



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 113607075 A

(43) 申请公布日 2021. 11. 05

(21) 申请号 202110853826.2

(22) 申请日 2021.07.28

(71) 申请人 天津大学前沿技术研究院有限公司

地址 301700 天津市武清区武清开发区新
兴路1号

(72) 发明人 丁振扬 刘铁根 刘琨 江俊峰
李胜

(74) 专利代理机构 天津耀达律师事务所 12223

代理人 张耀

(51) Int. Cl.

G01B 11/16 (2006.01)

G06F 17/14 (2006.01)

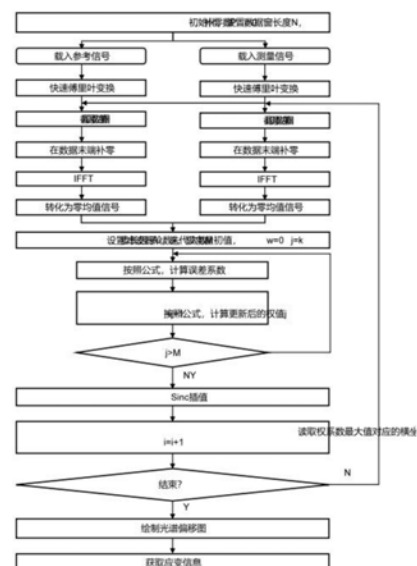
权利要求书2页 说明书5页 附图4页

(54) 发明名称

一种基于自适应时延估计的光频域反射应
变解调方法

(57) 摘要

发明提出了一种基于自适应时延估计的光频域反射应变解调方法,应用于基于光频域反射的应变解调。通过将距离域信号分段处理得到局部瑞利散射光谱,再利用自适应时延估计算法取代传统的互相关来估计参考信号和测试信号间由应变引起的光谱偏移量,从而获取光纤连续分布式的应变分布状况。经测试,本发明最小能够解调出200m测试光纤上 $1\mu\epsilon$ 大小的微应变,其空间分辨率 $<10\text{cm}$ 。



1. 一种基于自适应时延估计的光频域反射应变解调方法,其特征是包括以下步骤:

第一步,利用OFDR系统进行两次传感测量,得到两组数据大小相同的拍频信号,两组数据分别同时进行步骤2到4所述的数据处理过程;

第二步,对采集到的拍频信号进行快速傅里叶变换,将数据由光频域转换到距离域,即得到测试光纤中瑞利散射光强随距离变化的信号;

第三步,用一个固定长度的数据窗对得到的瑞利散射信号进行分段截取,由于截取后得到的信号正是该位置处的瑞利散射信号;

第四步,在得到的局部瑞利散射信号的末端补零,之后进行快速傅里叶逆变换,得到该位置对应的局部瑞利散射光谱;

第四步,为了消除直流分量的影响,将得到的局部瑞利散射光谱减去其平均值,得到一个零均值的局部瑞利散射光谱;

第五步,经过以上四步,得到两组各个位置处的局部瑞利散射光谱,取参考组和测量组中对应位置处的瑞利散射信号,利用LMSTDE自适应时延估计算法对该位置处由应变引起的光谱偏移量进行估计;

第六步,为了提高光谱偏移量的检测精度,对收敛后的权向量进行sinc插值处理,处理后权系数最大值所在的位置反映了测量组相对于参考组的光谱偏移量大小,这与实际偏移量之间存在一个倍数关系;

第七步:将每一段数据窗口计算出的光谱偏移量绘制成一条曲线,在这个曲线中,受到应变的位置会有明显的突起,这就是应变所在位置,将这个突起位置的数据点取平均值减去整条曲线的平均值,从而得到该位置处的应变值。

2. 根据权利要求1所述的基于自适应时延估计的光频域反射应变解调方法,其特征是:第一步中,两次传感测量,一次在未施加应变时进行,作为参考组,一次在施加应力后进行,作为测量组。

3. 根据权利要求1所述的基于自适应时延估计的光频域反射应变解调方法,其特征是:第四步中,补零数的大小根据具体的测量系统来决定。

4. 根据权利要求1所述的基于自适应时延估计的光频域反射应变解调方法,其特征是:第五步中,LMSTDE自适应时延估计算法是用一个抽头系数不断更新的横向滤波器来拟合两路信号的时延值,首先设置滤波器阶数P,权系数向量初值设置为 $w_0=0$,将测量信号作为滤波器的输入,参考信号作为滤波器的输出,并用公式(1)计算二者的误差系数:

$$e(k) = x_2(k) - \sum_{j=-P}^P w_j x_1(k-j) \quad (1)$$

设置权向量更新步长因子 μ ,它通常是一个远小于1的正数,用来控制自适应算法的收敛速度和稳定性,其数值应根据具体的测量数据进行调整,之后利用公式(2)对权向量进行迭代更新:

$$w_i(k+1) = w_i(k) + \mu e(k) x(k-i), -P < i < P \quad (2)$$

按照公式(1)和(2)对权向量进行不断地更新,迭代次数应尽可能地大,以保证算法收敛,此时滤波器的权值系数进入一个稳定的状态。

5. 根据权利要求4所述的基于自适应时延估计的光频域反射应变解调方法,其特征是:

取原始数据本身的大小作为迭代次数。

一种基于自适应时延估计的光频域反射应变解调方法

技术领域

[0001] 本发明涉及光纤传感技术领域,主要介绍了一种基于自适应时延估计的光频域反射应变解调方法,应用于光频域反射。

背景技术

[0002] 应变作为反应系统结构状态信息的重要参量,它对于结构强度测试,智能信息采集等具有重要意义。分布式光纤传感技术是一种集传输和传感于一体的,能够对整条链路上的物理量进行连续测量的传感技术,它凭借着其抗电磁干扰能力强、灵敏度高、体积小、空间分辨率高、测量范围广等一系列优点,被广泛运用于航天智能结构、材料加工、生物医学、油气管道泄漏检测等传感和检测领域。按照传感过程中定位方式的不同可以分为基于光学时域反射(OTDR)和基于光频域反射(OFDR)的光纤传感技术,目前,基于光学时域反射技术中的布里渊光时域反射仪(BOTDR)和布里渊光时域分析(BOTDA),可以实现亚米级空间分辨率,数十公里感应范围和静态/动态应变测量。而光纤干涉仪传感器,如MZI型和Sagnac环型,具有高灵敏度但低空间分辨率(通常为几十米)。然而,以上的分布式光纤应变传感器最小可测量应变通常限制在 $10\mu\epsilon$ 以上,因此这不能满足某些应用的高灵敏度要求。

[0003] 光频域反射技术(Optical Frequency Domain Reflectometry, OFDR),作为分布式光纤传感的一种,OFDR技术将光纤中的瑞利散射看作一种随机的空间周期弱布拉格光栅,可用于分布式应力、温度传感。在解调算法方面,通过互相关来计算测量瑞利后向散射谱位移的方法在OFDR传感器系统中得到了广泛的应用,这种方法被称为瑞利散射光谱互相关法,然而,该算法在长距离的测试链路上,该算法的具有一定的局限性,在此基础上,本发明提出了一种新的应变解调方法,能够实现200m测试光纤上 $1\mu\epsilon$ 大小的应变测量,其空间分辨率 $<10\text{cm}$ 。

发明内容

[0004] 本发明提出了一种基于自适应时延估计的光频域反射应变解调方法。其具体的实施步骤见下文描述:

[0005] 第一步,利用OFDR系统进行两次传感测量,得到两组数据大小相同的拍频信号,一次在未施加应变时进行,作为参考组,一次在施加应力后进行,作为测量组。两组数据分别同时进行步骤2到4所述的数据处理过程。

[0006] 第二步,对采集到的拍频信号进行快速傅里叶变换,将数据由光频域转换到距离域,即得到测试光纤中瑞利散射光强随距离变化的信号。

[0007] 第三步,用一个固定长度的数据窗对得到的瑞利散射信号进行分段截取,由于截取后得到的信号正是该位置处的瑞利散射信号,所以数据窗的大小直接决定了系统的空间分辨率。

[0008] 第四步,为了提高系统的应变分辨率,在得到的局部瑞利散射信号的末端补零,补零数的大小根据具体的测量系统来决定,之后进行快速傅里叶逆变换,得到该位置对应的

局部瑞利散射光谱。

[0009] 第四步,为了消除直流分量的影响,将得到的局部瑞利散射光谱减去其平均值,得到一个零均值的局部瑞利散射光谱。

[0010] 第五步,经过以上四步,可以得到两组各个位置处的局部瑞利散射光谱,我们取参考组和测量组中对应位置处的瑞利散射信号,利用LMSTDE自适应时延估计算法对该位置处由应变引起的光谱偏移量进行估计:

[0011] 该算法实际上是用一个抽头系数不断更新的横向滤波器来拟合两路信号的时延值,因此首先设置滤波器阶数P,权系数向量初值设置为 $w_0=0$,将测量信号作为滤波器的输入,参考信号作为滤波器的输出,并用公式(1)计算二者的误差系数:

$$[0012] \quad e(k) = x_2(k) - \sum_{j=-P}^P w_j x_1(k-j) \quad (1)$$

[0013] 设置权向量更新步长因子 μ ,它通常是一个远小于1的正数,用来控制自适应算法的收敛速度和稳定性,其数值应根据具体的测量数据进行调整。之后利用公式(2)对权向量进行迭代更新:

$$[0014] \quad w_i(k+1) = w_i(k) + \mu e(k) x(k-i), -P < i < P \quad (2)$$

[0015] 按照公式(1)和(2)对权向量进行不断地更新,迭代次数应尽可能地大,以保证算法收敛,此时滤波器的权值系数进入一个稳定的状态。通常可以取原始数据本身的大小作为迭代次数。

[0016] 第六步,为了提高光谱偏移量的检测精度,对收敛后的权向量进行sinc插值处理,处理后权系数最大值所在的位置反映了测量组相对于参考组的光谱偏移量大小,这与实际偏移量之间存在一个倍数关系。

[0017] 第七步:将每一段数据窗口计算出的光谱偏移量绘制成一条曲线,在这个曲线中,受到应变的位置会有明显的突起,这就是应变所在位置,将这个突起位置的数据点取平均值减去整条曲线的平均值,从而得到该位置处的应变值。

[0018] 本发明提供的技术方案的有益效果是:

[0019] 1、实现了200m长距离测试光纤空间分辨率达10cm的分布式光纤应变测量;

[0020] 2、实现200m长距离测试光纤灵敏度达到 $1\mu\epsilon$ 的分布式光纤应变测量;

附图说明

[0021] 图1为一种利用长距离连续光栅光纤测量分布式光纤应力的传感系统的结构示意图;

[0022] 图2为基于自适应时延估计的光频域反射应变解调方法的算法流程图;

[0023] 图3为基于自适应时延估计的光频域反射应变解调方法对于200m测试光纤上对于1个微应变的解调效果图。

[0024] 图4为基于自适应时延估计的光频域反射应变解调方法对于200m测试光纤上 $0.5\mu\epsilon$ 、 $1\mu\epsilon$ 、 $1.5\mu\epsilon$ 、 $2\mu\epsilon$ 大小的应变解调效果放大图。

[0025] 附图中,各标号所代表的部件列表如下:

[0026] 1:可调谐激光器;2:第一平衡探测器;3:80:20分束器;4:95:5光分束器;5:第一50:50耦合器;6:时钟整形电路模块;7:延迟光纤;8:第一法拉第转镜;9:第二法拉第转镜;

10:第一环形器;11:计算机;12:偏振控制器;13:第二环形器;14第二50:50耦合器;15:拉伸区域;16:第二平衡探测器;

[0027] 17:采集装置;18:GPIB控制模块;19:参考臂;20:测试臂;21:基于辅助干涉仪的时钟触发装置;22:主干涉仪;23:长距离连续光栅光纤;

具体实施方式

[0028] 本实例包括使用长距离连续光栅光纤的光频域反射的分布式光纤传感装置,参见附图1,光频域反射的分布式光纤传感装置包括:可调谐激光器1、95:5光分束器4、计算机11、GPIB(通用接口总线)控制模块18、基于辅助干涉仪的时钟触发装置21、主干涉仪22。

[0029] 其中,基于辅助干涉仪的时钟触发装置21包括:第一平衡探测器2、第一50:50耦合器5、时钟整形电路模块6、延迟光纤7、第一法拉第转镜8、第二法拉第转镜9和第一环形器10。基于辅助干涉仪的时钟触发装置21用于实现等光频间距采样,其目的是抑制光源的非线性扫描。

[0030] 其中,主干涉仪22包括:80:20分束器3、偏振控制器12、第二环形器13、第二50:50耦合器14、第二平衡探测器16、采集装置17、参考臂19、测试臂20和长距离光纤光栅23。主干涉仪22是光频域反射的分布式光纤传感装置的核心,其为改进型马赫泽德干涉仪。

[0031] GPIB控制模块18输入端与计算机11相连;GPIB控制模块18输出端与可调谐激光器1相连;可调谐激光器1与95:5光分束器4的a端口相连;95:5光分束器4的b端口与第一环形器10a端口相连(5);95:5光分束器4的c端口与80:20分束器3的a端口相连(95);第一环形器10的b端口与第一50:50耦合器5的a端口相连;第一环形器10的c端口与第一平衡探测器2的输入端相连;第一50:50耦合器5的b端口与第一平衡探测器2的输入端相连;第一50:50耦合器5的c端口与第一法拉第转镜8相连;第一50:50耦合器5的d端口通过延迟光纤7与第二法拉第转镜9相连;第一平衡探测器2的输出端与时钟整形电路模块6的输入端相连;时钟整形电路模块6的输出端与采集装置17的输入端相连;80:20分束器3的b(20)端口通过参考臂19与偏振控制器12的输入端相连;80:20分束器3的c(80)端口通过测试臂20与第二环形器13的a端口相连;偏振控制器12的输出端与第二50:50耦合器14的a端口相连;第二环形器13的b端口与第二50:50耦合器14的b端口相连;环形器13的c端口与通过拉伸区与长距离光纤光栅23相连;第二50:50耦合器14的c端口与第二平衡探测器16的输入端相连;第二50:50耦合器14的d端口与第二平衡探测器16的输入端相连;第二平衡探测器16的输出端与采集装置17的输入端相连;采集装置17的输出端与计算机11相连。

[0032] 装置工作时,计算机11通过GPIB控制模块18控制可调谐激光器1控制调谐速度、中心波长、调谐启动等;可调谐激光器1的出射光由95:5光分束器4的a端口进入,并以5:95的比例从95:5光分束器4的b端口经过环形器10进入第一50:50耦合器5的a端口,光从第一50:50耦合器5的a端口进入,从第一50:50耦合器5的c和d端口出射,分别被两臂的第一法拉第转镜8和第二法拉第转镜9反射,返回到第一50:50耦合器5的c、d端口,两束光在第一50:50耦合器5中发生干涉,从第一50:50耦合器5的b端口输出;第一50:50耦合器5从b端口的出射光进入第一平衡探测器2,第一平衡探测器2将探测到的光信号转换为干涉拍频信号传输至时钟整形模块6,时钟整形模块6干涉拍频信号整形为方波,整形后的信号传输至采集装置17,作为采集装置17的外部时钟信号。

[0033] 可调谐激光器1的出射光由95:5光分束器4的a端口进入,从95:5光分束器4的c端口(95)进入80:20分束器3的a端口;经过80:20分束器3(20)从b端口进入参考臂19中的偏振控制器12,从c端口(80)进入测试臂20上的第二环行器13的a端口;光从第二环行器13的a端口进入,从第二环行器13的c端口进入拉伸区15中的长距离光纤光栅23,而长距离光纤光栅23的背向散射光从第二环行器13端口c端口进入,从第二环行器13端口b端口输出;参考臂19中的偏振控制器12输出的参考光通过第二50:50耦合器14的a端口与第二环行器13上的背向散射光通过第二50:50耦合器14的b端口进形合束,形成拍频干涉并从第二50:50耦合器14的c端口和d端口输出至第二平衡探测器16,第二平衡探测器16将输出的模拟电信号传输至采集装置17,采集装置17在时钟整形模块6形成的外部时钟信号作用下将采集到的模拟电信号传输至计算机11。

[0034] GPIB控制模块18用于计算机11通过其控制可调谐激光器1。

[0035] 可调谐激光器1用于为光频域反射系统提供光源,其光频能够进行线性扫描。

[0036] 第一环形器10防止辅助干涉仪中第一50:50耦合器5的b端口的反射光进入激光器。

[0037] 第一50:50耦合器5用于光干涉。

[0038] 延迟光纤7用于实现非等臂的拍频干涉,能够根据拍频和延迟光纤长度得到光频。

[0039] 第一法拉第转镜8和第二法拉第转镜9用于为干涉仪提供反射,且能够消除干涉仪的偏振衰落现象。

[0040] 偏振控制器12作用是调节参考光偏振态,使其在偏振分束时两个正交方向上光强基本一致。

[0041] 第二50:50耦合器14完成对信号进行偏振分束,消除偏振衰落噪声的影响。

[0042] 计算机11:对采集装置17采集的干涉信号进行数据处理,实现基于光频域反射中利用长距离光纤光栅测量分布式光纤应变的光纤传感。

[0043] 本发明提供了一种光频域反射中基于自适应时延估计算法的分布式应变传感解调方法,该解调是与实施例1中的传感系统相对应,如图2所示,该传感方法的步骤是:

[0044] 在主干涉仪中由长距离光栅背向瑞利散射形成拍频干涉信号,在不拉伸和拉伸状态下分别得到参考数据和测量数据,并对两种数据分别进行快速傅里叶变换,将光频域信息转换到对应长距离连续光栅光纤中各个位置的距离域信息。

[0045] 用长度为2000的数据窗口对得到的距离域信号进行分段,得到局部瑞利散射信号;为了提高系统的传感分辨率,在该信号的尾部进行补零操作,补零数设置为20000,并进行快速傅里叶逆变换得到局部瑞利散射光谱。

[0046] 为了消除直流分量的影响,将得到的局部瑞利散射光谱减去其平均值,得到一个零均值的信号。

[0047] 设置滤波器的各项参数,设置滤波器阶数为512,权系数向量初值设置为 $w_0=0$,步长因子 $\mu=0.0005$ 。

[0048] 按照LMSTDE算法的更新公式进行滤波器迭代更新,为了保证算法收敛,迭代次数设置为20000,则由应变引起的光谱偏移量可以从滤波器的权值系数中得出,光谱偏移量等于权向量最大值所在的横坐标位置,为了提高应变分辨率,对权向量进行100倍sinc插值,此时得到的光谱量和真实的偏移量之间存在一个比例关系,但不影响应变大小的测量。

[0049] 将每一段数据窗口计算出的光谱偏移量绘制成一条曲线,在这个曲线中,受到应变的位置会有明显的突起,将这个突起位置的数据点取平均值减去整条曲线的平均值,从而得到测试光纤的应变值。

[0050] 下面结合具体的试验对本发明传感系统和解调方法进行可行性验证,参见图3,详见下文描述:

[0051] 本发明实施例验证实验为采用长距离光纤光栅,所述长距离连续光栅光纤长度为200m,应变位置在测试光纤末端,应变区长度约为40cm,应变由纳米位移台拉伸产生;位移台每移动0.1 μ m对应于待测光纤产生了0.25个微应变,实验中使用的激光器调谐速度为400nm/s,附加干涉仪长度为500m,采集的数据点数为10M,可知,当数据窗口大小取为2000时,对应的空间分辨率约为10cm。

[0052] 本实施例首先对实验采集到的1个微应变大小的应变进行了解调实验,作出了算法收敛后的误差曲线,并根据算法收敛后权向量系数的最大值所在的位置绘制了测试光纤尾部位置的光谱偏移图,结果如图3所示。图中有明显凸起的位置即是应变所在位置,这说明,基于自适应时延估计的光频域反射应变解调方法在空间分辨率取到10cm时,仍能准确地解调出200m测试光纤上1 μ ϵ 大小的微应变。

[0053] 为了进一步验证本发明的可行性,本实施例又分别对实验采集到的0.5 μ ϵ 、1.5 μ ϵ 以及2 μ ϵ 大小的应变数据进行了解调实验,数据解调结果如图4所示。从图中可以看出,对于1 μ ϵ 及以上大小的微应变,本发明均可以较准确地识别出应变所在位置,且其光谱偏移量随着应变的增大而逐渐增大,近似呈线性关系,这更加验证了基于自适应时延估计的光频域反射应变解调方法的可行性。

[0054] 而对于0.5 μ ϵ 大小的微应变,其应变位置处的噪声明显增大,已经很难对应变区域和大小做出准确的判断,因此,本发明对于1 μ ϵ 以下的微应变的解调能力较弱。

[0055] 本实施例说明,利用基于自适应时延估计算法的分布式应变传感解调方法,一定程度上可以取代经典的瑞利散射光谱互相关算法进行应变数据解调,且具有一定的解调精度,对于长度为200m测试光纤,其最小可识别应变大小为1 μ ϵ ,且其空间分辨率可达10cm。

[0056] 本发明实施例对各器件的型号除做特殊说明的以外,其他器件的型号不做限制,只要能完成上述功能的器件均可。

[0057] 本领域技术人员可以理解附图只是一个优选实施例的示意图,上述本发明实施例序号仅仅为了描述,不代表实施例的优劣。

[0058] 以上所述仅为本发明的较佳实施例,并不用以限制本发明,凡在本发明的精神和原则之内,所作的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

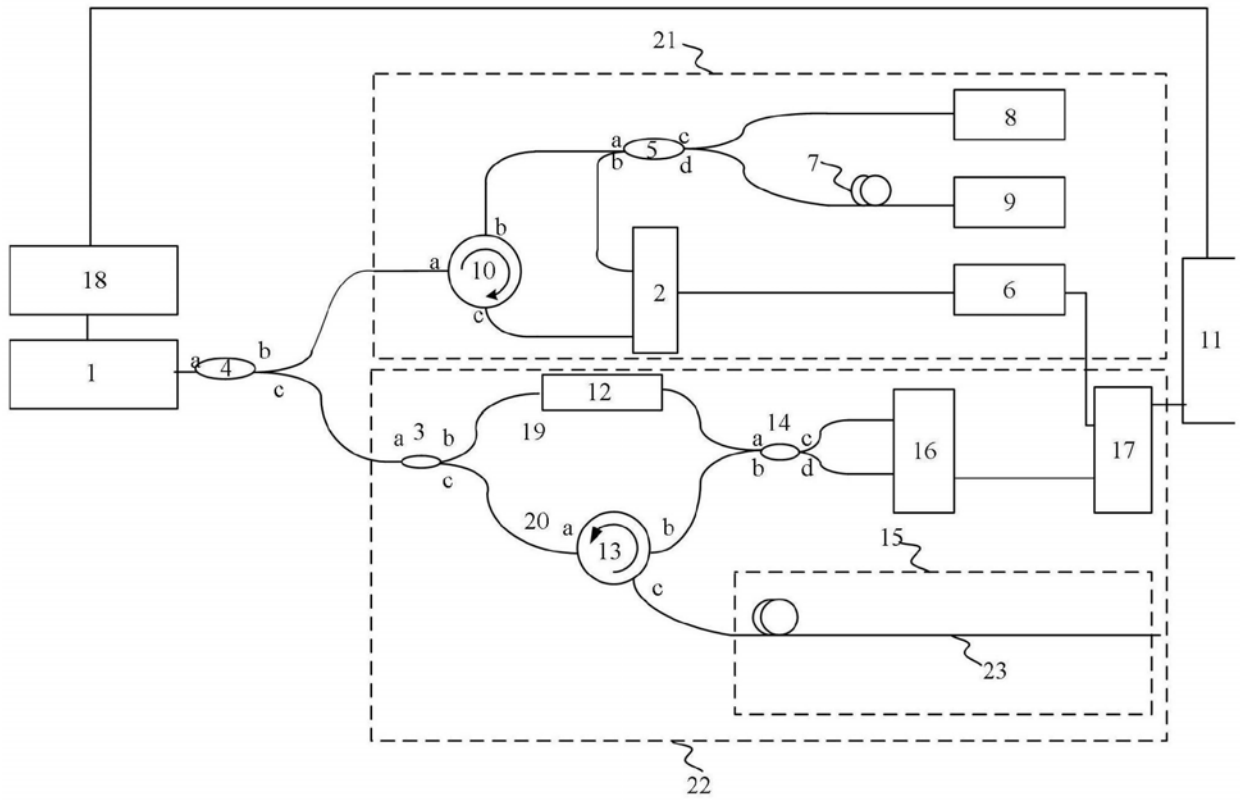


图1

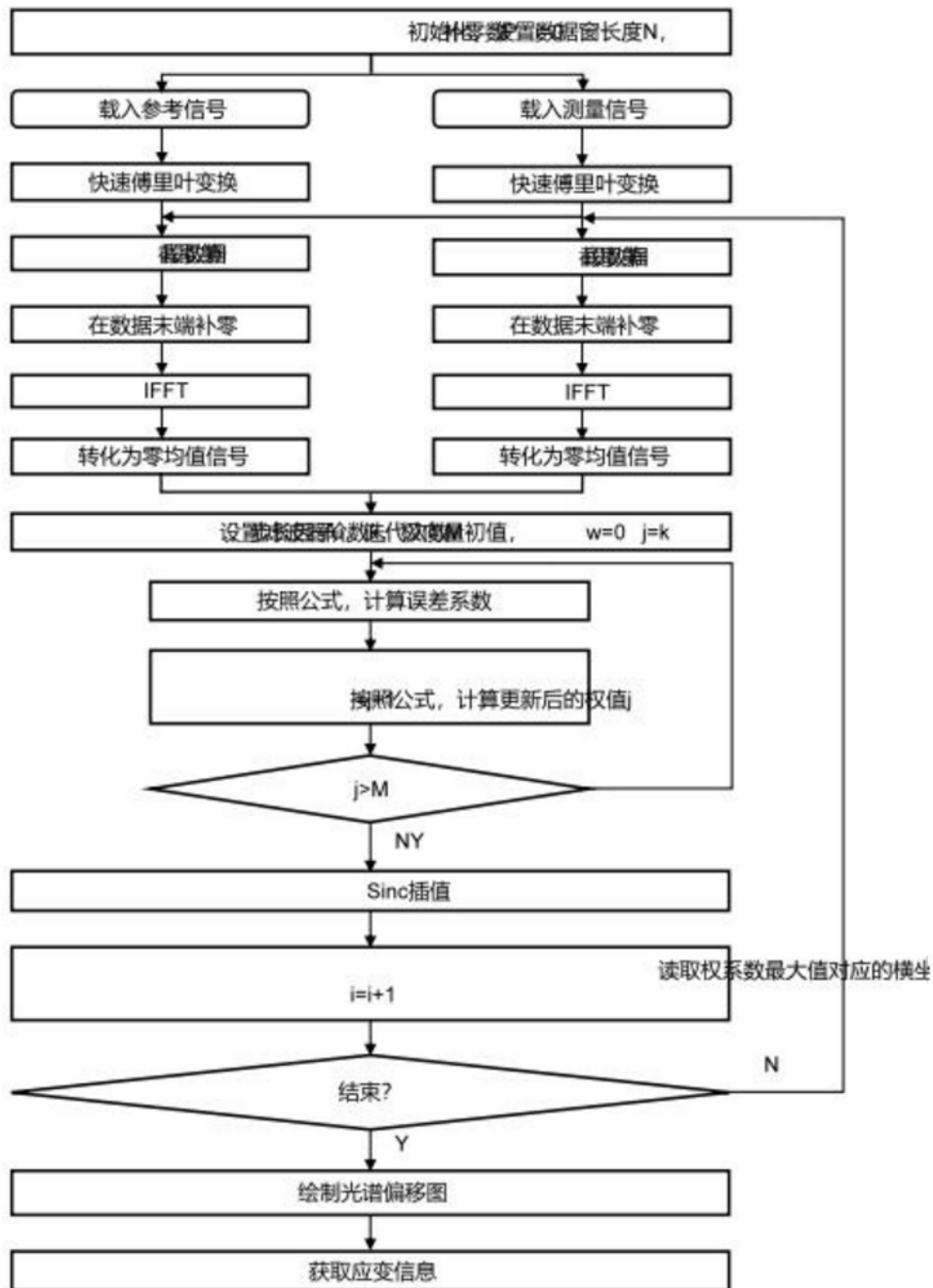


图2

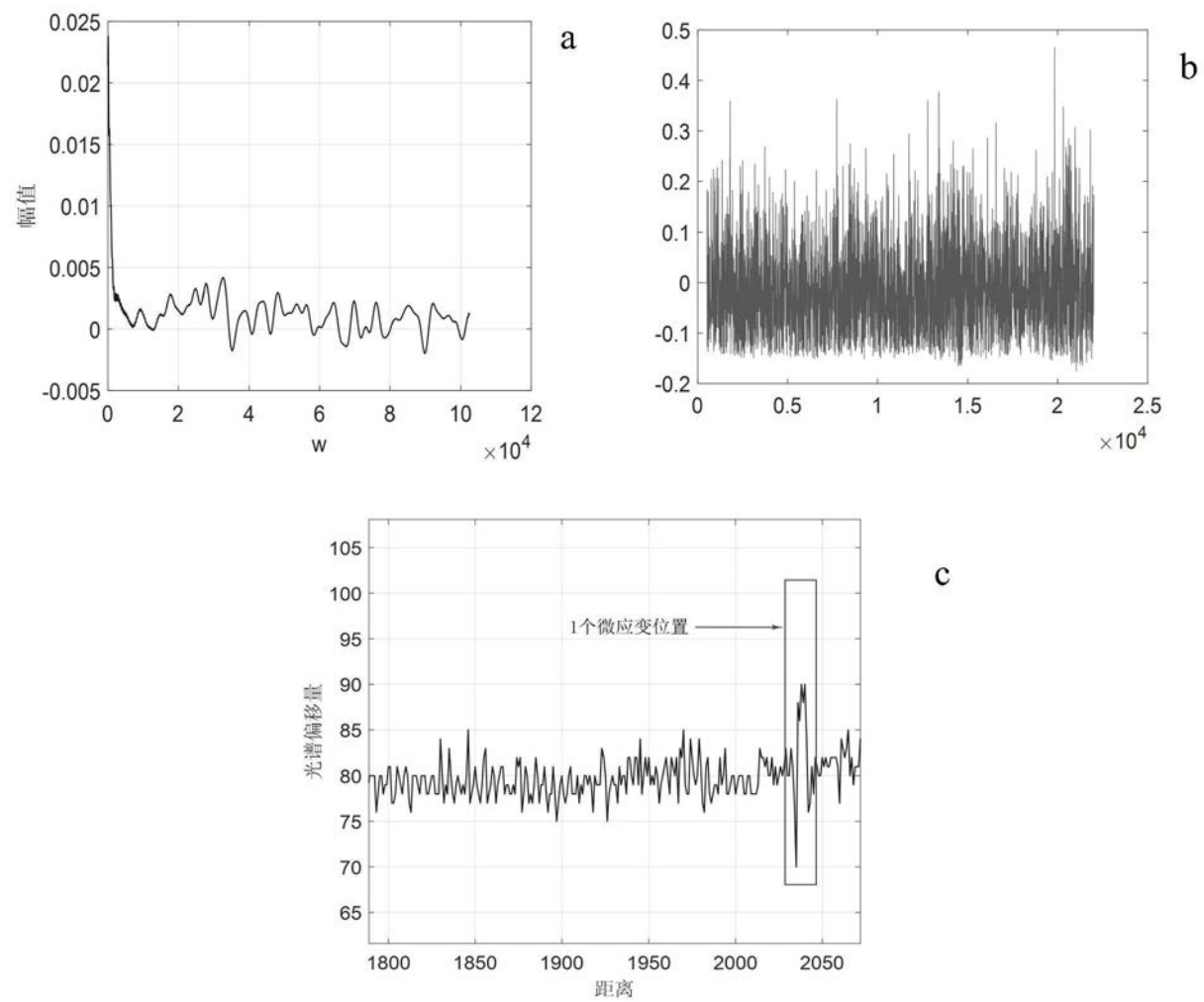


图3

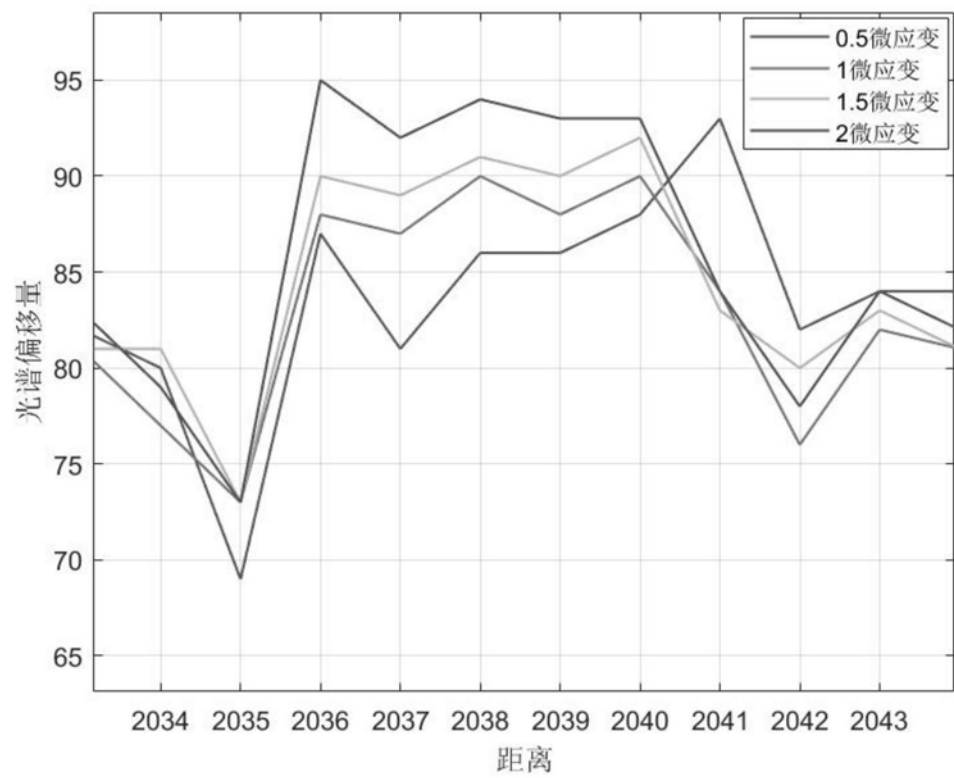


图4