



(10) 授权公告号 CN 113853507 B

(45) 授权公告日 2024. 08. 16

(21) 申请号 202080037306.8

(22) 申请日 2020.05.25

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 113853507 A

(43) 申请公布日 2021.12.28

(30) 优先权数据
2019-100828 2019.05.30 JP

(85) PCT国际申请进入国家阶段日
2021.11.18

(86) PCT国际申请的申请数据
PCT/JP2020/020586 2020.05.25

(87) PCT国际申请的公布数据
W02020/241584 JA 2020.12.03

(73) 专利权人 株式会社拓普康
地址 日本东京
专利权人 国立研究开发法人理化学研究所

(72) 发明人 榎山誉 佐佐木芳彰 吉峯功
大谷知行 汤浅哲也

(74) 专利代理机构 永新专利商标代理有限公司
72002

专利代理师 徐殿军

(51) Int.Cl.
G01B 9/02055 (2022.01)
G01N 21/45 (2006.01)

(56) 对比文件

Y. Xie et al..Reduction of periodic noise in Fourier domain optical coherence tomography images by frequency domain filtering.《Biomed Tech》.2012,第57卷第830-832页.

Chandra SekharSeelamantula et al..Super-Resolution Reconstruction in Frequency-Domain Optical-Coherence Tomography Using the Finite-Rate-of-Innovation Principle.《IEEE TRANSACTIONS ON SIGNAL PROCESSING》.2014,第62卷(第19期),第5020-5029页. (续)

审查员 魏可嘉

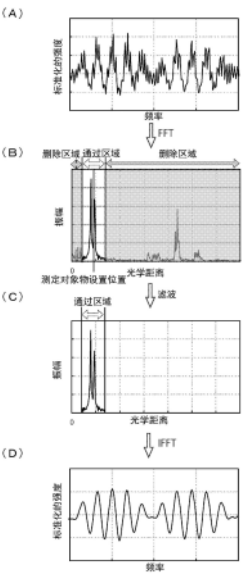
权利要求书1页 说明书16页 附图18页

(54) 发明名称

光干涉测定装置及光干涉测定方法

(57) 摘要

本发明使光干涉测定中的干涉图的噪声降低。光干涉测定装置(1)具有:测定部(2),向测定对象物及参照面照射电磁波,使来自测定对象物的反射面的反射波和来自所述参照面的反射波干涉,获取干涉波的干涉图;以及信号处理部(8),通过对干涉图进行傅里叶变换,构成深度方向的强度特性曲线,信号处理部(8)具有第一噪声去除部(301),通过从强度特性曲线中,将以测定对象物设置位置为基准的区域作为通过区域,将通过区域以外的区域的数据删除从而进行滤波,对滤波后的所述强度特性曲线进行傅里叶逆变换,由此重建为干涉图。



[接上页]

(56) 对比文件

Chandra SekharSeelamantula et al..Super-Resolution Reconstruction in Frequency-Domain Optical-Coherence

Tomography Using the Finite-Rate-of-Innovation Principle.《IEEE TRANSACTIONS ON SIGNAL PROCESSING》.2014,第62卷(第19期),第5020-5029页.

1. 一种光干涉测定装置,其特征在于,具有:

测定部,向测定对象物及参照面照射电磁波,使来自所述测定对象物的反射面的反射波和来自所述参照面的反射波干涉,获取干涉波的干涉图;以及

信号处理部,通过对所述干涉图进行傅里叶变换,构成深度方向的强度特性曲线,

所述信号处理部具有第一噪声去除部,所述第一噪声去除部对所述强度特性曲线施加窗函数,所述窗函数将所述测定对象物的深度方向的光学距离中的以测定对象物设置位置为基准的区域作为通过区域,将除此以外的区域作为删除区域,

所述第一噪声去除部通过将所述删除区域的数据删除而进行滤波,

所述第一噪声去除部对滤波后的所述强度特性曲线进行傅里叶逆变换,由此重建为干涉图。

2. 根据权利要求1所述的光干涉测定装置,其特征在于,

所述信号处理部具有第二噪声去除部,所述第二噪声去除部根据干涉图生成常对角矩阵D,对该常对角矩阵D进行奇异值分解并计算奇异值的对角矩阵S,从奇异值的对角矩阵中将噪声成分删除,使用删除了噪声成分的奇异值的对角矩阵重建干涉图。

3. 根据权利要求2所述的光干涉测定装置,其特征在于,

所述第二噪声去除部基于奇异值的对角矩阵的成分设定评估值,判断所述评估值是否小于规定的阈值,并反复进行奇异值的对角矩阵中的噪声成分的删除,一直到所述评估值小于规定阈值为止。

4. 根据权利要求1~3中任一项所述的光干涉测定装置,其特征在于,

所述信号处理部具有:

模型参数推定部,基于假设测定对象物是至少具有一个反射面的层状构造物的情况下的干涉图的模型式,对规定的假定面数的范围中的各假定面数推定所述模型式的参数;

最佳模型选择部,根据应用了对所述各假定面数推定出的参数的所述模型式,通过统计学方法选择最佳的模型式;以及

强度特性曲线重建部,基于所述最佳的模型式重建深度方向的强度特性曲线。

5. 根据权利要求1或2所述的光干涉测定装置,其特征在于,

通过将所述测定对象物的表面位置作为所述测定对象物设置位置,并将所述测定对象物设置位置作为基准指定其前后的规定的范围来设定所述通过区域。

6. 一种光干涉测定方法,其特征在于,包括以下步骤:

向测定对象物及参照面照射电磁波,使来自所述测定对象物的反射面的反射波和来自所述参照面的反射波干涉并获取干涉图;

对所述干涉图进行傅里叶变换,构成深度方向的强度特性曲线;

对所述强度特性曲线施加窗函数,所述窗函数将所述测定对象物的深度方向的光学距离中的以测定对象物设置位置为基准的区域作为通过区域,将除此以外的区域作为删除区域,通过将所述删除区域的数据删除而进行滤波;

对滤波后的所述强度特性曲线进行傅里叶逆变换,由此重建为干涉图。

光干涉测定装置及光干涉测定方法

技术领域

[0001] 本发明涉及光干涉测定装置及光干涉测定方法,更具体地说,涉及傅里叶域光干涉测定装置及傅里叶域光干涉测定方法。

背景技术

[0002] 以往,作为非接触、非侵入地以高分辨率图像化测定对象物的内部构造的技术,已知光学相干层析成像(OCT,Optical Coherence Tomography)。

[0003] 傅里叶域OCT(FD-OCT)测量是对光的每个频谱成分测定干涉光强度,对所得到的干涉信号(干涉图)进行高速傅里叶变换,由此获取深度方向的反射光的强度频谱的方法。作为进行FD-OCT测量的代表性的装置结构,可以举出谱域OCT(Spectral Domain-OCT)装置和SS-OCT(Swept source-OCT(扫频光源OCT))这两种。

[0004] 专利文献1公开了在干涉图的测定中,在检测器侧设置微弱信号检测用的锁定放大器,通过实施了同步的带通滤波器将噪声去除。

[0005] 现有技术文献

[0006] 专利文献

[0007] 专利文献1:国际公开第2015/001918号公报

发明内容

[0008] 发明要解决的课题

[0009] 然而,根据测定的灵敏度不同,存在仅上述的噪声去除还不充分的情况。

[0010] 本发明正是鉴于这种情况而提出的,其目的是,降低光干涉测定中的干涉图的噪声。

[0011] 用于解决课题的手段

[0012] 为了达到上述目的,有关本发明的第一方式的光干涉测定装置具有:测定部,向测定对象物及参照面照射电磁波,使来自所述测定对象物的反射面的反射波和来自所述参照面的反射波干涉,获取干涉波的干涉图;以及信号处理部,通过对所述干涉图进行傅里叶变换,构成深度方向的强度特性曲线,所述信号处理部具有第一噪声去除部,通过从所述强度特性曲线中,将以测定对象物设置位置为基准的区域作为通过区域,将通过区域以外的区域的数据删除,从而进行滤波,所述第一噪声去除部对滤波后的所述强度特性曲线进行傅里叶逆变换,由此重建为干涉图。

[0013] 在上述第一方式中,优选的是,所述信号处理部具有第二噪声去除部,该第二噪声去除部根据干涉图生成常对角矩阵D,对该常对角矩阵D进行奇异值分解并计算奇异值的对角矩阵S,从奇异值的对角矩阵中将噪声成分删除,使用删除了噪声成分的奇异值的对角矩阵重建干涉图。

[0014] 而且,有关本发明的第二方式的光干涉测定装置具有:测定部,向测定对象物及参照面照射电磁波,使来自所述测定对象物的反射面的反射波和来自所述参照面的反射波干

涉,获取干涉波的干涉图;以及信号处理部,通过对所述干涉图进行傅里叶变换,构成深度方向的强度特性曲线,所述信号处理部具有第二噪声去除部,该第二噪声去除部根据干涉图生成常对角矩阵,对该常对角矩阵进行奇异值分解并计算奇异值的对角矩阵,从奇异值的对角矩阵中将噪声成分删除,使用删除了噪声成分的奇异值的对角矩阵重建干涉图。

[0015] 而且,在上述第一及第二方式中,优选的是,所述第二噪声去除部基于奇异值的对角矩阵的成分设定评估值,判断所述评估值是否小于规定的阈值,并反复进行奇异值的对角矩阵中的噪声成分的删除,一直到所述评估值小于规定阈值为止。

[0016] 而且,在上述第一及第二方式中,优选的是,所述信号处理部具有:模型参数推定部,基于假设测定对象物是至少具有一个反射面的层状构造物的情况下的干涉图的模型式,对规定的假定面数的范围中的各假定面数推定所述模型式的参数;最佳模型选择部,根据应用了对所述各假定面数推定出的参数的所述模型式,通过统计学方法选择最佳的模型式;以及强度特性曲线重建部,基于所述最佳的模型式重建深度方向的强度特性曲线。

[0017] 而且,有关本发明的第三方式的光干涉测定分法包括以下步骤:向测定对象物及参照面照射电磁波,使来自所述测定对象物的反射面的反射波和来自所述参照面的反射波干涉并获取干涉图;对所述干涉图进行傅里叶变换,构成深度方向的强度特性曲线;通过从所述强度特性曲线中,将以测定对象物设置位置为基准的区域作为通过区域,将通过区域以外的区域的数据删除,从而进行滤波;对滤波后的所述强度特性曲线进行傅里叶逆变换,由此重建为干涉图。

[0018] 发明效果

[0019] 根据有关上述结构的光干涉测定装置或者光干涉测定方法,能够降低干涉图的噪声。

附图说明

[0020] 图1是表示有关本发明的实施方式的光干涉测定装置的概略结构的框图。

[0021] 图2是该光干涉测定装置的测定部的概略结构图。

[0022] 图3是表示通过该光干涉测定装置获得的干涉图的形状的图。

[0023] 图4是该光干涉测定装置的信号处理部的功能结构图。

[0024] 图5是说明层状构造物的构造的图。

[0025] 图6是说明第一噪声去除部的噪声去除的方法的图。

[0026] 图7是说明通过基于奇异值分解的噪声去除而去除的噪声的图。

[0027] 图8是使用了该光干涉测定装置的光干涉测定方法的处理的流程图。

[0028] 图9是该光干涉测定方法中的噪声去除的处理的流程图。

[0029] 图10是该噪声去除中基于滤波器的噪声去除的处理的流程图。

[0030] 图11是该噪声去除中基于奇异值分解的噪声去除的处理的流程图。

[0031] 图12是该光干涉测定方法中的模型参数的推定的处理的流程图。

[0032] 图13是该方法中的最佳模型选择的处理的流程图。

[0033] 图14是使用了根据该方法推定出的模型参数的强度特性曲线重建的模拟结果。

[0034] 图15是表示该方法中的基于滤波器的噪声去除的结果的图。

[0035] 图16是表示使用了基于上述滤波器的噪声去除后的干涉图的基于奇异值分解的

噪声去除的结果的图。

[0036] 图17是表示使用基于上述奇异值分解的噪声去除后的干涉图进行最佳模型的选择的结果的图。

[0037] 图18是有关本实施方式的光干涉测定装置的一个变形例的信号处理部的功能结构图。

[0038] 图19是该信号处理部对假定面数的范围的设定的流程图。

具体实施方式

[0039] 下面,参照附图对本发明的优选的实施方式进行说明,但本发明不限于此。并且,在下面的实施方式的说明中,对相同的构成要素标注相同的标号,对同样的构成要素标注相同的名称并适当省略重复说明。

[0040] [实施方式]

[0041] 1. 光干涉测定装置的整体结构

[0042] 图1是表示有关本发明的实施方式的光干涉测定装置1的概略结构的框图。光干涉测定装置1是SS-OCT,例如是用于混凝土构造物等的内部构造的检查的装置。

[0043] 如图1所示,光干涉测定装置1具有测定部2、控制处理部3、操作部4、显示部5及存储部6。

[0044] 图2是表示测定部2的概略结构的图。

[0045] 测定部2主要具有光源21、光束分离器22、用于设置测定对象物的自动载物台23、参照面24及检测器25。

[0046] 光源21是可变频扫描光源,一边在规定的波长带内以固定的周期扫描波长,一边射出电磁波束。作为光源21,能够采用使用了作为半导体物质的耿氏二极管、肖特基势垒二极管(SBD, Shottkey Barrier Diode)的振荡源、基于以波长可变半导体激光器(LD)作为种光而使用了非线性结晶的频率变换的振荡源等。或者,作为光源21,也可以使用隧穿渡越时间(TUNNET)二极管或共鸣隧道二极管(RTD)、MMIC(Monolithic Microwave IC, 单片微波IC)的振荡源。

[0047] 光束分离器22例如是分光比为50:50的光束分离器。光束分离器22将来自光源21的光束B分割成测定光 B_1 和参照光 B_2 。

[0048] 自动载物台23保持测定对象物,并设定测定面。测定面是测定对象物的表面。测定对象物的表面构成为能够沿假设与测定光 B_1 的光轴垂直的平面为XY平面时的X轴Y轴这两轴方向移动。自动载物台23通过后述的测定控制部进行驱动控制。

[0049] 参照面24是反射镜,将参照光 B_2 反射。

[0050] 检测器25例如是附有波导管和天线的肖特基势垒二极管,检测后述的参照光 B_2 的反射光与测定光 B_1 的反射光的干涉信号。

[0051] 光源21根据来自测定控制部7的控制使振荡器的频率变化。在检测器25连接有微弱电流检测用的锁定放大器31,函数产生器29对光源21进行On-Off调制,对检测器25侧的锁定放大器31提供参照信号。

[0052] 从光源21射出的光经由准直透镜26a射入光束分离器22,被分割成测定光 B_1 和参照光 B_2 。参照光 B_2 被准直透镜26b准直并朝向参照面24行进,在参照面24反射,然后经由光束

分离器22向检测器25前进。另一方面,测定光 B_1 通过准直透镜26c对光束的形状进行整形,向测定对象物前进并在测定对象物的反射面进行了反射的光,再次朝向光束分离器22射入,经由准直透镜26d而朝向检测器25前进。

[0053] 另外,在本说明书中,测定对象物的“反射面”包括测定对象物的表面及内部反射面。因此,第一反射面是指测定对象物的表面。

[0054] 根据SS-OCT的原理,在扫描光源21的频率时,生成与来自测定对象物的测定光 B_1 的光路长度和参照光 B_2 的光路长度之差对应的干涉图案(干涉图)。干涉图案通过检测器25检测。检测信号通过DAQ系统(数据收集系统)32采样及数字化,并作为图像数据进行输出。该图像数据是指图3所示的干涉图。

[0055] 返回到图2,控制处理部3可以参照任意的电路(或者其一部分),电路例如包含任意个数的包括电阻器、晶体管、电容器、电感器等的电气部件。该电路例如可以是包含集成电路、集成电路的集合、微控制器、微处理器、印刷基板(PCB)上的各个电气部件的集合等的任意形式。控制处理部3可以装入光干涉测定装置1的框体内,也可以独立,另外还可以是独立的个人电脑的一部分。

[0056] 控制处理部3作为功能部而具有控制测定部2的测定的测定控制部7、对在测定部2获取的信号进行处理的信号处理部8、及输出部9。包括下面说明的更加详细的功能部在内,各功能部的功能可以通过电路来实现,还可以通过执行程序来实现。并且,在用程序实现的情况下,程序可以存储在磁盘、软盘、光盘、CD、蓝牙(注册商标)光盘、DVD等存储介质。

[0057] 测定控制部7对光源21的频率进行调制。并且,测定控制部7控制自动载物台23的驱动。信号处理部8进行根据干涉图构成强度特性曲线用的处理。关于信号处理部8的详细情况在后面进行说明。输出部9将在信号处理部8生成的强度特性曲线显示于显示部5,并存储至存储部6。

[0058] 操作部4是用户向光干涉测定装置1输入指示用的装置,例如包括鼠标、触摸垫、键盘、操作面板、控制杆、按钮、开关等。

[0059] 显示部5例如是液晶显示器,显示通过信号处理部8生成的强度特性曲线和其他信息。

[0060] 2. 信号处理部的详细结构

[0061] 下面,参照图4对信号处理部8进行详细说明。信号处理部8具有FFT分析部10、超分辨率分析部20和噪声去除部30。

[0062] FFT分析部10通过对干涉图进行快速傅里叶变换,从而重建为深度方向的强度特性曲线(下面,也简称为“强度特性曲线”)。该方法是公知的方法,所以省略说明。

[0063] 超分辨率分析部20具有模型参数推定部201、最佳模型选择部202及强度特性曲线重建部203。

[0064] 模型参数推定部201将在光干涉测定装置1测定出的干涉图模型化,推定该模型式的参数。

[0065] 具体地说,假设如图5所示的假想的层状构造物M,各层内的折射率 n_1 固定,具有至少是一的反射面数L,没有衰减和分散。

[0066] 测定层状构造物M得到的干涉图 $I(\kappa)$ 在设来自参照面侧的电场为 $E_r(\kappa)$ 、来自测定对象物侧的电场为 $E_s(\kappa)$ 时描述如下。另外,这里“反射面”是层状构造物M与空气的分界面

或者相邻层的分界面,是对测定光进行反射或者内表面反射的面,即层状构造物M的表面是第一反射面。

[0067] [数式1]

$$I(k) = |E_r(k) + E_s(k)|^2$$

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

[0069] 其中, $|A_0(k)|^2$ 表示光源的强度, $a_l = \frac{n_{l+1}-n_l}{n_{l+1}+n_l}$ 表示各层间的反射系数(菲涅尔反射), $b_l = [\sum_{p=1}^l (z_p - z_{p-1})n_p]$ 表示从参照面到各层为止的光路长度差(下面称为“光学距离”), z 表示到各层为止的距离、 $l=1, 2, 3, \dots, L$ 表示截止到L的反射面序号、 $p=1, 2, 3, \dots, l$ 表示截止到l的反射面序号。

[0070] 用光源的强度 $|A_0(k)|^2$ 将该干涉图 $I(k)$ 标准化,假设不存在样品内的多重反射,则能够以以下方式近似。

[0071] [数式2]

$$D_k = \frac{I(k)}{|A_0(k)|^2} - 1$$

$$= \left| \sum_{l=1}^L a_l e^{i2\pi k b_l} \right|^2$$

$$= \sum_{l=1}^L (a_l e^{i2\pi b_l k} + a_l^* e^{-i2\pi b_l k}) + \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^L a_l a_m^* e^{-i2\pi (b_m - b_l)k}$$

$$D_k \sim \sum_{l=1}^L (a_l e^{i2\pi b_l k_{\min}} e^{i2\pi b_l \Delta k \kappa} + a_l^* e^{-i2\pi b_l k_{\min}} e^{-i2\pi b_l \Delta k \kappa}) \quad (2)$$

[0073] 其中, k_{\min} 表示最小波数, Δk 表示波数间隔, $\kappa=0, 1, 2, 3, \dots, K-1$ 表示波数序号。

[0074] 并且,如果在式(2)中

[0075] [数式3]

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

[0077] 则作为模型式,能够简化如下。

[0078] [数式4]

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

[0080] 这样,模型式(3)具有 L, A_l, γ_l 这三个参数。

[0081] 在模型式(3)的基础上,假定反射面数L,按照下面的方式推定其他的参数 A_l, γ_l 。下面,将假定的反射面数称为“假定面数”。

[0082] 首先,假设滤波器 p_j 的 z 变换为

[0083] [数式5]

[0084]
$$P(x) = \prod_{l=1}^L (x^{-1} - \gamma_l^{-1}) (x^{-1} - \gamma_l^{*-1}) = \sum_{j=0}^{2L} p_j x^{-j} \quad (4)$$

[0085] 则标准化后的干涉图与滤波器的卷积为

[0086] [数式6]

[0087]
$$\sum_{j=0}^{2L} p_j D_{K-j} = 0, \quad \kappa = 2L, 2L+1, 2L+2, \dots, K-1 \quad (5)$$

[0088] 如果将其改写为矩阵,则表现为

[0089] [数式7]

[0090]
$$\begin{pmatrix} D_{2L} & D_{2L-1} & D_{2L-2} & & D_2 & D_1 & D_0 \\ D_{2L+1} & D_{2L} & D_{2L-1} & \dots & D_3 & D_2 & D_1 \\ D_{2L+2} & D_{2L+1} & D_{2L} & & D_4 & D_3 & D_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ D_{K-2} & D_{K-3} & D_{K-4} & \dots & D_{K-2L} & D_{K-1-2L} & D_{K-2-2L} \\ D_{K-1} & D_{K-2} & D_{K-3} & \dots & D_{K+1-2L} & D_{K-2L} & D_{K-1-2L} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_{2L-1} \\ p_{2L} \end{pmatrix} = \mathbf{0} \quad (6)$$

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

[0091] 此时,D的数据数量需要满足 $K \geq 2L+1$ 。但是,实际的测定数据即 D_K 的数据集

[0092] [数式8]

[0093] $\tilde{\mathbf{D}}$

[0094] 包含噪声,所以通过求解下面的优化问题来求出 p 。

[0095] [数式9]

[0096]
$$\arg \min_p \|\tilde{\mathbf{D}}\mathbf{p}\|^2 \quad (8)$$

[0097] 其中, p 是 p_j 的数据集。

[0098] 然而,此时由于存在 $p=0$ 这样的零解,所以需要赋予不会成为这样的解的限制条件。如果将式(6)展开则成为

[0099] [数式10]

[0100]
$$\begin{aligned} P(x) &= \prod_{l=1}^L (x^{-1} - \gamma_l^{-1}) (x^{-1} - \gamma_l^{*-1}) \\ &= \sum_{j=0}^{2L} p_j x^{-j} \\ &= p_{2L} x^{-2L} + p_{2L-1} x^{-2L-1} + \dots + p_1 x^{-1} + p_0 x^0 \end{aligned} \quad (9)$$

[0101] 因此,赋予

[0102] [数式11]

[0103] subject to $p_{2L} = p_0 = 1 \quad (10)$

[0104] 这个限制条件,求解式(8)的优化问题。将所得到的 p 代入多项式(9)并求解,由此得到 γ_1 和 γ_1^* 。

[0105] 另外,如果将式(3)改写为矩阵则表现为

[0106] [数式12]

$$[0107] \quad \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & & 1 & 1 \\ \gamma_1^1 & \gamma_1^{*1} & \gamma_2^1 & \gamma_2^{*1} & & \gamma_L^1 & \gamma_L^{*1} \\ \gamma_1^2 & \gamma_1^{*2} & \gamma_2^2 & \gamma_2^{*2} & \cdots & \gamma_L^2 & \gamma_L^{*2} \\ \gamma_1^3 & \gamma_1^{*3} & \gamma_2^3 & \gamma_2^{*3} & & \gamma_L^3 & \gamma_L^{*3} \\ & \vdots & & & \ddots & & \vdots \\ \gamma_1^{(K-2)} & \gamma_1^{*(K-2)} & \gamma_2^{(K-2)} & \gamma_2^{*(K-2)} & & \gamma_L^{(K-2)} & \gamma_L^{*(K-2)} \\ \gamma_1^{(K-1)} & \gamma_1^{*(K-1)} & \gamma_2^{(K-1)} & \gamma_2^{*(K-1)} & \cdots & \gamma_L^{(K-1)} & \gamma_L^{*(K-1)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1^* \\ A_2^* \\ \vdots \\ A_L^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_0 \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ \vdots \\ D_{K-2} \\ D_{K-1} \end{pmatrix} \quad (11)$$

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

[0108] 然而,与先前一样,实际的测定数据

[0109] [数式13]

[0110] $\tilde{\mathbf{d}}$

[0111] 包含噪声,所以通过求解下面的优化问题 (或者Moore-Penrose广义逆矩阵),由此求得

[0112] [数式14]

[0113] $\tilde{\mathbf{a}}$, 即 A_1 (的集)。

[0114] [数式15]

$$[0115] \quad \tilde{\mathbf{a}} = \arg \min_{\mathbf{a}} \|\mathbf{Ga} - \tilde{\mathbf{d}}\|_{p=2}^2 = (\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \tilde{\mathbf{d}} \quad (13)$$

[0116] 其中, $(\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T$ 是 \mathbf{G} 的广义逆矩阵。

[0117] 这样,模型参数推定部201推定假定面数 L 的情况下的参数 A_1 及 γ_1 。

[0118] 另外,模型参数推定部201根据推定出的参数 A_1 及 γ_1 ,计算测定对象反射系数 a_1 及光学距离 b_1 。

[0119] 首先,获取所得到的 A_1 的绝对值,由此求出 a_1 。

[0120] [数式16]

$$[0121] \quad a_l = |A_l| = |a_l e^{i2\pi b_l k_{\min}}| \quad (14)$$

[0122] 并且,使用式(15),从 γ_1 得到 b_1 。

[0123] [数式17]

$$[0124] \quad b_l = \frac{\varphi}{2\pi \Delta k} \quad (15)$$

[0125] 其中, φ 是复数 γ_1 的辐角。

[0126] 这样,能够获得假定面数 L 时的强度特性曲线 a_1 、 b_1 。

[0127] 但是,在实际的测量中,在想要应用上述模型式(3)的情况下,测定对象物的反射面数 L 是不明的。因此,预先决定假定面数 L 的范围,对该范围的各假定面数求出上述的模型参数 A_1 、 γ_1 及强度特性曲线 a_1 、 b_1 。

[0128] 假定面数 L 的范围的决定例如可以根据测定对象物的构造特性来进行。具体地,能够预想隧道壁面等混凝土制的构造物在构造上反射面数为一定的范围 (例如1~10的范围等)。因此,光干涉测定装置1可以构成为能够在测定或者运算之前,由用户预先在装置输入或者设定测定对象物的假定面数 L 的范围 (L 的最小值 L_{\min} 及 L 的最大值 L_{\max})。

[0129] 模型参数推定部201对指定的假定面数 L 的范围 (例如1, 2, ..., 10) 的各假定面数 L ,进行上述模型参数 A_1 、 γ_1 的推定及强度特性曲线 a_1 、 b_1 的运算。

[0130] 强度特性曲线重建部203根据由模型参数推定部201得到的式(15)、式(16)重建强

度特性曲线 a_1 、 b_1 。

[0131] 最佳模型选择部202计算将由模型参数推定部201推定出的各反射面数各自的参数 A_1 、 γ_1 代入模型式(3)而重建出的重建干涉图、与通过测定获得的测定干涉图的似然度。最佳模型选择部202将假定面数 L 作为自由度,根据该自由度和所计算出的似然度,应用信息量准则选择最佳的模型即构成最佳模型的假定面数 L 。

[0132] 另外,作为应用的信息量准则没有特别限定,能够应用赤池信息量准则(AIC)、有限修正AIC(AICc)、贝叶斯信息量准则(BIC)等。关于似然度的计算以及对信息量准则的应用能够使用公知的方法。

[0133] 噪声去除部30具有第一噪声去除部301和第二噪声去除部302。

[0134] 首先,在光干涉测定装置1的测定中,所获取的干涉图在理论上示出图3所示的形状。但是,在实际的测定中如图6的(A)所示包含噪声。噪声有由在测定系统内的多重反射等导致的周期性的噪声和随机性的高斯白噪声。第一噪声去除部301将周期性的噪声去除,第二噪声去除部302将高斯白噪声去除。

[0135] 对第一噪声去除部301进行说明。FFT分析部10通过快速傅里叶变换(FFT)将干涉图变换为强度特性曲线。如果通过快速傅里叶变换将如图6的(A)那样包含噪声的干涉图变换为强度特性曲线,则如图6的(B)所示可知,在将测定对象物的表面设为测定对象物设置位置时,在测定对象物设置位置附近的区域以外也能观察到峰值。这些是周期性的噪声成分。

[0136] 因此,第一噪声去除部301进行滤波,对强度特性曲线施加窗函数,将窗函数的删除区域的数据删除,该窗函数将测定对象物的深度方向的光学距离中的以测定对象物设置位置为基准而设定的区域作为通过区域,将除此以外的区域作为删除区域。图6的(C)表示使用矩形窗进行了滤波处理的强度特性曲线。

[0137] 通过区域可以如图示的那样,通过将测定对象物的表面位置作为测定对象物设置位置,将测定对象物设置位置作为基准,指定其前后的规定的范围而设定。例如在测定对象物的厚度是10mm、测定对象物的表面位置(测定对象物设置位置)是100mm的情况下,能够设定为测定对象物设置位置的前后50mm、即50mm~150mm的范围。这样,第一噪声去除部301如一种带通滤波器那样发挥作用。

[0138] 或者,也可以将测定对象物的中央位置作为测定对象物设置位置,将测定对象物设置位置作为基准,在前后将对测定对象物的厚度的一半加上规定的余量的范围设定为通过区域,并将其他部分作为删除区域。

[0139] 而且,作为窗函数不限于如图示那样的矩形窗,还能够使用高斯窗、汉宁窗、汉明窗等在滤波处理中使用的各种各样的窗函数。

[0140] 然后,第一噪声去除部301将删除了删除区域的数据的强度特性曲线通过快速傅里叶逆变换(IFFT)变换为图6的(D)那样的干涉图。

[0141] 这样,能够从干涉图有效地删除周期性的噪声。

[0142] 对第二噪声去除部302进行说明。

[0143] 图7是说明通过第二噪声去除部302去除的高斯白噪声的图。在图中,黑线表示理论上的干涉图,灰线表示包含高斯白噪声的干涉图。虽然理论上的干涉图和包含噪声的干涉图大致重合,但是理论上的干涉图的峰值的包络呈平滑的波形而具有相连的形状,而包

含高斯白噪声的干涉图的包络则存在如箭头所示随机地突出的部分,包络并非平滑地相连。第二噪声去除部302如下所述将这样的噪声删除。

[0144] (a) 第二噪声去除部302根据干涉图与式(8)同样地以矩阵表示测定数据

[0145] [数式18]

[0146] $\tilde{\mathbf{D}}$

[0147] 生成要素数为 $(K-2L-1) \times (2L+1)$ 的一定对角矩阵

[0148] [数式19]

$$[0149] \quad \begin{pmatrix} D_{2L} & D_{2L-1} & D_{2L-2} & \dots & D_2 & D_1 & D_0 \\ D_{2L+1} & D_{2L} & D_{2L-1} & \dots & D_3 & D_2 & D_1 \\ D_{2L+2} & D_{2L+1} & D_{2L} & \dots & D_4 & D_3 & D_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ D_{K-2} & D_{K-3} & D_{K-4} & \dots & D_{K-2L} & D_{K-1-2L} & D_{K-2-2L} \\ D_{K-1} & D_{K-2} & D_{K-3} & \dots & D_{K+1-2L} & D_{K-2L} & D_{K-1-2L} \end{pmatrix} \quad (16)$$

[0150] (b) 第二噪声去除部302对矩阵

[0151] [数式20]

[0152] $\tilde{\mathbf{D}}$

[0153] 按照式(17)进行奇异值分解(SVD, Singular Value Decomposition)。

[0154] [数式21]

$$[0155] \quad \tilde{\mathbf{D}} = \mathbf{U} \mathbf{S} \mathbf{V}^T \quad (17)$$

[0156] (其中, \mathbf{U} 表示要素数为 $(K-2L-1) \times (2L+1)$ 的西矩阵(复数, $\mathbf{U}\mathbf{U}^* = \mathbf{U}^*\mathbf{U} = \mathbf{I}$), \mathbf{S} 表示要素数为 $(2L+1) \times (2L+1)$ 的对角矩阵, \mathbf{V} 表示要素数为 $(2L+1) \times (2L+1)$ 的西矩阵。)

[0157] (c) 然后, 第二噪声去除部302按照式(18)求出奇异值的对角矩阵 \mathbf{S} 。

[0158] [数式22]

$$[0159] \quad \mathbf{S} = \begin{pmatrix} \sigma_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \sigma_{2L+1} \end{pmatrix} \quad (18)$$

[0160] (其中, 奇异值 σ_n 是 $\tilde{\mathbf{D}}\tilde{\mathbf{D}}^T$ 的特征值的平方根。)

[0161] (d) 然后, 第二噪声去除部302根据奇异值的对角矩阵 \mathbf{S} 计算出评估值 V_e 。关于评估值 V_e , 例如可以将对角矩阵 \mathbf{S} 的第 $(2L+1)$ 个要素的值 σ_{2L+1} 视为噪声成分, 将第 $2L$ 个要素的值 σ_{2L} 视为信号成分, 根据式(19)进行设定。

[0162] [数式23]

$$[0163] \quad V_e = \frac{\sigma_{2L+1}}{\sigma_{2L}} \quad (19)$$

[0164] (e) 然后, 第二噪声去除部302从所求出的奇异值的对角矩阵 \mathbf{S} 中, 作为噪声要素至少将最小的奇异值 σ_{2L+1} 删除, 根据式(20)构建对角矩阵 \mathbf{S}' 。

[0165] [数式24]

$$[0166] \quad \mathbf{S}' = \begin{pmatrix} \sigma_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 \end{pmatrix} \quad (20)$$

[0167] 另外, 不必仅删除最小的奇异值, 也可以将认为不需要的成分的奇异值全部删除。

[0168] (f) 而且, 根据计算出的对角矩阵 \mathbf{S}' , 按照式(21)重建干涉图

[0169] [数式25]

[0170] $\tilde{\mathbf{D}}'$

[0171] [数式26]

[0172] $\mathbf{US}'\mathbf{V}^T = \tilde{\mathbf{D}}' \quad (21)$

[0173] 其中, $\tilde{\mathbf{D}}'$ 表示针对 $\tilde{\mathbf{D}}$ 的最小二乘近似,即, $\tilde{\mathbf{D}} - \tilde{\mathbf{D}}'$ 的各要素的平方误差成为最小。

[0174] 去除了噪声的

[0175] [数式27]

[0176] $\tilde{\mathbf{D}}'$

[0177] 不一定成为常对角矩阵。因此,

[0178] 使用沿着 $\tilde{\mathbf{D}}'$ 的对角的平均值,重建为常对角矩阵

[0179] [数式28]

[0180] $\tilde{\mathbf{D}}'_{ave}$

[0181] (g) 使用所重建的常对角矩阵

[0182] [数式29]

[0183] $\tilde{\mathbf{D}}'_{ave}$

[0184] 反复进行 (b) ~ (f) 的动作一直到评估值 V_e 小于规定的阈值 Th 为止。而且,将评估值 V_e 小于规定的阈值 Th 的干涉图

[0185] [数式30]

[0186] $\tilde{\mathbf{D}}'_{ave}$

[0187] 重建为噪声去除后的干涉图。

[0188] 对于第一噪声成分的去除和基于奇异值分解的第二噪声成分的去除,例如在认为第一噪声成分的影响大、第二噪声成分的影响小的情况下,仅进行第一噪声成分的去除,在认为第二噪声成分的影响大、第一噪声成分的影响小的情况下,仅进行第二噪声成分的去除,仅进行一个即可。

[0189] 另外,在进行第一噪声成分的去除和第二噪声成分的去除的两者的情况下,其顺序不作特别限定,但优选的是,在认为第一噪声成分的影响大、第二噪声成分的影响小的情况下,先进行第一噪声成分的去除,在认为第二噪声成分的影响大、第一噪声成分的影响小的情况下,先进行第二噪声成分的去除。

[0190] 3. 光干涉测定方法

[0191] 下面,参照图8~图13对使用了光干涉测定装置1的光干涉测定方法进行说明。另外,在下面的各步骤中,所求得参数、干涉图、强度特性曲线等根据需要存储在存储部,在后续的步骤中读取,省略说明。

[0192] 图8是该光干涉测定方法的处理的概略流程图。首先,如果开始处理,则在步骤S101中,噪声去除部30将测定干涉图的噪声去除。然后,在步骤S102中,模型参数推定部201使用去除了噪声的干涉图推定模型的参数。然后,在步骤S103中,最佳模型选择部202选择最佳模型。然后,步骤S104中,强度特性曲线重建部203重建深度方向的强度特性曲线。下面,说明各步骤的具体处理。

[0193] 图9是有关步骤S101的噪声去除的详细的处理的流程图。

[0194] 如果噪声去除开始,则在步骤S201中,第一噪声去除部301通过滤波器进行噪声的去除,在步骤S202中,第二噪声去除部302通过奇异值分解(SVD)进行噪声的去除。然后,处理进入步骤S102。

[0195] 图10是步骤S201的由滤波器进行的噪声去除的详细的流程图。

[0196] 如果由滤波器进行的噪声去除开始,则在步骤S301中,FFT分析部10通过快速傅里叶变换将测定干涉图变换为强度特性曲线。

[0197] 然后,在步骤S302中,第一噪声去除部301将强度特性曲线中以测定对象物设置位置为基准的区域作为通过区域,将除此以外的区域作为删除区域,进行将删除区域的数据删除的滤波。

[0198] 然后,在步骤S303中,第一噪声去除部301通过快速傅里叶逆变换,将在步骤S302中得到的滤波后的强度特性曲线变换为干涉图,并结束处理。然后,处理进入步骤S202。

[0199] 图11是步骤S202的基于奇异值分解的噪声去除的详细的处理的流程图。

[0200] 如果开始基于奇异值分解的噪声的去除,则在步骤S401中,第二噪声去除部302根据干涉图生成常对角矩阵D。

[0201] 然后,在步骤S402中,第二噪声去除部302对矩阵D进行奇异值分解,计算奇异值的对角矩阵S(式(18))。

[0202] 然后,在步骤S403中,第二噪声去除部302根据奇异值S计算评估值 V_e (式(19))。

[0203] 然后,在步骤S404中,第二噪声去除部302比较评估值 V_e 和规定的阈值 Th ,判断评估值 V_e 是否小于阈值 Th 。

[0204] 在评估值 V_e 为阈值 Th 以上的情况下(“否”),在步骤S405中,第二噪声去除部302从奇异值的矩阵S中将噪声要素删除,计算奇异值 S' (式(20))。

[0205] 然后,在步骤S406中,使用奇异值 S' 重建干涉图的矩阵

[0206] [数式31]

[0207] \tilde{D}'

[0208] 然后,在步骤S407中,将矩阵

[0209] [数式32]

[0210] \tilde{D}'

[0211] 的对角成分平均化,作为常对角矩阵

[0212] [数式33]

[0213] \tilde{D}'_{ave}

[0214] 在步骤S408中,设为

[0215] [数式34]

[0216] $\tilde{D} = \tilde{D}'_{ave}$

[0217] 返回到步骤S402,反复进行步骤S402~S404。

[0218] 另一方面,在步骤S404中,在评估值 V_e 小于阈值 Th 的情况下(“是”),将干涉图D作为噪声去除后的干涉图,并结束处理,处理进入步骤S102。

[0219] 或者,也可以替代设定阈值并反复进行噪声成分的删除一直到评估值满足阈值为

止,而预先设定反复的次数,反复进行一直到满足该次数为止。

[0220] 图12是有关步骤S102的模型的参数的推定的详细的流程图。如果模型的参数的设定开始,则在步骤S501中,模型参数推定部201根据用户的输入等,设定假定面数L的范围(即最小值 L_{\min} 及最大值 L_{\max})。

[0221] 然后,在步骤S502中,模型参数推定部201设假定面数L为 $L=L_{\min}$ 而进行初始化。

[0222] 然后,在步骤S503中,模型参数推定部201在假定面数 L_{\min} 之下,通过上述式(4)~(12)的计算,计算模型式(3)的参数 γ_1 。

[0223] 然后,在步骤S504中,模型参数推定部201使用式(16),根据在步骤S503中求得的参数 γ_1 计算光学距离 b_1 。

[0224] 然后,在步骤S505中,模型参数推定部201通过式(12)~(14)的计算,根据干涉图和参数 γ_1 计算参数 A_1 。

[0225] 然后,在步骤S506中,模型参数推定部201使用式(15)根据参数 A_1 计算反射系数 a_1 。

[0226] 然后,在步骤S507中,模型参数推定部201判定假定面数L是否为 L_{\max} 以上,即,判定在步骤S501中设定的假定面数L的范围中的各假定面数L的分析是否全部结束。

[0227] 在L为 L_{\max} 以上的情况下(“是”),处理结束并进入步骤S104。在L小于 L_{\max} 的情况下(“否”),在步骤S508中,模型参数推定部201使假定面数L增加,设为 $L=L+1$,并返回到步骤S501,反复进行步骤S501~S507一直到假定面数L达到 L_{\max} 以上为止。

[0228] 图13是有关步骤S103的最佳模型的选择的详细的流程图。

[0229] 如果处理开始,则最佳模型选择部202设定在步骤S501中设定的假定面数L的范围(即,最小值 L_{\min} 及最大值 L_{\max})。

[0230] 然后,在步骤S602中,最佳模型选择部202设假定面数L为 $L=L_{\min}$,进行初始化。

[0231] 然后,在步骤S603中,对于最佳模型选择部202,模型参数推定部201使用在假定面数 $L=L_{\min}$ 时所推定的参数 A_1 、 γ_1 重建干涉图。

[0232] 然后,在步骤S604中,最佳模型选择部202计算在步骤S101中去除了噪声的测定干涉图、与步骤S603的重建干涉图的似然度。

[0233] 然后,在步骤S605中,最佳模型选择部202设假定面数L为自由度,使用在步骤S604中求得的似然度,计算假定面数L的信息量准则。

[0234] 然后,在步骤S606中,最佳模型选择部202判定假定面数L是否为 L_{\max} 以上,即,判定在步骤S501中设定的假定面数L的范围中的所有的假定面数L的分析是否结束。

[0235] 在L为 L_{\max} 以上的情况下(“是”),在步骤S607中,最佳模型选择部202比较所有的假定面数L的信息量准则的值,选择信息量准则的值最小的假定面数L的模型作为最佳的模型,并结束处理。

[0236] 另一方面,在步骤S606中L小于 L_{\max} 的情况下(“否”的情况),在步骤S608中,最佳模型选择部202使假定面数L增加,设为 $L=L+1$,并返回到步骤S603,反复进行步骤S603~S606一直到假定面数L达到 L_{\max} 以上为止。

[0237] 这样,选择出的最佳模型所涉及的假定面数在步骤S104中提供给由强度特性曲线重建部203进行的强度特性曲线的重建。

[0238] 这样,重建出的强度特性曲线不仅用于分析深度方向的强度特性曲线,而且还能够用于通过对扫描X-Y这两个轴而测定出的干涉图进行求解来构成三维画像。

[0239] 4. 实施例

[0240] 4-1 实施例1: 基于模型参数的推定的模拟结果

[0241] 图14是模拟使用光干涉测定装置1对光源21以600~665GHz进行了频率调制时的强度特性曲线所得的结果。测定对象物设定为使其表面(第一反射面)的光学距离成为80mm。上层、中层、下层的曲线图分别表示试样具有表1所示的构造、并在折射率固定为1.53的情况下的结果。

[0242] [表1]

[0243] 表1 实施例1的模拟条件

图 14	试样构造	
	反射面数	厚度 (mm)
上层	2	10
中层	2	5
下层	2	1

[0245] 在图中,黑线表示在本实施方式中设假定面数 $L=2$ 、根据模型式(3)推定模型参数 γ_1 、 A_1 、根据推定出的模型参数 γ_1 、 A_1 而重建的强度特性曲线 a_1 、 b_1 。另外,灰色线表示作为比较的、仅通过快速傅里叶变换将相同的干涉图变换为强度特性曲线的结果。

[0246] 灰色线均表现为宽的峰值,黑色线表现为尖的峰值。基于快速傅里叶变换的强度特性曲线在厚度10mm的情况下分离成第一面的峰值和第二面的峰值,而在厚度5mm的情况下峰值重合,在厚度1mm的情况下完全不分离。另一方面,在根据本实施方式的模型参数的推定而重建的强度特性曲线中,无论是哪种厚度都分离成第一面和第二面的峰值。

[0247] 由此可知,通过使用模型式(3)进行模型参数的推定,根据推定出的模型参数重建强度特性曲线,能够以比基于通常的傅里叶变换的方法高的分辨率测量深度方向的强度特性曲线。

[0248] 4-2 实施例2: 实测实验

[0249] (1) 由滤波器进行的噪声去除

[0250] 接下来,进行了使用光干涉测定装置1的实测实验。作为测定对象物(试样),使用了具有表2所示构造的、折射率固定的塑料制的平板。将测定对象物设置成使其表面(第一反射面)的光学距离成为80mm,在600~665GHz的范围中对光源进行了频率调制,由此进行测定。图15是使用实测出的干涉图进行了S201的由滤波器进行的噪声去除的结果。上层、中层、下层的曲线图分别表示在表2所示条件下的实验结果。而且,将通过区域设定为以试样表面的位置(80mm)为基准-34mm~+57mm(即,光学距离为46~137mm)。

[0251] [表2]

[0252] 表2 实测实验条件

图 15~17	试样构造
---------	------

[0254]

	反射面数	厚度 (mm)	材质
上层	2	10	聚乙烯
中层	2	5	聚乙烯
下层	2	1	聚苯乙烯

[0255] 并且,在图15的(A)中,灰色线表示滤波前的干涉图,对其进行快速傅里叶变换得到的强度特性曲线是图15的(B)的灰色线。而且,图15的(B)的黑色线表示滤波后的强度特性曲线,对其进行快速傅里叶逆变换得到的干涉图是图15的(A)的黑色线。

[0256] 如图15的(B)所示可知,无论是哪种厚度的试样,通过将试样表面的位置即试样设置位置作为基准来设定通过区域并进行滤波,从而可靠地删除了并非因试样而引起的噪声。而且,根据对滤波后的强度特性曲线进行快速傅里叶逆变换得到的干涉图可知,删除了周期性的噪声。

[0257] 这样,通过对干涉图进行傅里叶变换从而构成强度特性曲线,在强度特性曲线中,将试样设置位置作为基准来设定通过区域,将通过区域以外的区域的数据删除,由此对强度特性曲线进行滤波,通过对滤波后的强度特性曲线进行傅里叶逆变换,能够从干涉图中将周期性的噪声去除。

[0258] (2) 基于奇异值分解(SVD)的噪声去除

[0259] 图16表示使用基于上述滤波器的噪声去除后的干涉图通过奇异值分解进行了噪声去除的结果。

[0260] 在图16中,灰色线表示基于奇异值分解的噪声去除前的干涉图,黑色线表示基于奇异值分解的噪声去除后的干涉图。可知无论是哪种厚度,噪声去除后的干涉图去除了在噪声去除前从包络凸出的部分,包络平滑地相连,特别是在箭头示出的部分尤为显著。

[0261] 这样,根据干涉图生成常对角矩阵,对该常对角矩阵进行奇异值分解并计算奇异值的对角矩阵,根据奇异值的对角矩阵将噪声成分删除,由此能够根据干涉图将随机性的高斯白噪声去除。

[0262] (3) 基于最佳模型的强度特性曲线的重建

[0263] 然后,使用上述实测实验中的进行了基于奇异值分解的噪声去除后的干涉图,设假定面数L的范围为1~10,进行了各假定面数中的模型参数的推定。而且,使用该模型参数重建各假定面数的干涉图,计算噪声去除后的干涉图与重建干涉图的似然度,设假定面数为自由度,求解各假定面数的AIC值,选择AIC值最小的模型作为最佳模型。AIC值最小的假定面数L在厚度为10mm、5mm、1mm的情况下分别是7、7、6。

[0264] 图17的(A)表示强度特性曲线,灰色线表示对基于上述奇异值分解的噪声去除后的干涉图进行傅里叶变换得到的强度特性曲线,黑色线表示根据所选择的最佳模型而重建的强度特性曲线。

[0265] 另外,图17的(B)表示干涉图,灰色线表示基于上述奇异值分解的噪声去除后的干涉图,黑色线表示根据最佳模型而重建的干涉图。

[0266] 根据图17的(A)可知,无论是哪种厚度,根据最佳模型而重建的强度特性曲线都能够以比通过傅里叶变换而生成的强度特性曲线高的分辨率进行观察,即使是在厚度1mm时,

也能够分离出第一反射面和第二反射面的峰值。

[0267] 然后,根据图17的(B)可知,无论是哪种厚度,根据最佳模型而重建的干涉图都能够大致再现输入数据即去除噪声后的干涉图。

[0268] 这样,使用应用了对各假定面数推定出的参数的模型式而重建干涉图,计算所重建的干涉图与原来的干涉图的似然度,基于设假定面数为自由度而得到的信息量准则选择最佳的模型式,由此能够使用最佳的模型式重建强度特性曲线,其结果是,能够以比基于通常的傅里叶变换的方法高的分辨率测量深度方向的强度特性曲线。

[0269] 另外,在上述实施例中都示出了对反射面数L为2的试样进行模拟及实测实验的结果,但在反射面数L为1及3以上的情况下,也能够得到同等的结果。

[0270] 如上所述,有关本实施方式的光干涉测定方法包括去除噪声的噪声去除方法,和推定模型参数并选择最佳模型、根据最佳模型重建强度特性曲线的超分辨率分析法。而且,噪声去除方法包括基于滤波器的噪声去除方法、和基于奇异值分解的噪声去除方法。但是,如根据上述实验的结果所表明的那样,这些方法都能独立地发挥效果,以噪声去除为目的时可以仅进行噪声去除,或者以分辨率的提高为目的时可以仅执行超分辨率分析法。如果结合噪声去除方法和超分辨率分析法而实施,则分辨率显著提高而有利。

[0271] 5. 变形方式

[0272] 作为本实施方式的一个变形,也可以构成为自动设定步骤S501及步骤S601。图18是有关该变形方式的光干涉测定装置1a的信号处理部8a的功能结构图。光干涉测定装置1a具有与光干涉测定装置1大致相同的结构,而信号处理部8a具有模型参数推定部201a及最佳模型选择部202a来分别替代模型参数推定部201及最佳模型选择部202,这一点不同。

[0273] 模型参数推定部201a在模型参数的推定中,替代步骤S501,进行图19所示的处理。即,如果开始假定面数L的范围的设定,则在步骤S701中,模型参数推定部201a(例如在步骤S301等中)参照通过由FFT分析部10进行的对干涉图的傅里叶变换而得到的强度特性曲线,根据峰值数决定假定面数。具体地讲,在确认到如图14中灰色线所示出的那样的两个峰值的情况下,设定为峰值数 2 ± 5 的范围(其中,假定面数L为自然数),将假定面数L的范围决定为1~7。

[0274] 然后,在步骤S702中,根据上述决定设定假定面数L的范围(即最小值 L_{\min} 、最大值 L_{\max}),结束处理并进入步骤S502。

[0275] 对于最佳模型选择部202a也是一样的。

[0276] 这样的结构能够自动设定适当的假定面数L的范围,所以测定作业容易进行。

[0277] 另外,本发明不限于上述的实施方式,也可以包括各种各样的变更。而且,上述实施方式的说明为了本发明的更好的理解而进行了详细说明,本发明并不限于具有所说明的所有的结构。例如,在上述说明中对光干涉测定装置是SS-OCT的情况进行了叙述,但不限于此,本发明还能够应用于通过傅里叶变换获得深度方向的强度特性曲线的SD-OCT等光干涉测定装置。并且,还能够对各实施例的结构的一部分进行其他结构的追加、删除、替换。

[0278] 标号的说明

[0279] 1、1a 光干涉测定装置

[0280] 8、8a 信号处理部

[0281] 20 超分辨率分析部

- [0282] 201、201a 模型参数推定部
- [0283] 202、202a 最佳模型选择部
- [0284] 203 强度特性曲线重建部
- [0285] 30 噪声去除部
- [0286] 301 第一噪声去除部
- [0287] 302 第二噪声去除部

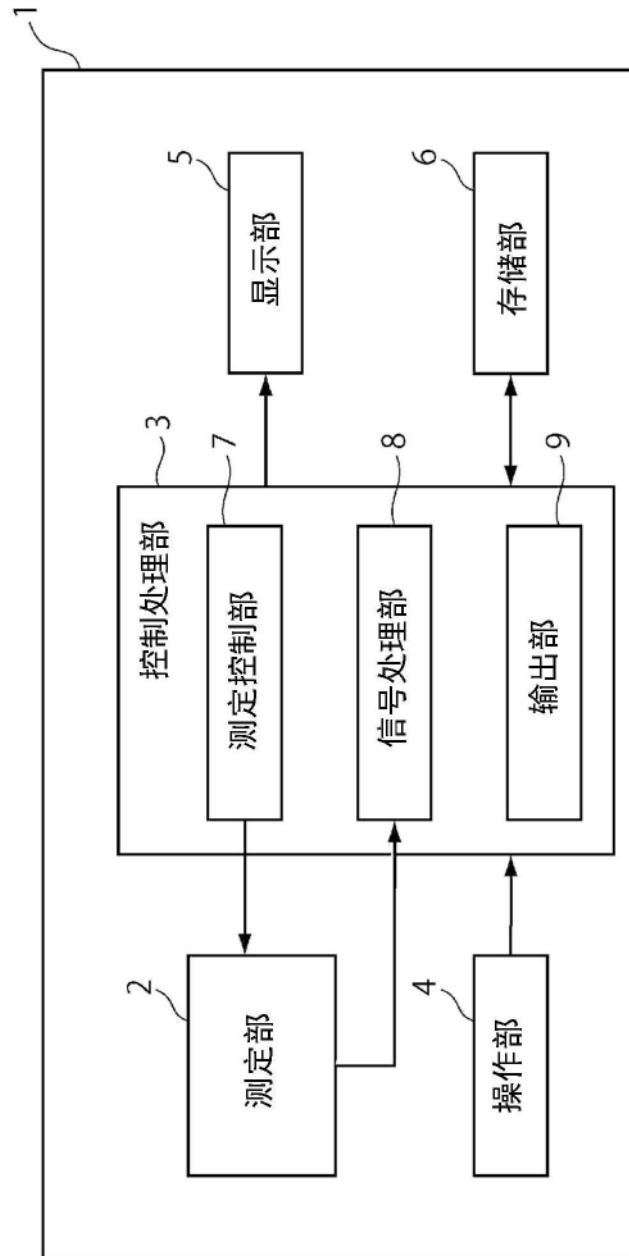


图1

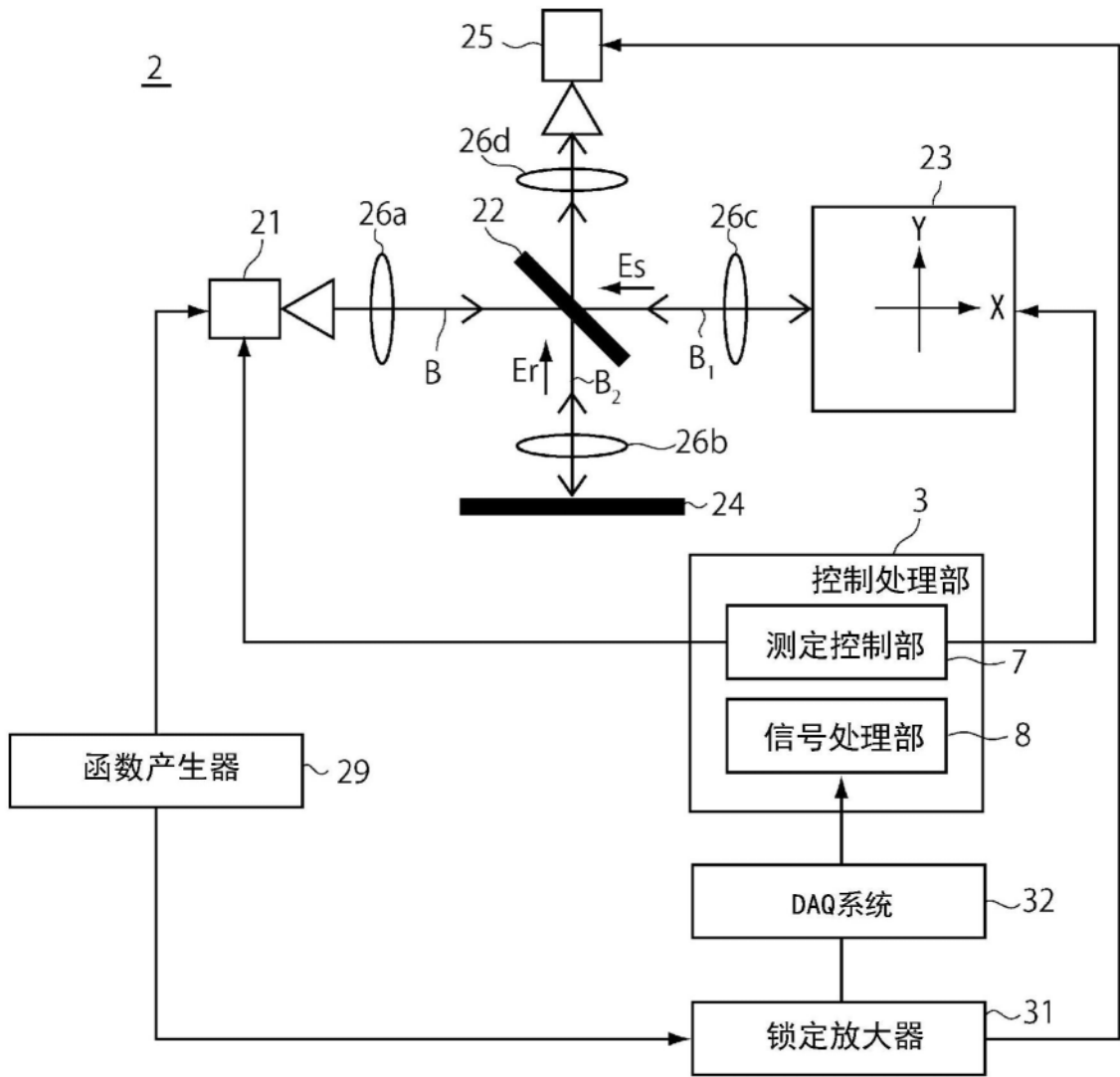


图2

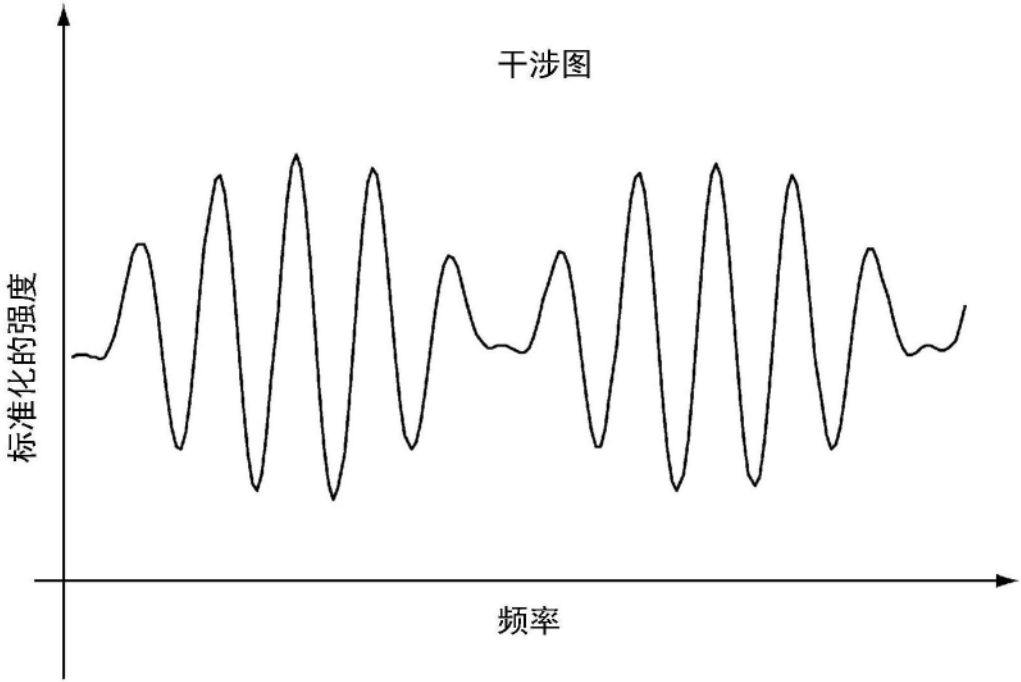


图3

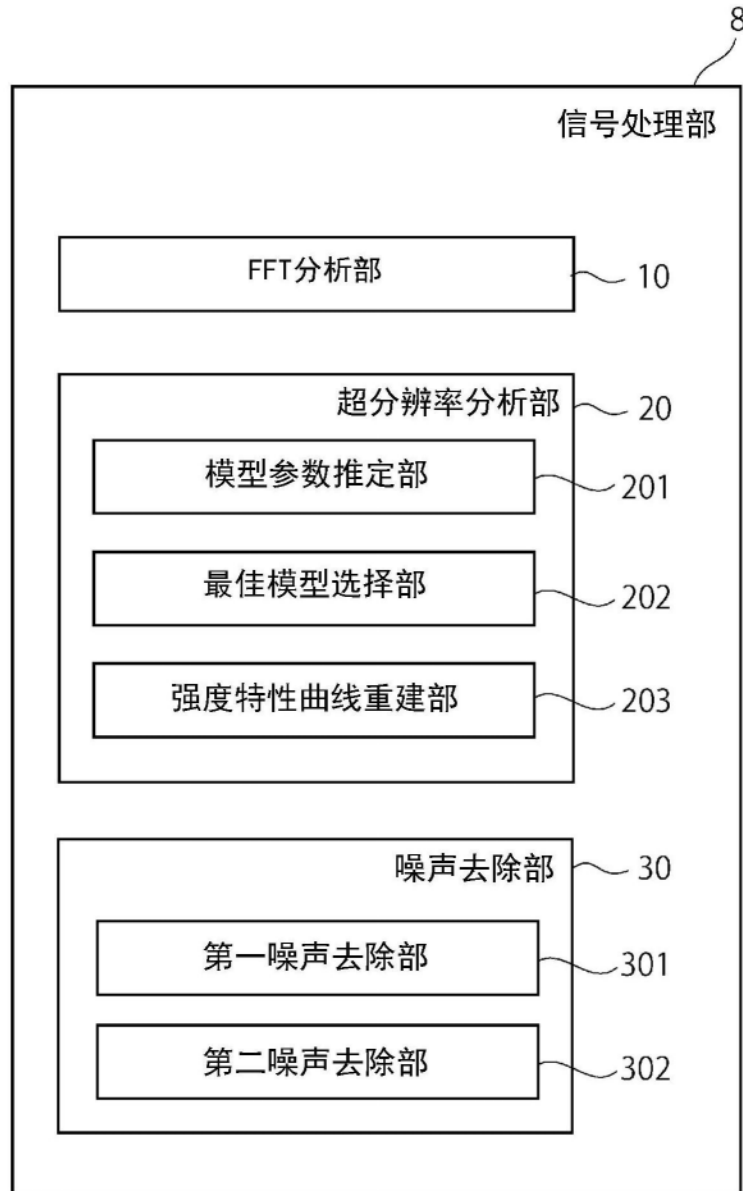
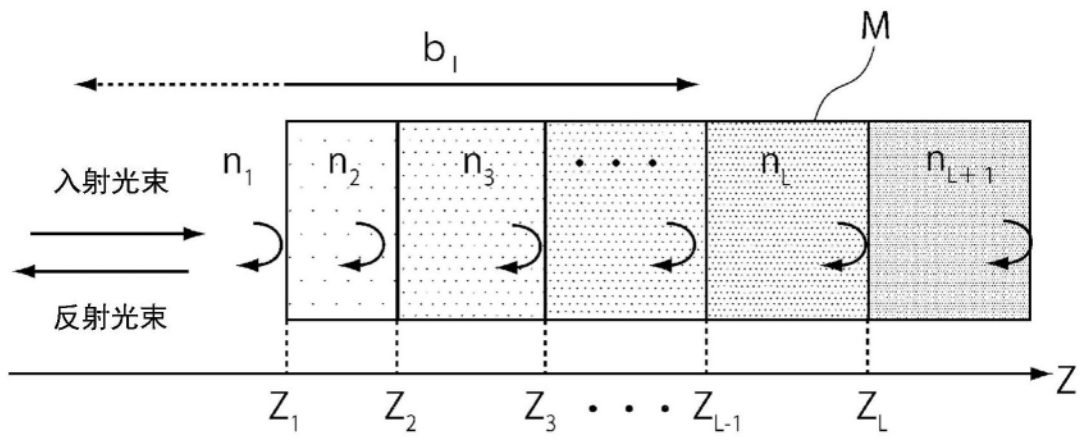


图4

(A)



(B)

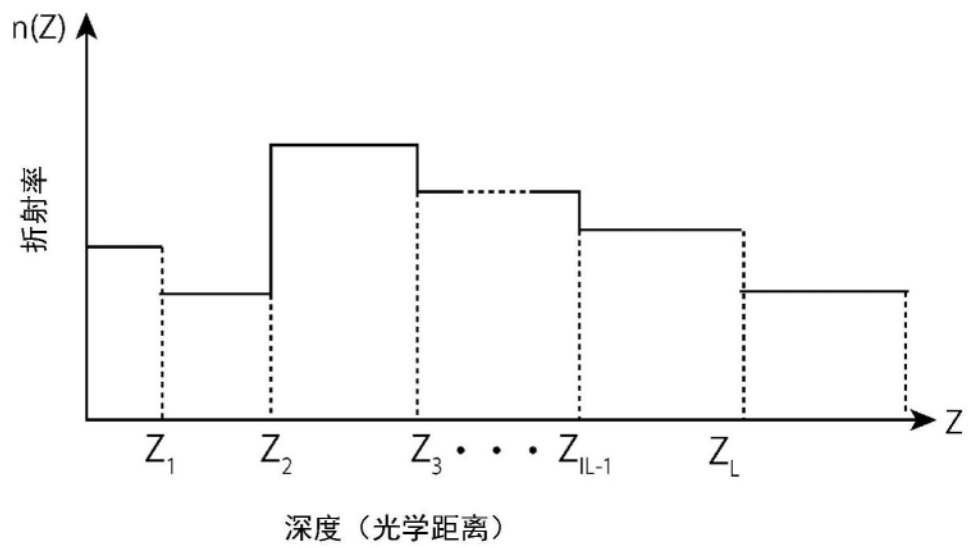


图5

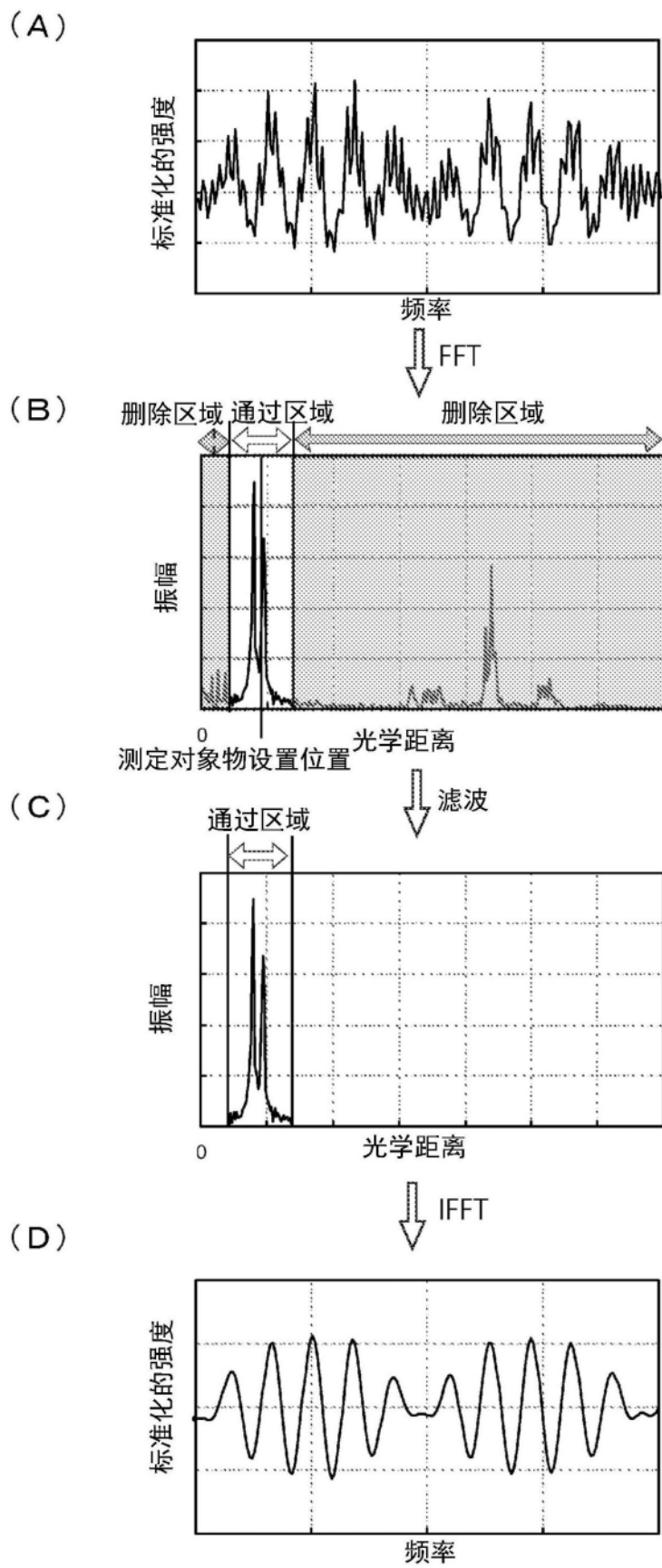


图6

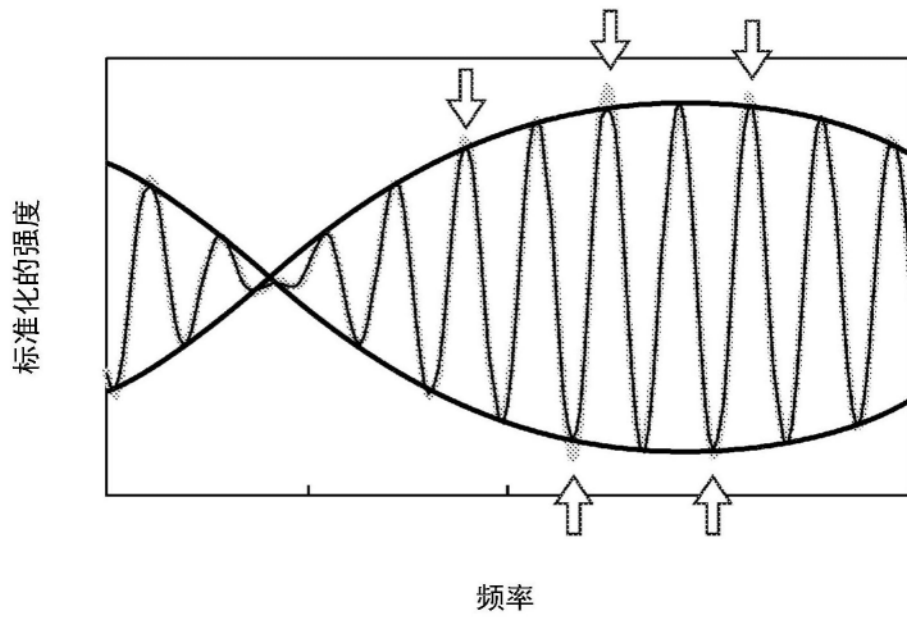


图7

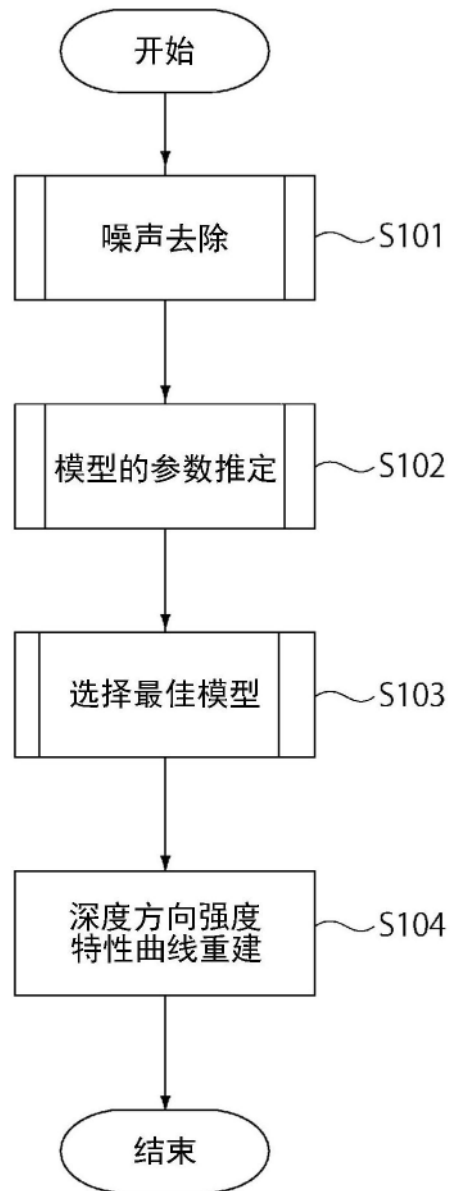


图8

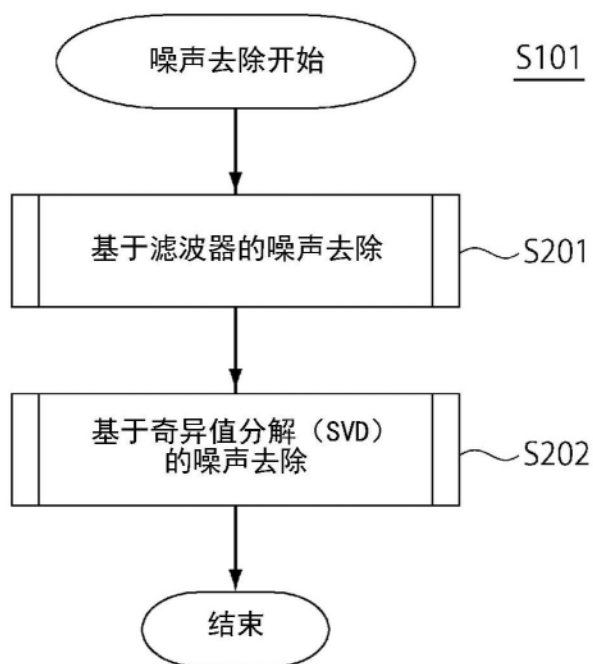


图9

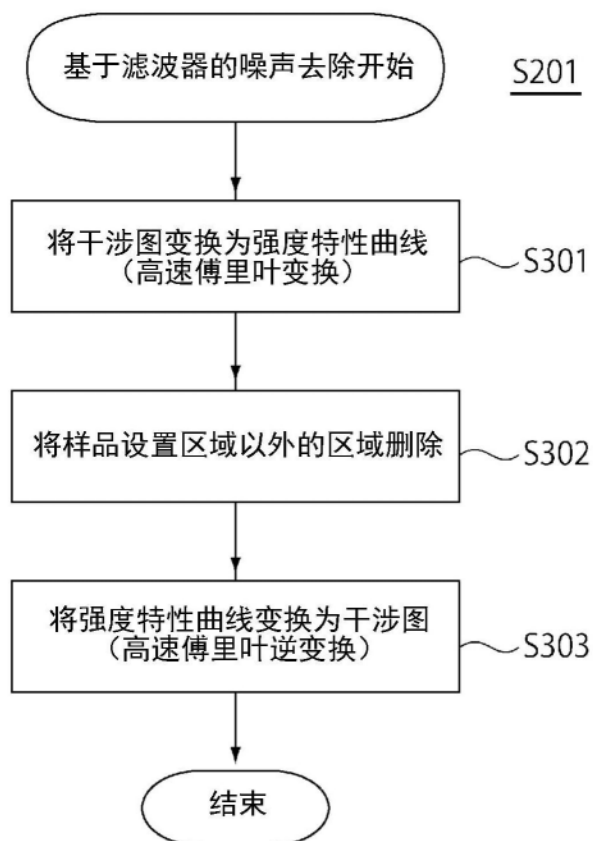


图10

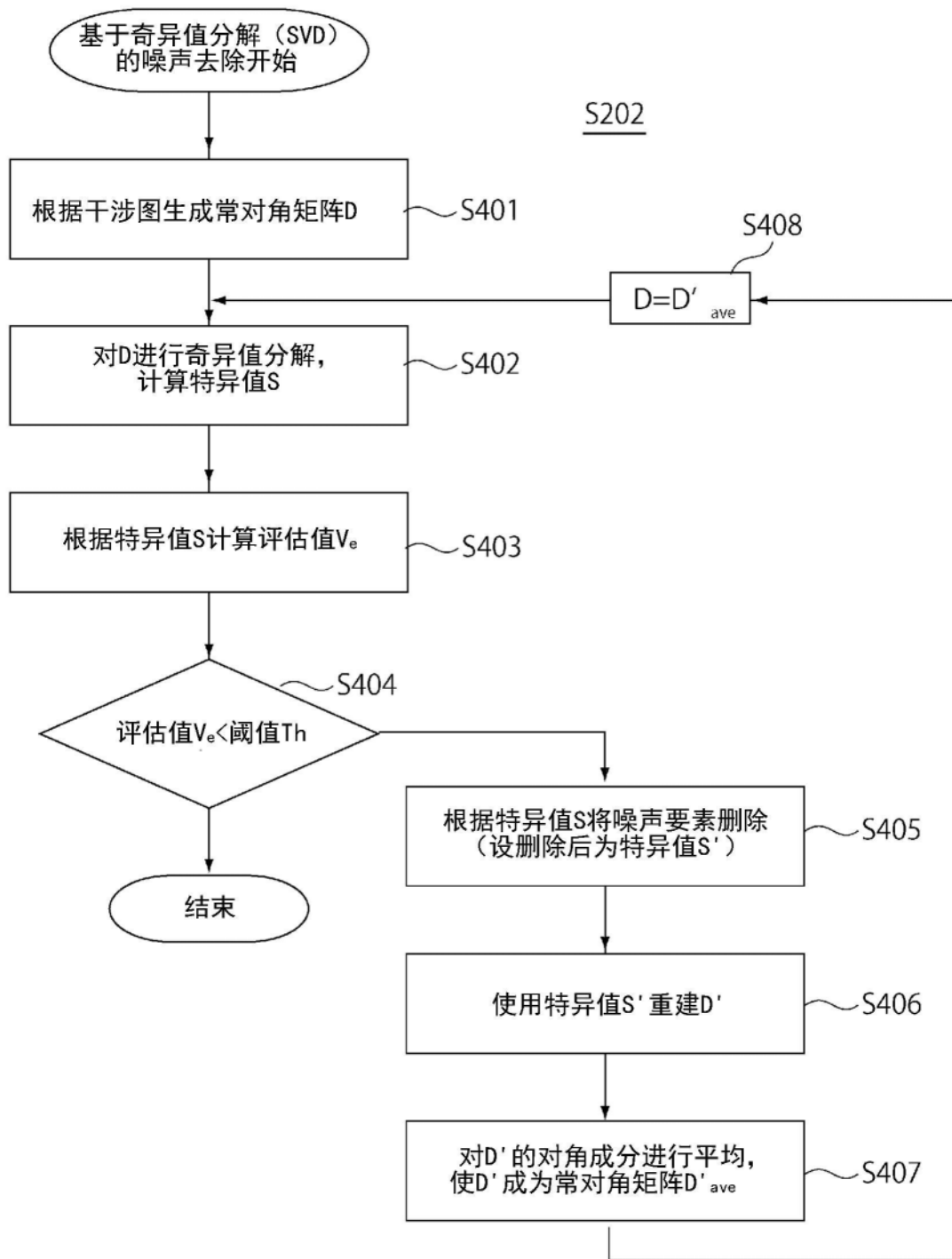


图11

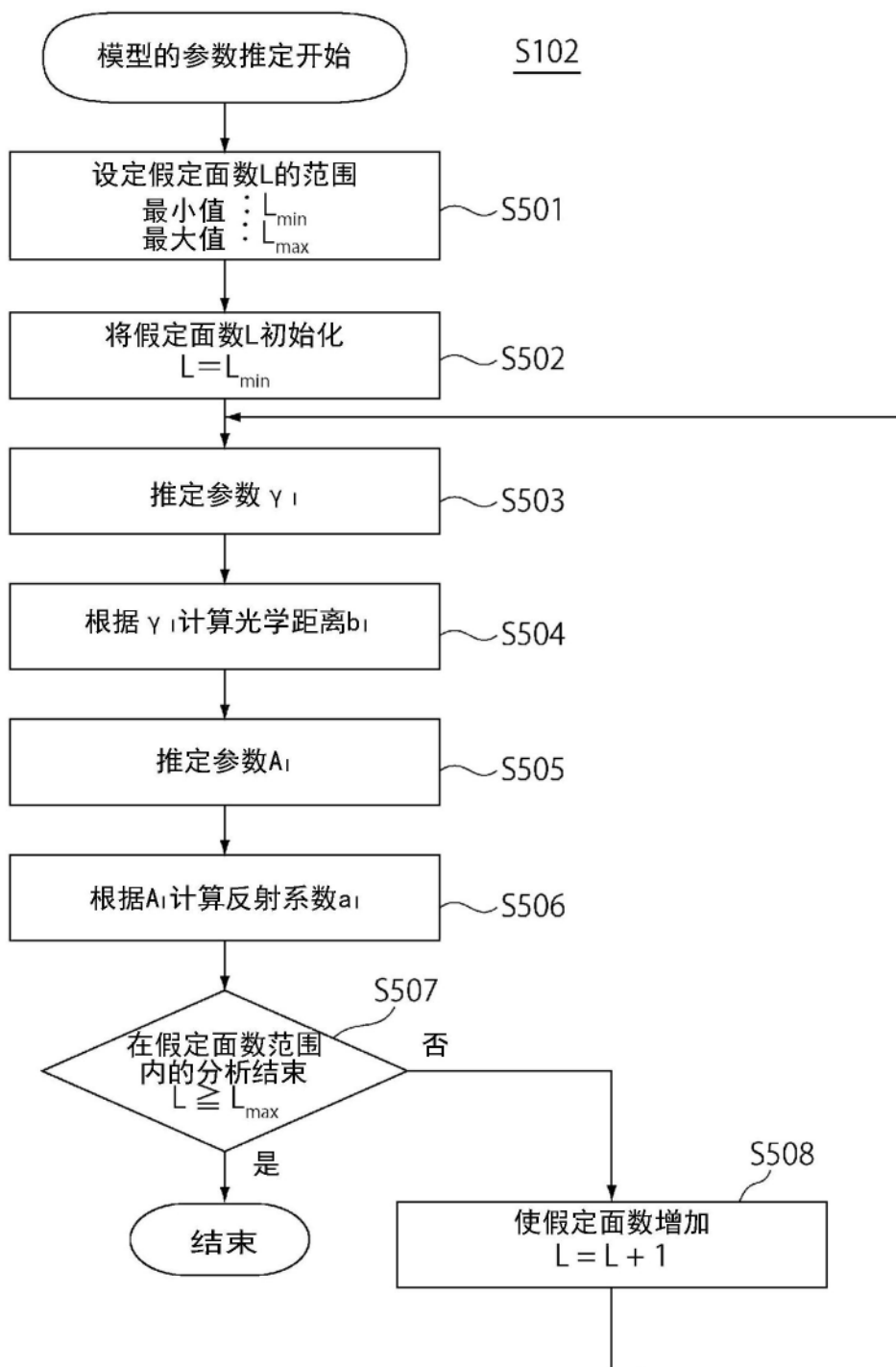


图12

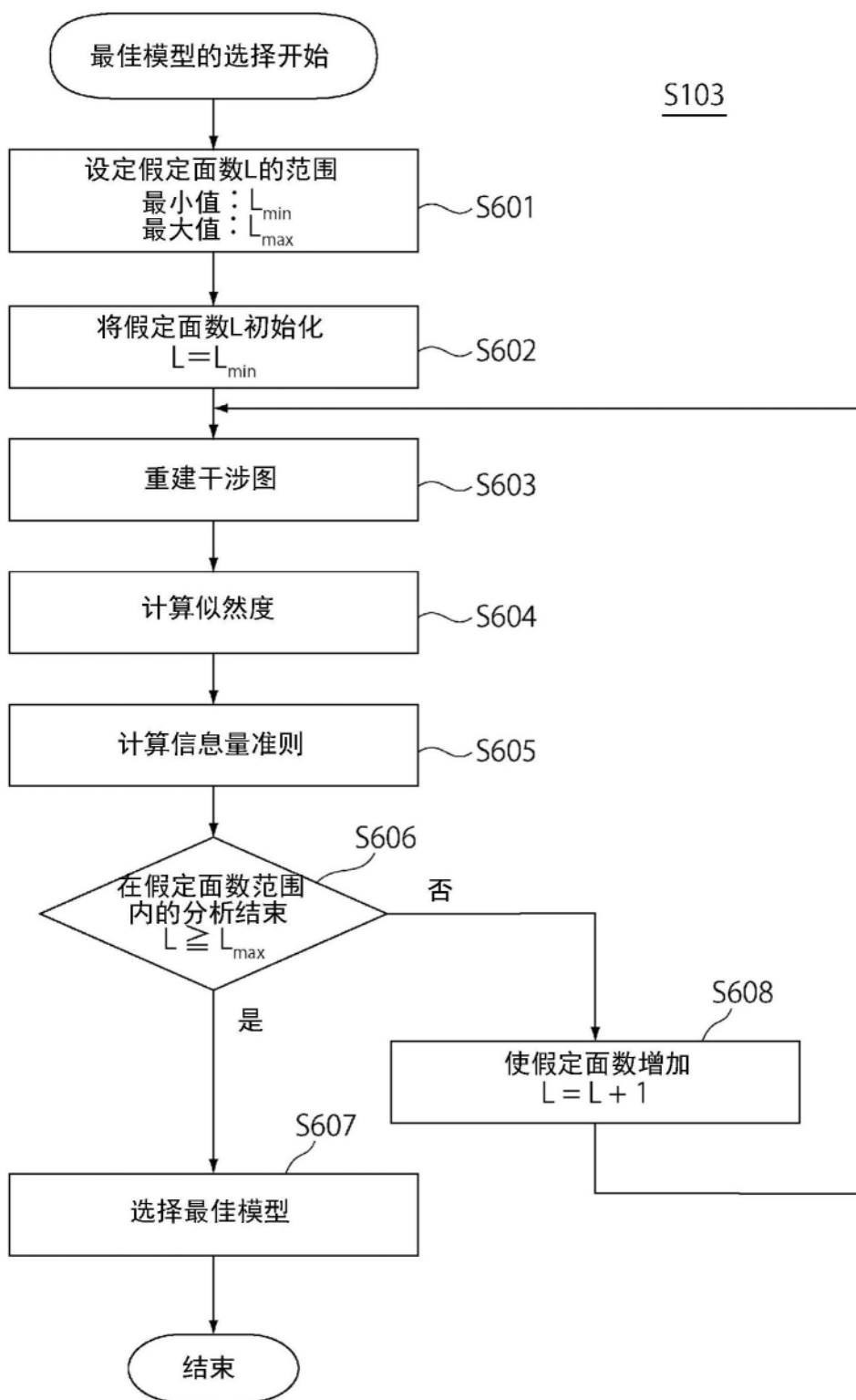


图13

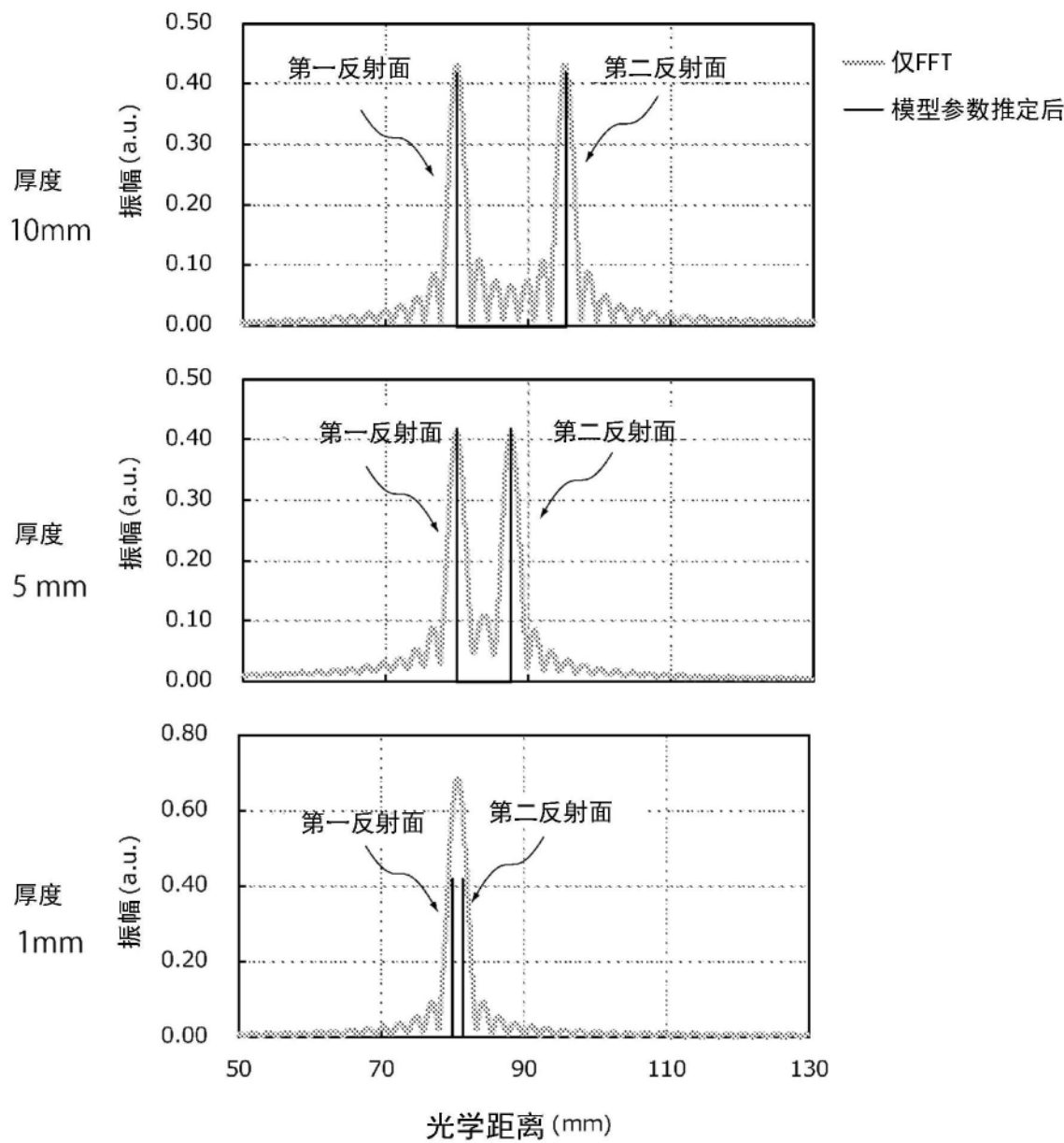


图14

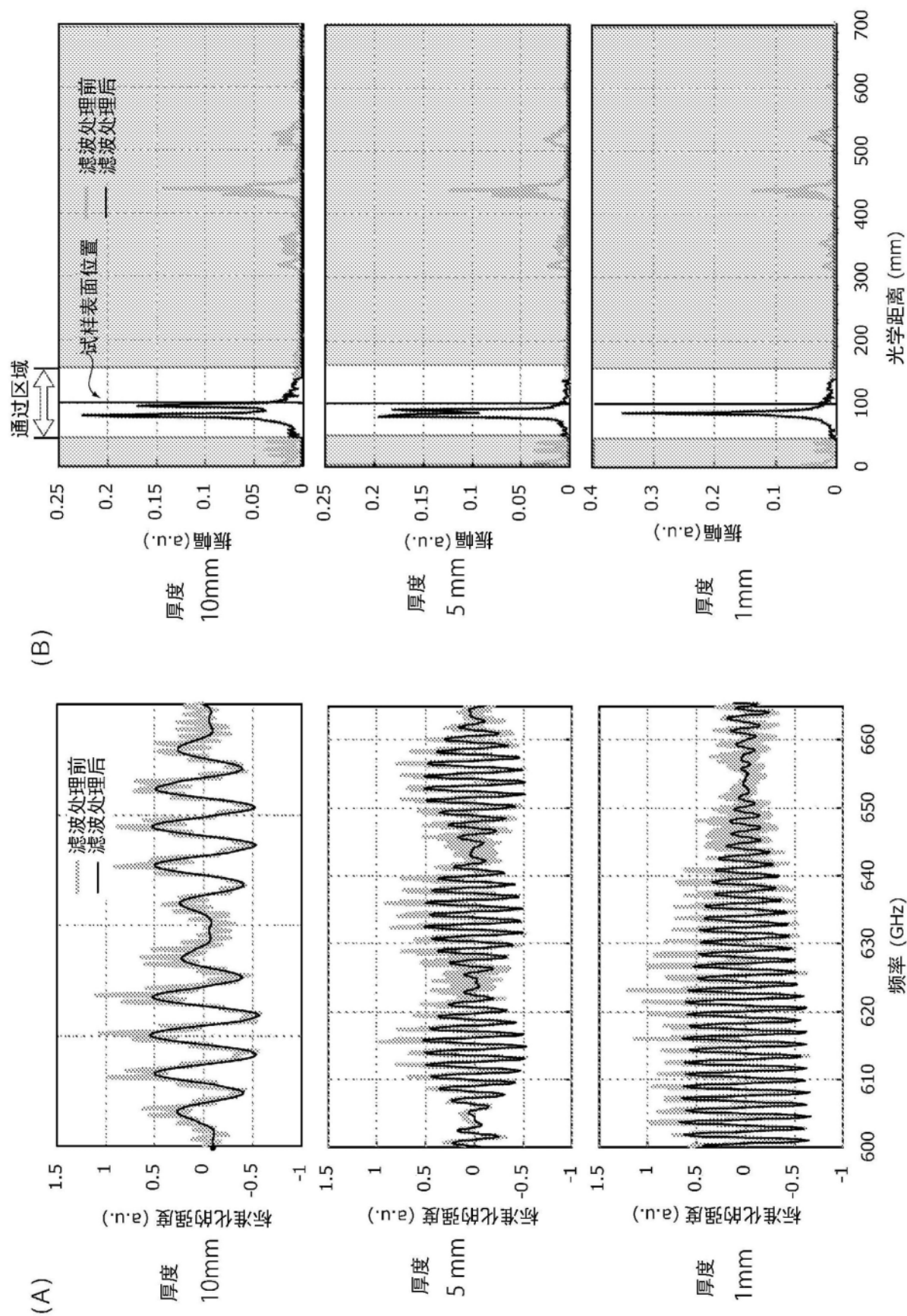


图15

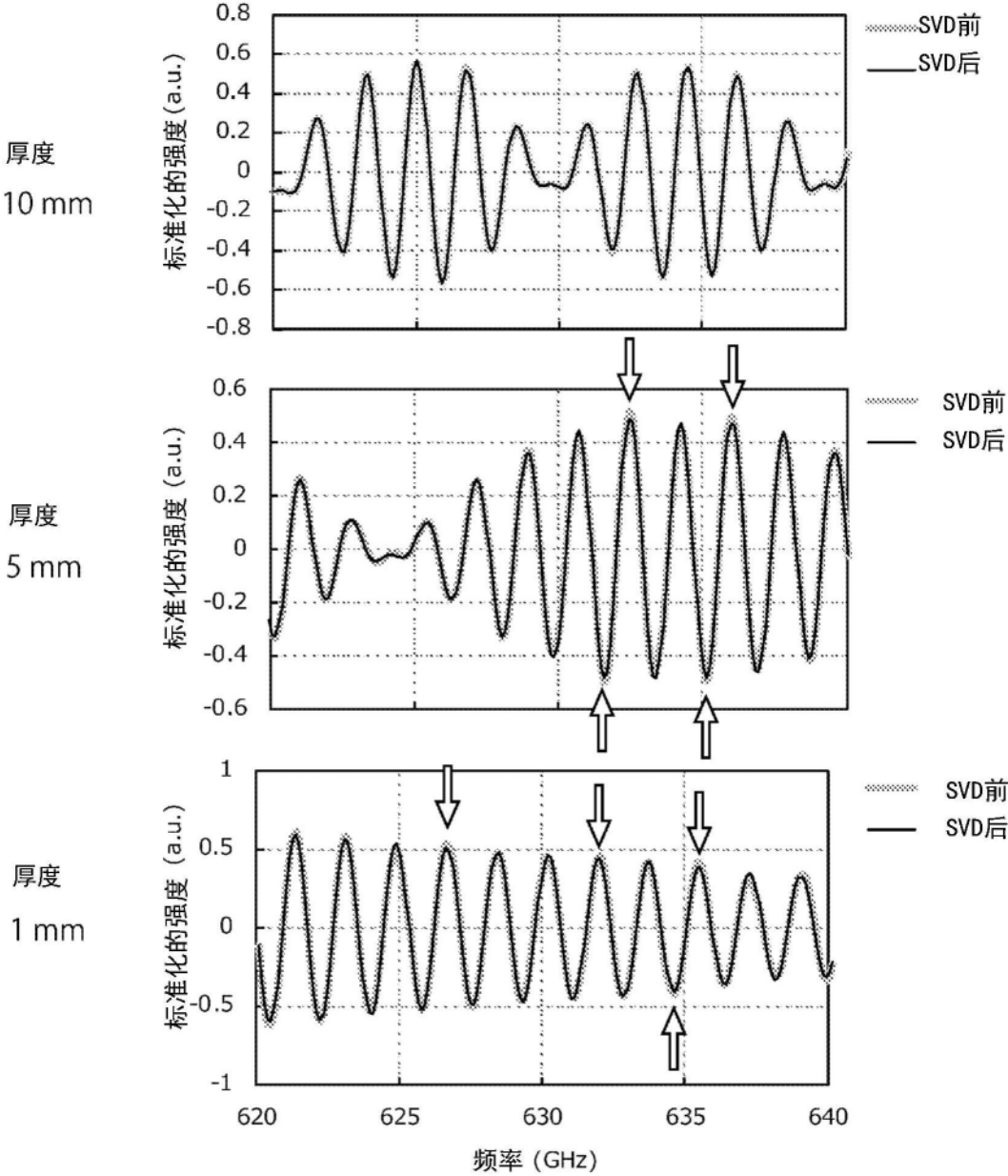


图16

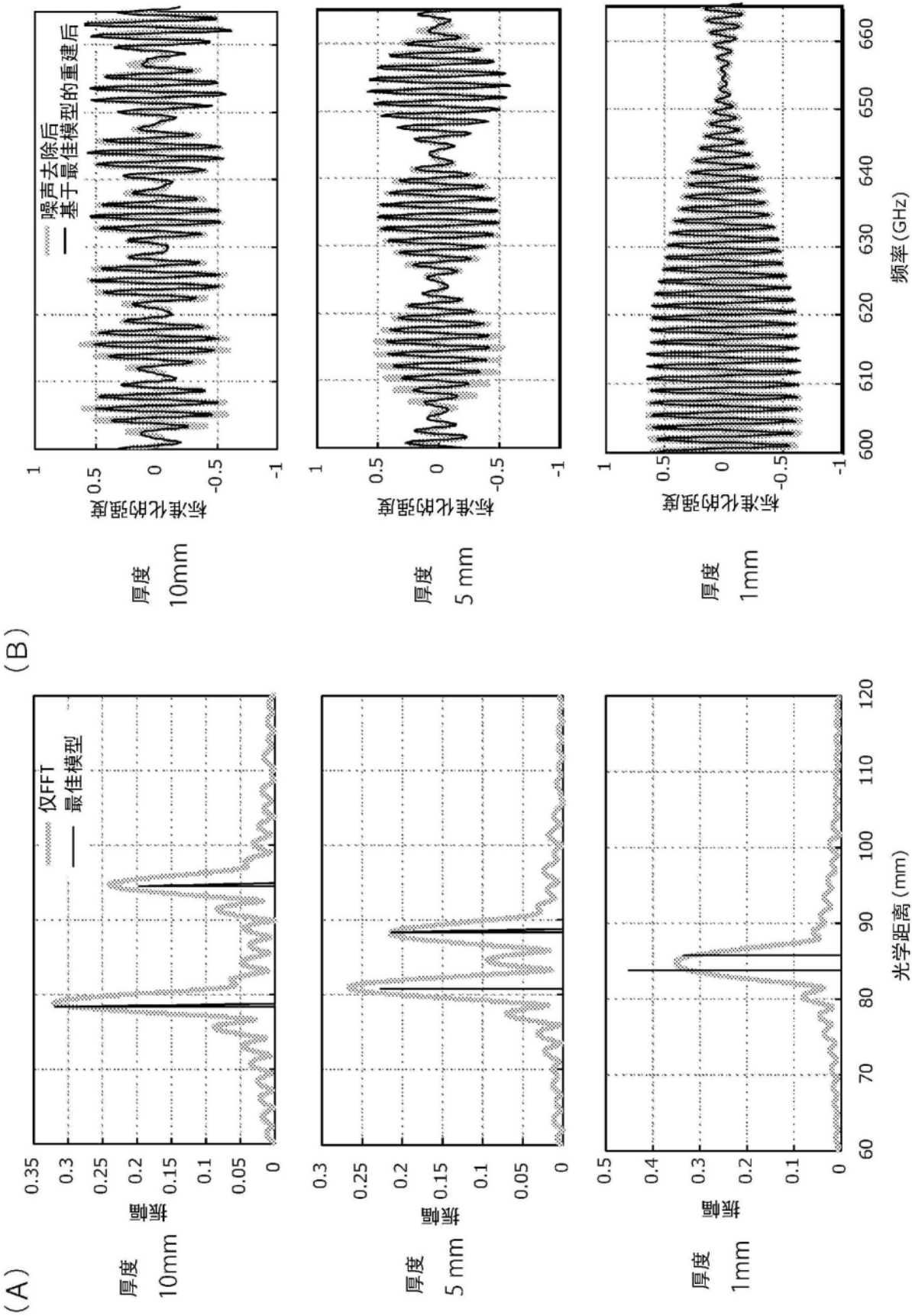


图17

1a

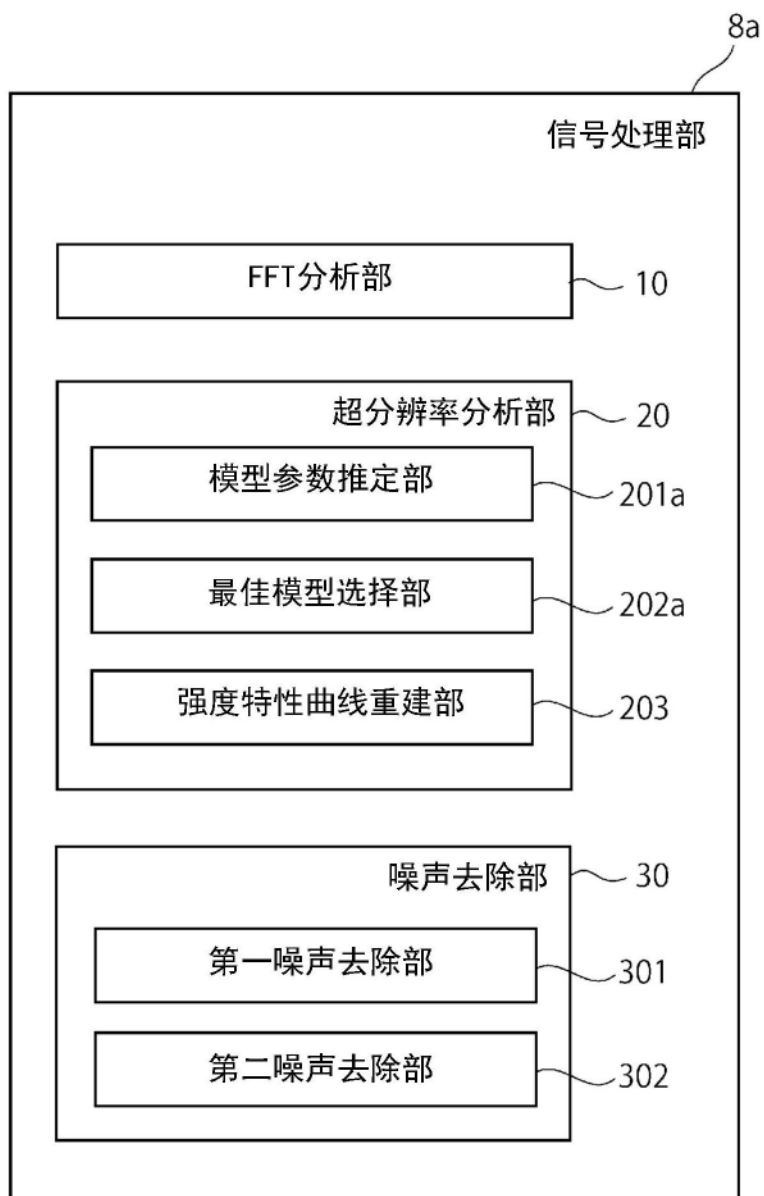


图18

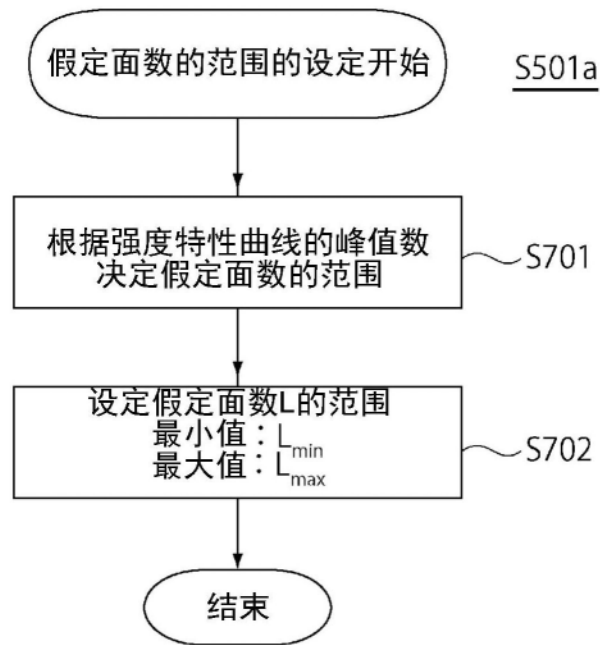


图19