



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 105488935 B

(45)授权公告日 2018.01.16

(21)申请号 201510993836.0

(22)申请日 2015.12.25

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 105488935 A

(43)申请公布日 2016.04.13

(73)专利权人 天津大学
地址 300072 天津市南开区卫津路92号

(72)发明人 刘琨 刘铁根 江俊峰 马春宇
柴天娇 何畅 田苗 李志辰

(74)专利代理机构 天津佳盟知识产权代理有限公司 12002

代理人 刘书元

(51)Int.Cl.
G08B 13/186(2006.01)
G01D 5/353(2006.01)

(56)对比文件

- CN 102064884 A, 2011.05.18,
- CN 102117525 A, 2011.07.06,
- CN 104482858 A, 2015.04.01,
- CN 105092018 A, 2015.11.25,
- CN 102291181 A, 2011.12.21,
- CN 102997945 A, 2013.03.27,
- US 2008/0050124 A1, 2008.02.28,

审查员 肖丹卉

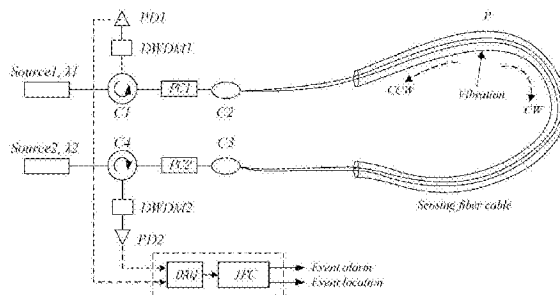
权利要求书1页 说明书5页 附图2页

(54)发明名称

一种基于非对称双Mach-Zehnder干涉的分布式光纤扰动定位系统及其定位方法

(57)摘要

本发明提出了一种基于非对称双Mach-Zehnder干涉的分布式光纤扰动定位系统及其定位方法,与传统的双Mach-Zehnder分布式光纤扰动传感系统不同,本发明使用两个窄带光源和在探测器前加入了相应的密集波分复用器(DWDM),能够大大滤除光纤背向散射噪声,解决由于背向散射影响在传感距离较长时信噪比过低的问题。同时,提供了一种能够用于以上系统的定位方法,该方法利用基于短时平均频率的快速时频分析方法得到扰动帧信号的时频分布,并将频率最大点附近的点作为有效信号段进行互相关时延估计求得时延,进而获得扰动位置,该方法能够对系统中非对称扰动信号进行定位,具有较高的定位精度和稳定性。



1. 一种基于非对称双Mach-Zehnder干涉的分布式光纤扰动定位系统,其特征在于该系统包括:

光源:采用两个波长为1550nm附近窄带宽分布式反馈激光器DFB,两光源波长差大于本系统所用密集波分复用器DWDM的波长间隔;

光环行器:用来将光源发出的光传输到待检测物体并收集反射信号光;

DWDM:工作波长1500nm附近两个商用单通道DWDM,光谱透射范围分别只包含系统所用的一只光源的波长;

光电探测器:铟镓砷光电探测器PD,接收光信号,进行光电转换并放大;

光纤耦合器:3dB光纤耦合器,用于1:2分光;

偏振控制器:调整两路干涉信号偏振态,保证信号可见度;

传感光缆:G.652D通信光缆,用于感知外界扰动及传导光信号;

数据采集卡:采样率为10MS/s双通道数据采集卡DAQ,对两个光电探测器的电压信号进行采集,并送入计算机处理;

处理单元:包括通用计算机和嵌入式计算系统,采集卡接收的干涉信号进行处理,最终获取扰动信息;

其中光源和相应的DWDM所构成的背向散射光滤除装置为任意波长光源和光滤波器组合;当光源功率较大时,采用光纤耦合器替代光环行器。

2. 一种用于权利要求1所述系统的定位方法,其特征在于:

利用基于短时平均频率的时频分析方法得到扰动帧信号的时频分布,并将频率最大点附近的点作为有效信号段进行互相关时延估计,求得时延 d ,进而获得扰动位置 x ,具体算法流程如下:

1) 设一对阈值门限 δ_1 、 δ_2 和一个幅值阈值 ϵ ,其中 $\delta_1 < 0$, $\delta_2 > 0$ 且 $|\delta_1| = |\delta_2| = \epsilon$,针对任意一个阈值门限,求得过阈值点位置的公式如下:

$$\begin{cases} C_i(m) = m \cdot \phi \{ [x(m) - \delta_i < 0] \& [x(m+1) - \delta_i > 0] \} \\ \phi[x(n)] = \begin{cases} 1, & x(n) > 0 \\ 0, & x(n) = 0 \end{cases}, \quad m, n \in [1, N-1], i = 1, 2 \end{cases}$$

其中 $x(m)$ 为信号段中第 m 点的幅值, $C_i(m)$ 为所求的过阈值点位置,把 $\delta = \delta_1$ 、 $\delta = \delta_2$ 分别代入公式中并依次对一帧点数为 N 的信号进行处理即可求得各自的过门限点位置 $C_1(m)$ 和 $C_2(n)$, $m, n \in [1, N-1]$;

2) 取 $C_1(m)$ 和 $C_2(n)$ 中大于0的项按从小到大共同排序,选取其中满足 $C_1(m) < C_2(n)$ 的相邻两项来确定信号的过零点位置 $Z(k)$,其中 $Z(k) = [C_1(m) + C_2(n)]/2$, $k = 1, 2, 3, \dots$,位于相邻两过零位置间信号的短时平均频率可以表示为: $f(k) = 1/[Z(k+1) - Z(k)]$;

3) 对求得的短时平均频率点进行三次样条差值拟合,用拟合曲线来代表信号的时频分布,将频率最大点附近的点作为有效信号段,对两路有效信号的时频分布曲线进行归一化和时域上的互相关估计,即可确定时延 d ,进而算出扰动位置 x 。

3. 根据权利要求2所述的定位方法,其特征在于,所述扰动帧信号的时频分布曲线为现有技术任一时频分析方法获得扰动信号的时频分布曲线,再进行互相关求得时延 d ,进而获得扰动位置 x 。

一种基于非对称双Mach-Zehnder干涉的分布式光纤扰动定位系统及其定位方法

技术领域

[0001] 本发明属于传感及检测技术领域,特别涉及一种基于非对称干涉的分布式光纤扰动传感定位系统。

背景技术

[0002] 双马赫-曾德(Mach-Zehnder)型分布式光纤扰动传感系统采用光波干涉技术实现入侵扰动检测及定位,具有长距离监控、高精度定位功能、低能源依赖性、高环境耐受性、抗电磁干扰、抗腐蚀等特性。近年来,谢尚然等(Shangran Xie, et, al. Positioning error prediction theory for dual Mach-Zehnder interferometric vibration sensor, Journal of Lightwave Technology, 2011, 29:362-368)分析了系统中多种噪声对定位精度的影响,并对不同信噪比下的系统定位精度进行预测。陈沁楠等(Qinnan Chen, et, al. An Elimination Method of Polarization-Induced Phase Shift and Fading in Dual Mach-Zehnder Interferometry Disturbance Sensing System, Journal of Lightwave Technology, 2013, 31:3135-3141)通过高效偏振控制方法对系统中偏振噪声进行补偿,提高了系统定位精度。黄翔东等(Xiangdong Huang, et, al. Configurable Filter-Based Endpoint Detection in DMZI Vibration System, Photonics Technology Letters, 2014, 26:1956-1959)利用全相位滤波器对扰动起始点准确定位。

[0003] 目前,当传感距离较短时,双Mach-Zehnder分布式光纤扰动传感系统的定位精度可以达到20m以内(采样率10MS/s,理论精度为10m)。然而受限于系统光路结构,随着传感距离增加,光纤中背向散射噪声对系统信噪比影响愈发明显,严重影响系统定位精度,制约着该系统的传感距离。

[0004] 发明目的

[0005] 本发明的目的是解决双Mach-Zehnder分布式光纤扰动传感系统由于背向散射影响在传感距离较长时信噪比过低的问题,提出一种非对称型双Mach-Zehnder分布式光纤扰动传感系统。该系统利用光学滤波的方法消除光纤背向散射光对信号的影响,大大提高了系统在长距离应用时的信噪比。

[0006] 本发明技术方案是:

[0007] 一种基于非对称双Mach-Zehnder干涉的分布式光纤扰动定位系统,其特征在于该系统包括:

[0008] 光源:采用两个波长为1550nm附近窄带宽分布式反馈激光器(DFB),两光源波长差大于本系统所用密集波分复用器(DWDM)的波长间隔;

[0009] 光环行器:用来将光源发出的光传输到待检测物体并收集反射信号光;

[0010] DWDM:工作波长1500nm附近两个商用单通道DWDM,光谱透射范围分别只包含系统所用的一只光源的波长;

[0011] 光电探测器:铟镓砷光电探测器(PD),接收光信号,进行光电转换并放大;

- [0012] 光纤耦合器:3dB光纤耦合器,用于1:2分光;
- [0013] 偏振控制器:调整两路干涉信号偏振态,保证信号可见度;
- [0014] 传感光缆:G.652D通信光缆,用于感知外界扰动及传导光信号;
- [0015] 数据采集卡:采样率为10MS/s双通道数据采集卡(DAQ),对两个光电探测器的电压信号进行采集,并送入计算机处理;
- [0016] 处理单元:包括通用计算机和嵌入式计算系统,采集卡接收的干涉信号进行处理,最终获取扰动信息。

[0017] 进一步的,光源和相应的DWDM所构成的背向散射光滤除装置为任意波长光源和光滤波器组合。

[0018] 进一步的,当光源功率较大时,采用光纤耦合器替代光环行器。

[0019] 本发明还提供了一种可以应用与上述系统的定位方法,利用基于短时平均频率的时频分析方法得到扰动帧信号的时频分布,并将频率最大点附近的点作为有效信号段进行互相关时延估计,求得时延 d ,进而获得扰动位置 x ,具体算法流程如下:

[0020] 1) 设一对阈值门限 δ_1 、 δ_2 和一个幅值阈值 ε ,其中 $\delta_1 < 0$, $\delta_2 > 0$ 且 $|\delta_1| = |\delta_2| = \varepsilon$ (为了滤除电路噪声, 2ε 需要大于噪声的幅值)。针对任意一个阈值门限,求得过阈值点位置的公式如下:

$$[0021] \quad \begin{cases} C_i(m) = m \cdot \phi \{ [x(m) - \delta_i < 0] \& [x(m+1) - \delta_i > 0] \} \\ \phi[x(n)] = \begin{cases} 1, & x(n) > 0 \\ 0, & x(n) = 0 \end{cases}, \quad m, n \in [1, N-1], i = 1, 2 \end{cases}$$

[0022] 其中 $x(m)$ 为信号段中第 m 点的幅值, $C_i(m)$ 为所求的过阈值点位置,把 $\delta = \delta_1$ 、 $\delta = \delta_2$ 分别代入公式中并依次对一帧点数为 N 的信号进行处理即可求得各自的过门限点位置 $C_1(m)$ 和 $C_2(n)$, $m, n \in [1, N-1]$ 。

[0023] 2) 取 $C_1(m)$ 和 $C_2(n)$ 中大于0的项按从小到大共同排序,我们选取其中满足 $C_1(m) < C_2(n)$ 的相邻两项来确定信号的过零点位置 $Z(k)$,其中 $Z(k) = [C_1(m) + C_2(n)]/2$, $k = 1, 2, 3, \dots$,位于相邻两过零位置间信号的短时平均频率可以表示为: $f(k) = 1/[Z(k+1) - Z(k)]$;

[0024] 3) 对求得的短时平均频率点进行三次样条差值拟合,用拟合曲线来代表信号的时频分布,将频率最大点附近的点作为有效信号段,对两路有效信号的时频分布曲线进行归一化和时域上的互相关估计,即可确定时延 d ,进而算出扰动位置 x 。

[0025] 进一步的,所述方法中扰动信号的时频分布曲线为现有技术任一时频分析方法获得扰动信号的时频分布曲线,再进行互相关求得时延 d ,进而获得扰动位置 x 。

[0026] 本发明有益效果是:与传统的双Mach-Zehnder分布式光纤扰动传感系统不同,本发明系统使用两个窄带光源和在探测器前加入了相应的密集波分复用器(DWDM),能够大大滤除光纤背向散射噪声,解决由于背向散射影响在传感距离较长时信噪比过低的问题。同时,提供的能够用于以上系统的定位方法,利用基于短时平均频率的快速时频分析方法得到扰动帧信号的时频分布,并将频率最大点附近的点作为有效信号段进行互相关时延估计求得时延,进而获得扰动位置。该方法能够对系统中非对称扰动信号进行定位,具有较高的定位精度和稳定性。

附图说明

- [0027] 图1是分布式光纤扰动定位系统定位原理图；
 [0028] 图2是分布式光纤扰动定位系统示意图；
 [0029] 图3是扰动信号的原始信号图；
 [0030] 图4是扰动信号的时频分布图；

具体实施方式

[0031] 1、本发明所提供的非对称型双Mach-Zehnder光纤扰动传感系统原理如下：

[0032] 基于非对称型双Mach-Zehnder干涉原理的分布式光纤传感系统原理如图1所示，光源1和光源2发出的两束光在传感环路中分别沿顺时针和逆时针方向传播，并在对端的耦合器发生干涉。由光源1发出的光传播路径为C1-PC1-C2-C3-C4-DWDM2-PD2。光源2发出的光传播路径为C4-PC2-C3-C2-C1-DWDM1-PD1。其中，C1、C4为环形器，C2、C3为3dB耦合器，PC1、PC2为偏振控制器，DWDM1、DWDM2为密集波分复用器，PD1、PD2为光电探测器。设两个光电探测器PD1和PD2检测到同一扰动事件的时间分别为 t_1 和 t_2 ， $d = t_1 - t_2$ ，L为传感光缆的长度，x为扰动点距离耦合器C2的位置，其定位公式为

$$[0033] \quad x = (L - vd) / 2$$

[0034] 式中，v为光波在单模光纤中的传播速度，单位m/s，其中 $v = c/n$ ，c是光在真空中的速度（ 3×10^8 m/s），n是光纤的折射率。

[0035] 2、本发明同时提供的基于上述系统的高精度定位方法：

[0036] 在传统的双Mach-Zehnder分布式光纤扰动定位系统中，时延d是通过两路干涉信号进行互相关运算来进行估计的。本发明提供的基于非对称型双Mach-Zehnder原理的系统中，由于光源1和光源2的波长不同，由探测器PD1和PD2检测到的两路干涉信号具有不一致性，无法通过直接互相关进行时延估计。这两路干涉信号可以表示为：

$$[0037] \quad \begin{cases} I_1(t) = \cos\left[2\pi \cdot \frac{f(t)}{\lambda_2} + \phi_1\right] + n_1(t) \\ I_2(t) = \cos\left[2\pi \cdot \frac{f(t-d)}{\lambda_1} + \phi_2\right] + n_2(t) \end{cases}$$

[0038] 式中， $I_1(t)$ 、 $I_2(t)$ 为两路干涉信号光强， λ_1 、 λ_2 分别为光源1和光源2的波长， $f(t)$ 为扰动引起的光程差变化， ϕ_1 、 ϕ_2 为初始相位差， $n_1(t)$ 、 $n_2(t)$ 为各自的电路噪声。在滤除电路噪声的条件下， $I_1(t)$ 、 $I_2(t)$ 的频率分别与 $f(t)$ 和 $f(t-d)$ 成正比。因此，为了求时延d，可以先获得两路信号的时频分布，再对两路信号的时频分布进行归一化和互相关。

[0039] 本发明中我们先用双门限过零检测的方法滤除电路噪声并找出扰动信号的过零点位置，再利用相邻过零点之间的信号点数的倒数来估计该段信号的平均频率，并对平均频率点进行三次样条差值拟合，得到信号的时频分布；最后对时频分布曲线进行互相关求得时延d，具体算法流程如下所示：

[0040] 1) 设一对阈值门限 δ_1 、 δ_2 和一个幅值阈值 ϵ ，其中 $\delta_1 < 0$ ， $\delta_2 > 0$ 且 $|\delta_1| = |\delta_2| = \epsilon$ （为了滤除电路噪声， 2ϵ 需要大于噪声的幅值）。针对任意一个阈值门限，求得过阈值点位置的公

式如下：

$$[0041] \quad \begin{cases} C_i(m) = m \cdot \phi \{ [x(m) - \delta_i < 0] \& [x(m+1) - \delta_i > 0] \} \\ \phi[x(n)] = \begin{cases} 1, & x(n) > 0 \\ 0, & x(n) = 0 \end{cases}, \quad m, n \in [1, N-1], i = 1, 2 \end{cases}$$

[0042] 其中 $x(m)$ 为信号段中第 m 点的幅值, $C_i(m)$ 为所求的过阈值点位置,把 $\delta = \delta_1, \delta = \delta_2$ 分别代入公式中并依次对一帧点数为 N 的信号进行处理即可求得各自的过门限点位置 $C_1(m)$ 和 $C_2(n)$, $m, n \in [1, N-1]$ 。

[0043] 2) 取 $C_1(m)$ 和 $C_2(n)$ 中大于0的项按从小到大共同排序。我们选取其中满足 $C_1(m) < C_2(n)$ 的相邻两项来确定信号的过零点位置 $Z(k)$,其中 $Z(k) = [C_1(m) + C_2(n)]/2, k = 1, 2, 3, \dots$ 。位于相邻两过零位置间信号的短时平均频率可以表示为: $f(k) = 1/[Z(k+1) - Z(k)]$ 。

[0044] 3) 对求得的短时平均频率点进行三次样条差值拟合,用拟合曲线来代表信号的时频分布。将频率最大点附近的点作为有效信号段,对两路有效信号的时频分布曲线进行归一化和时域上的互相关估计,即可确定时延 d ,进而算出扰动位置 x 。

[0045] 本发明扰动信号的时频分布曲线为现有技术任一时频分析方法获得扰动信号的时频分布曲线。

[0046] 实施例1:用于定位的分布式光纤扰动传感系统

[0047] 该系统结构如图2所示,包括9个部分:

[0048] 光源1a、1b:采用波长为1550nm附近窄带宽分布式反馈激光器(DFB),两光源波长差大于3)中密集波分复用器(DWDM)的波长间隔;

[0049] 光环行器2a、2b:用来将光源发出的光传输到待检测物体并收集反射信号光,当光源功率较大时,可采用光纤耦合器替代;

[0050] 波分复用器DWDM 3a、3b:工作波长1500nm附近商用单通道DWDM,其中3a的光谱透射范围包含光源1b的中心波长,3b的光谱透射范围包含光源1a的中心波长,;

[0051] 光电探测器4a、4b:铟镓砷光电探测器(PD),接收光信号,进行光电转换并放大。

[0052] 光纤耦合器5a、5b:3dB光纤耦合器,用于1:2分光;

[0053] 偏振控制器6a、6b:调整两路干涉信号偏振态,保证信号可见度。

[0054] 传感光缆7:G.652D通信光缆,用于感知外界扰动及传导光信号;

[0055] 数据采集卡8:采样率为10MS/s双通道数据采集卡(DAQ),对两个光电探测器4a和4b的电压信号进行采集,并送入计算机处理。

[0056] 处理单元9:包括通用计算机和嵌入式计算系统,对采集卡接收的干涉信号进行处理,最终获取扰动信息。

[0057] 实施例2:基于过零率分析的分布式光纤传感定位算法

[0058] 如图2所示,数据采集卡采集两路信号并将信号送入计算机。计算机基于短时平均频率的时频分析方法得到扰动帧信号的时频分布,并将频率最大点附近的点作为有效信号段进行互相关时延估计。

[0059] 以下对图2所示的系统,用某次定位实例来说明计算过程:

[0060] 该系统的参数设定如下:传感光纤总长度为61km,其中1km为铠装光缆,其余60km为裸纤,光源1a和光源1b的波长分别为1550.74nm和1549.95nm,功率均为10mW,两个DWDM的

中心波长分别为1550.12nm和1550.92nm,带宽均为 $\pm 0.22\text{nm}$,采集卡的采样频率为10M/s,采样时间为0.3s,有效信号点数对应的采样时间设为0.02s。

[0061] 在光缆的800m处敲击光缆,系统采集到的原始信号如图3所示,可以看出图中虚线和实线两信号具有较高的信噪比,且两信号之间有一个明显的时延差。图4是信号的时频分布图,可以发现虚线实线两条时频分布曲线趋势基本一致,因此可以利用互相关求得时延。

[0062] 为了说明该算法的有效性,在800m处以敲击方式进行200组定位实验,定位误差分布如下表所示。

	定位误差	0~ $\pm 20\text{m}$	20~ $\pm 50\text{m}$	$\pm 50\sim\pm 100\text{m}$	$>\pm 100\text{m}$
[0063]	百分比	51.2	30.6	11.4	6.8

[0064] 在61km的传感距离下,定位误差在50m以内的概率达到80%,均方差为42.25m。具有较高的定位精度和可靠性。

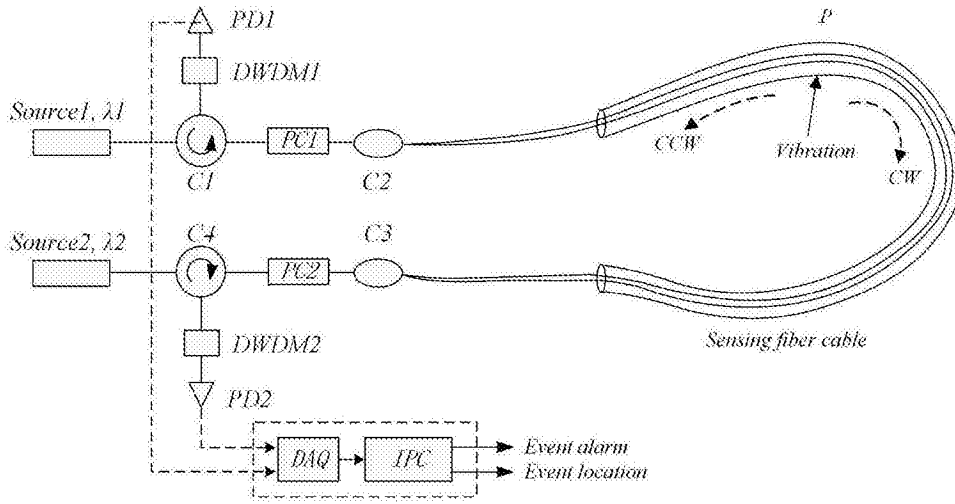


图1

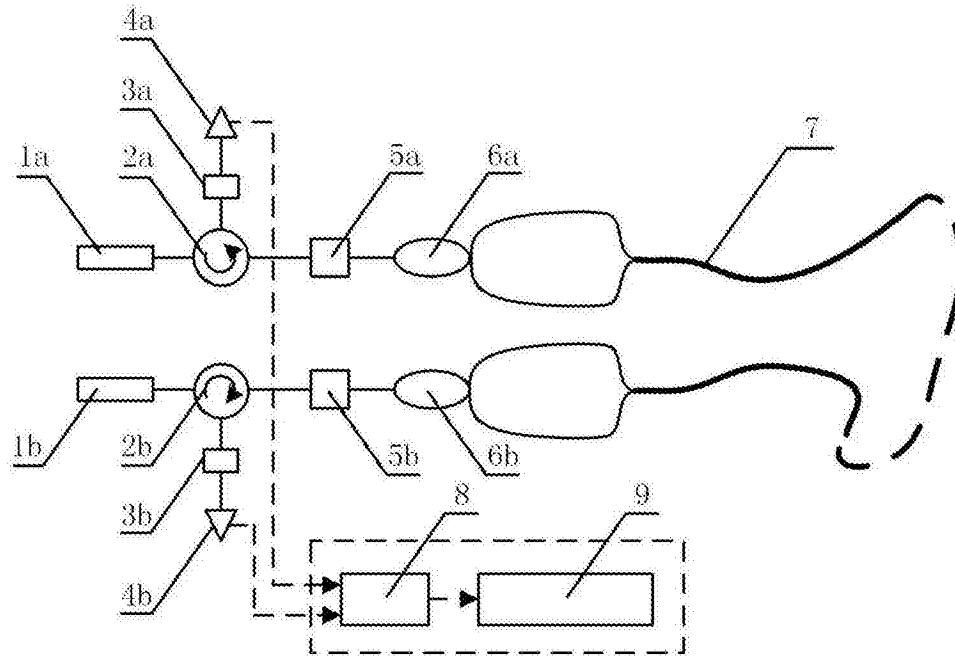


图2

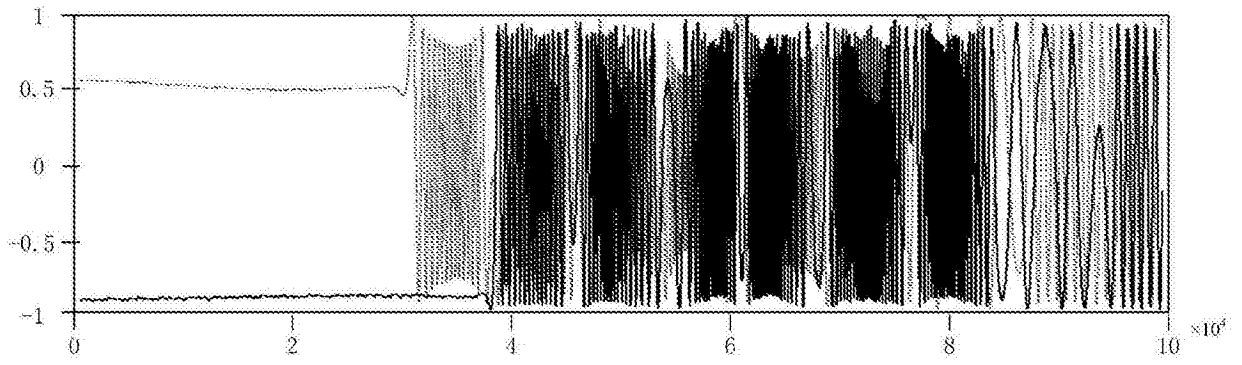


图3

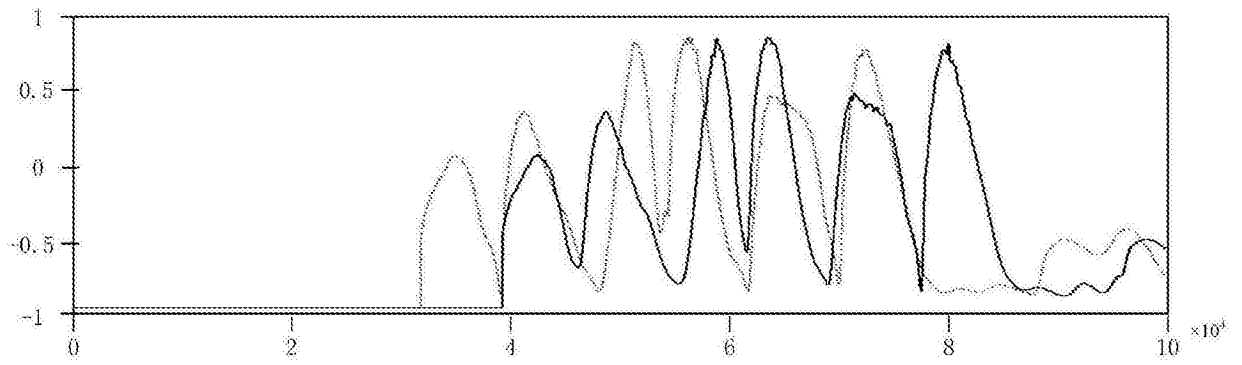


图4