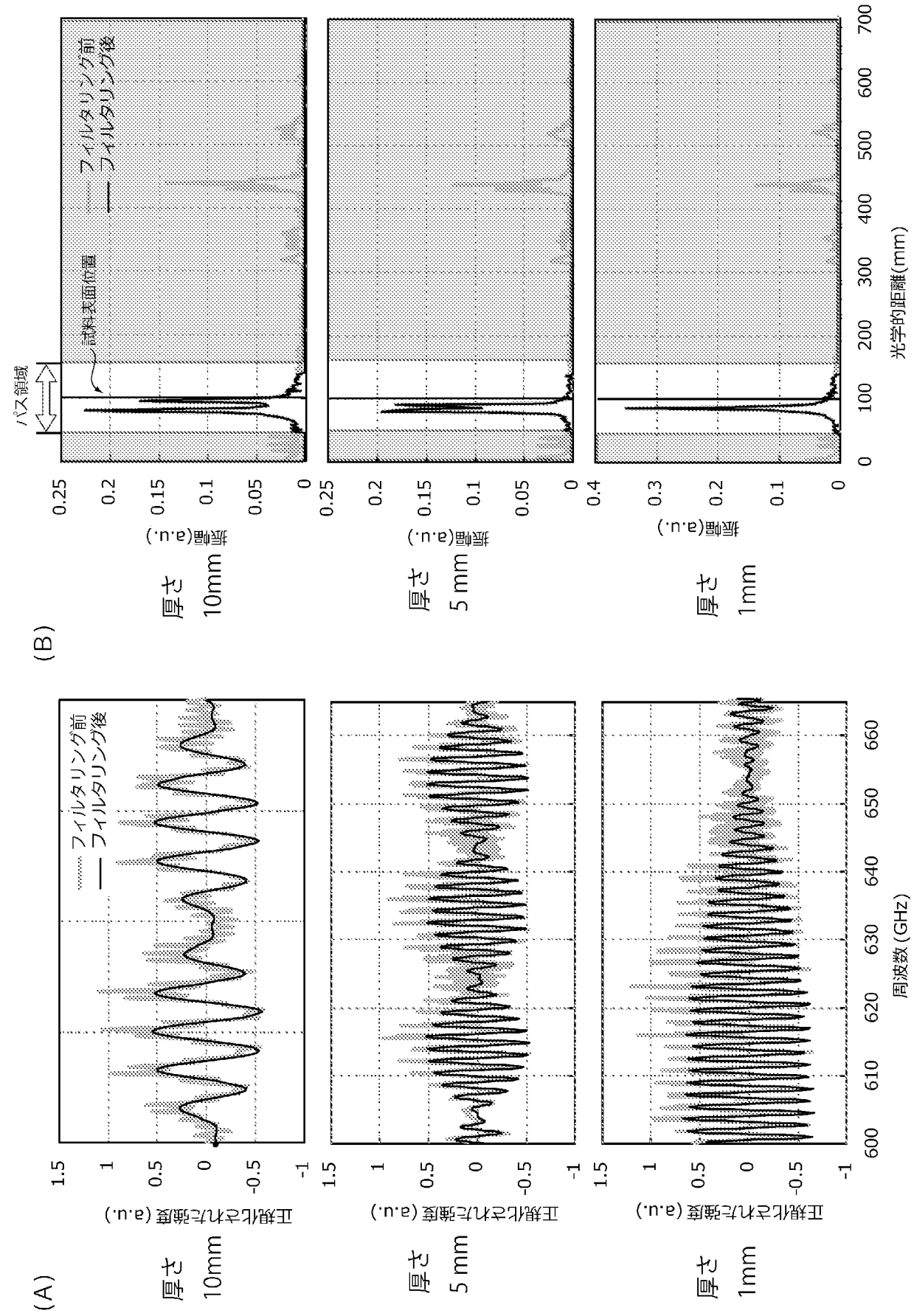
[図13]



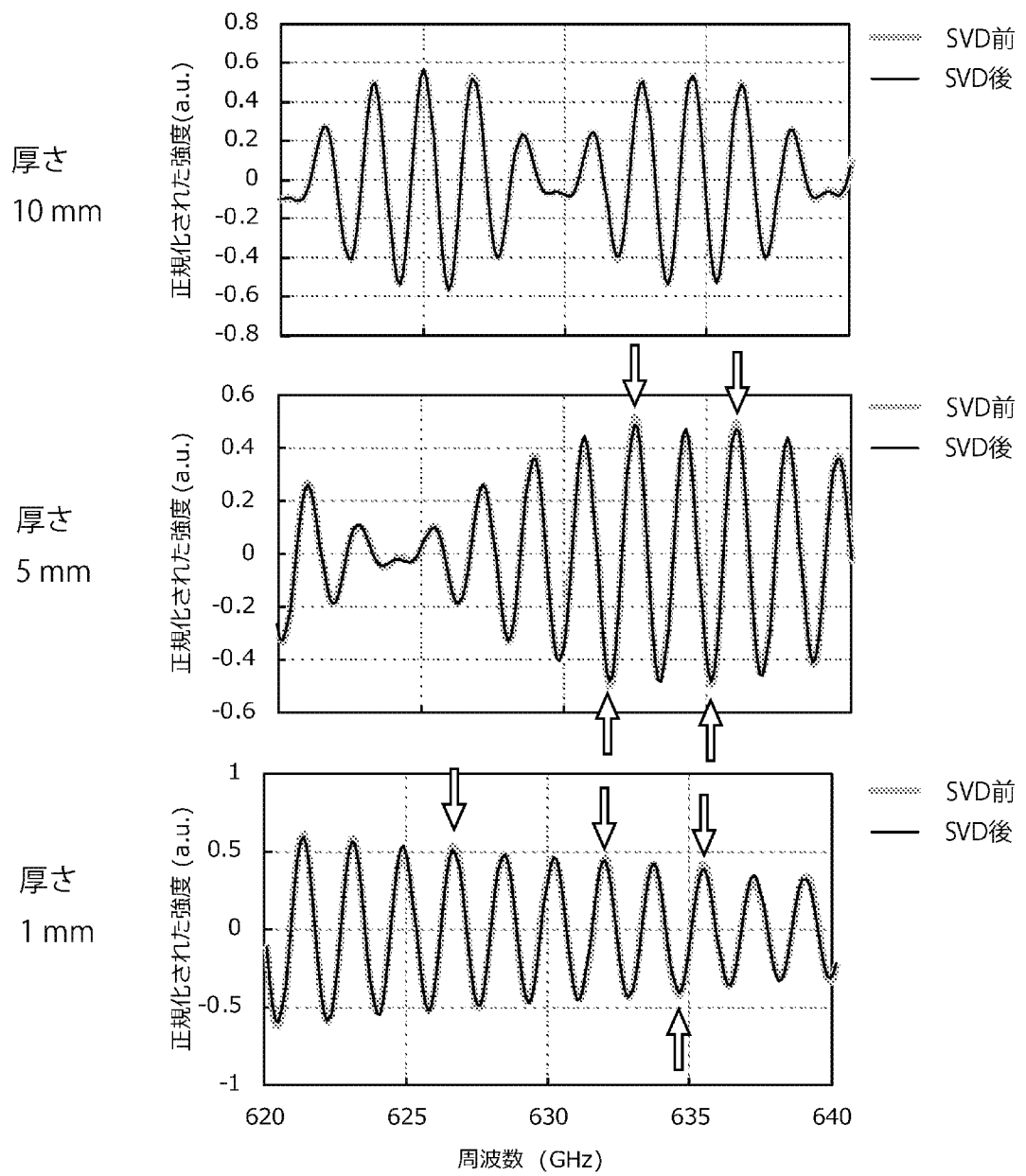
[図14]



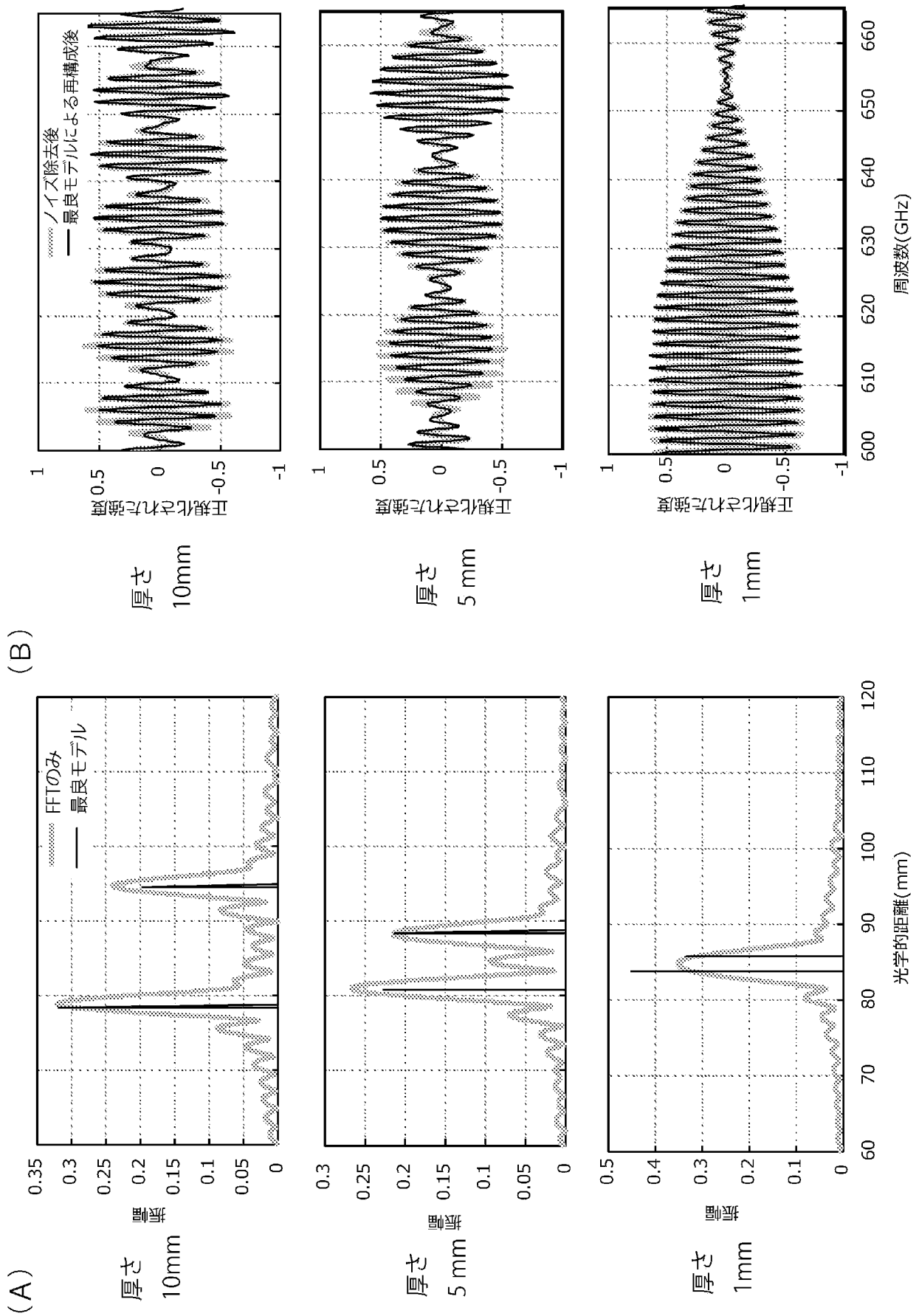
[図15]



[図16]

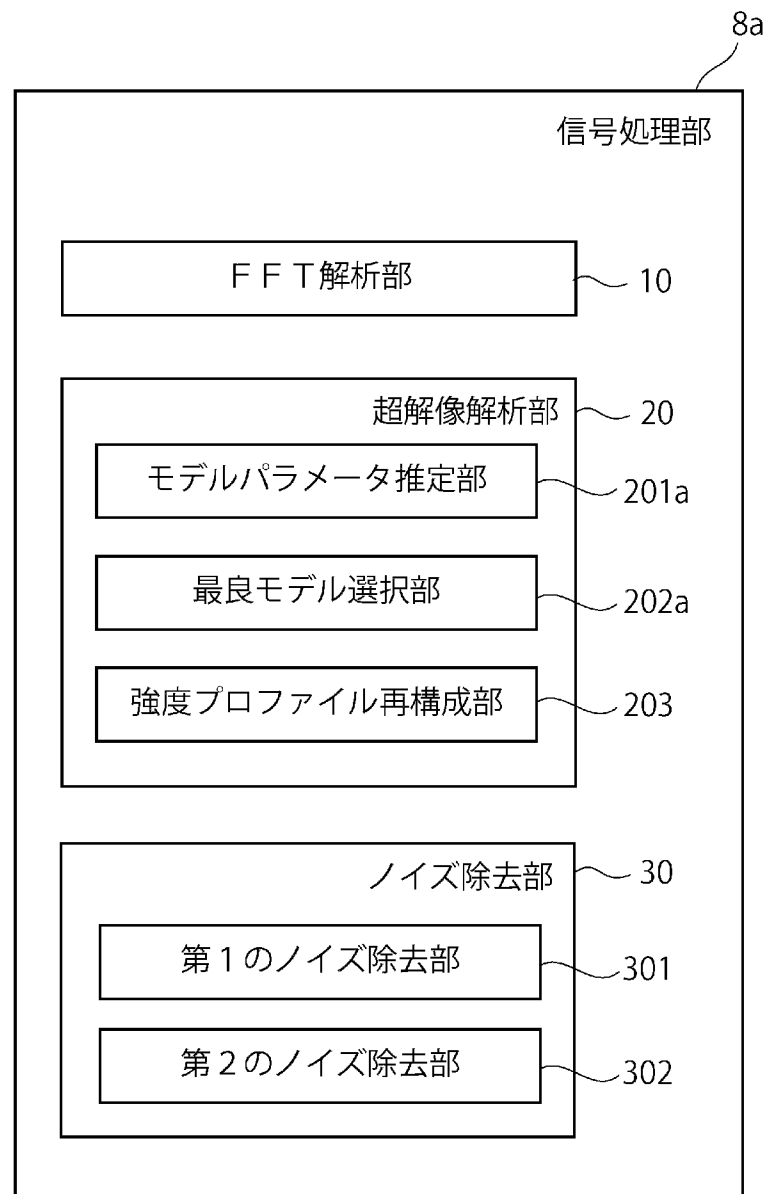


[図17]

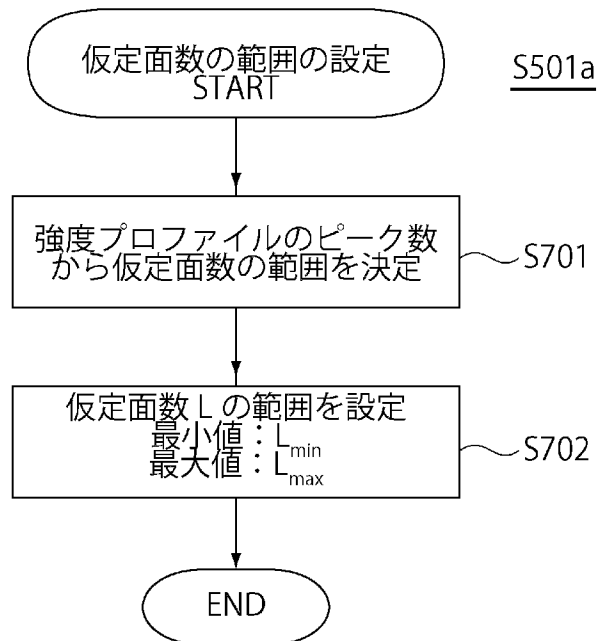


[図18]

1a



[図19]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2020/020582

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01B 9/02 (2006.01) i; G01N 21/17 (2006.01) i

FI: G01N21/17 620; G01B9/02

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

C01N21/00-21/01; C01N21/16-21/61; C01B9/02-9/029; C01B11/00-11/30;
A61B1/00; A61B3/10-3/125

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Published examined utility model applications of Japan	1922-1996
Published unexamined utility model applications of Japan	1971-2020
Registered utility model specifications of Japan	1996-2020
Published registered utility model applications of Japan	1994-2020

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2009-516181 A (CHEMOMETEC A/S) 16 April 2009 (2009-04-16), entire text, fig. 1-1 to 4-2	1-6
A	JP 2014-121614 A (CANON INC.) 03 July 2014 (2014-07-03), entire text, fig. 1-13B	1-6



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"I" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

10 August 2020 (10.08.2020)

Date of mailing of the international search report

25 August 2020 (25.08.2020)

Name and mailing address of the ISA/

Japan Patent Office
3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku,
Tokyo 100-8915, Japan

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/JP2020/020582

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
JP 2009-516181 A	16 Apr. 2009	US 2009/0024360 A1 WO 2007/057016 A1	
JP 2014-121614 A	03 Jul. 2014	US 2014/0177790 A1 EP 2746754 A2	

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC）） G01B 9/02(2006.01)i; G01N 21/17(2006.01)i FI: G01N21/17 620; G01B9/02														
B. 調査を行った分野 調査を行った最小限資料（国際特許分類（IPC）） G01N 21/00-21/01; G01N 21/16-21/61; G01B 9/02-9/029; G01B 11/00-11/30; A61B 1/00; A61B 3/10-3/125 最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの <table border="0"> <tr> <td>日本国実用新案公報</td> <td>1922 - 1996年</td> </tr> <tr> <td>日本国公開実用新案公報</td> <td>1971 - 2020年</td> </tr> <tr> <td>日本国実用新案登録公報</td> <td>1996 - 2020年</td> </tr> <tr> <td>日本国登録実用新案公報</td> <td>1994 - 2020年</td> </tr> </table> 国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）			日本国実用新案公報	1922 - 1996年	日本国公開実用新案公報	1971 - 2020年	日本国実用新案登録公報	1996 - 2020年	日本国登録実用新案公報	1994 - 2020年				
日本国実用新案公報	1922 - 1996年													
日本国公開実用新案公報	1971 - 2020年													
日本国実用新案登録公報	1996 - 2020年													
日本国登録実用新案公報	1994 - 2020年													
C. 関連すると認められる文献														
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号												
A	JP 2009-516181 A（シェモメテック・アクティーゼルスカブ）16.04.2009（2009 - 04 - 16） 全文，【図1 - 1】 - 【図4 - 2】	1 - 6												
A	JP 2014-121614 A（キャノン株式会社）03.07.2014（2014 - 07 - 03） 全文，【図1】 - 【図13B】	1 - 6												
☐ C欄の続きにも文献が列挙されている。 ☒ パテントファミリーに関する別紙を参照。														
<table border="0"> <tr> <td>* 引用文献のカテゴリー</td> <td>“T” 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と抵触するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの</td> </tr> <tr> <td>“A” 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの</td> <td>“X” 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの</td> </tr> <tr> <td>“E” 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの</td> <td>“Y” 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの</td> </tr> <tr> <td>“L” 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）</td> <td>“&” 同一パテントファミリー文献</td> </tr> <tr> <td>“O” 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献</td> <td></td> </tr> <tr> <td>“P” 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願の日の後に公表された文献</td> <td></td> </tr> </table>			* 引用文献のカテゴリー	“T” 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と抵触するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの	“A” 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの	“X” 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの	“E” 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの	“Y” 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの	“L” 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）	“&” 同一パテントファミリー文献	“O” 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献		“P” 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願の日の後に公表された文献	
* 引用文献のカテゴリー	“T” 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と抵触するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの													
“A” 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの	“X” 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの													
“E” 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの	“Y” 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの													
“L” 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）	“&” 同一パテントファミリー文献													
“O” 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献														
“P” 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願の日の後に公表された文献														
国際調査を完了した日 10.08.2020	国際調査報告の発送日 25.08.2020													
名称及びあて先 日本国特許庁(ISA/JP) 〒100-8915 日本国 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号	権限のある職員（特許庁審査官） 平田 佳規 2W 9807 電話番号 03-3581-1101 内線 3258													

国際調査報告
パテントファミリーに関する情報

国際出願番号

PCT/JP2020/020582

引用文献			公表日	パテントファミリー文献			公表日
JP	2009-516181	A	16.04.2009	US	2009/0024360	A1	
				WO	2007/057016	A1	
JP	2014-121614	A	03.07.2014	US	2014/0177790	A1	
				EP	2746754	A2	