



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 105067104 A

(43) 申请公布日 2015. 11. 18

(21) 申请号 201510593821. 5

(22) 申请日 2015. 09. 17

(71) 申请人 天津大学

地址 300072 天津市南开区卫津路 92 号

(72) 发明人 封皓 施羿 沙洲 曾周末

靳世久

(74) 专利代理机构 天津市北洋有限责任专利代

理事务所 12201

代理人 李林娟

(51) Int. Cl.

G01H 9/00(2006. 01)

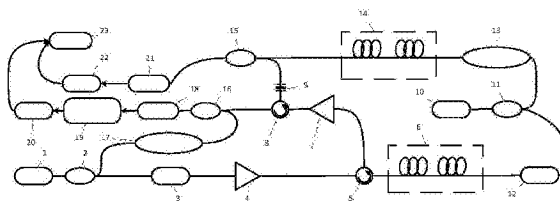
权利要求书1页 说明书6页 附图1页

(54) 发明名称

一种复合型光纤传感系统和传感方法

(57) 摘要

本发明公开了一种复合型光纤传感系统和传感方法,本发明拥有和相敏 OTDR 一样的定位精度,同时可以获得振动的高频细节,进而进行精确的振动类型识别,有效降低系统的误报率。由于相敏 OTDR 使用反向瑞利散射光进行探测,其反射光强度极低,而干涉仪光强功率大,导致相敏 OTDR 的光信号易被淹没于干涉仪的信用中。引入 FBG,系统成功实现了干涉仪和散射仪的光路结合以及光信号分离,使得系统结构相对简单,成本较低。通过对超窄线宽激光光源的瑞丽散射信号进行改进型移动平均算法和小波信息熵算法可得到振动精确位置。窄线宽激光光源的干涉信号则包含丰富频率信息,对其进行小波包分解,经由神经网络可判别出振动种类,降低了误报率。



1. 一种复合型光纤传感系统,包括:用于振动检测的传感光纤,还包括:正向注入传感光纤的超窄线宽激光光源,其特征在于,

超窄线宽激光光源发出的连续探测光经过一个声光调制器调制为脉冲光,再经过第一掺铒光纤放大器放大后,通过第一环形器注入传感光纤;

背向瑞利散射光反向到达第一环形器,从另一端口通过第二掺铒光纤放大器、第二环形器到达光纤布拉格光栅;

窄线宽激光光源发出的探测光经过第一 1:1 耦合器分为 2 束,一束通过隔离器反向注入传感光纤,另一束通过第一偏振控制器反向注入参考臂光纤;

选取超窄线宽激光光源和窄线宽激光光源的激光频率,使超窄线宽激光光源的激光频率落在光纤布拉格光栅的反射带内,窄线宽激光光源的激光频率处在光纤布拉格光栅的通带内;

瑞利散射光将被光纤布拉格光栅反射重新进入第二环形器,并从第二环形器的另一出口到达第一光电探测器,光信号转换为电信号,并被第一采集卡采集;

窄线宽激光光源的探测光和反射功率低于 1% 的瑞利散射光通过光纤布拉格光栅,与通过参考臂光纤的探测光在第三 1:1 耦合器处发生干涉;

干涉光由第二光电探测器检测到,转化为光信号,经第二采集卡采集后传输给计算机进行处理。

2. 根据权利要求 1 所述的一种复合型光纤传感系统,其特征在于,所述系统还包括: 1:99 耦合器和第二偏振控制器,

超窄线宽激光光源通过 1:99 耦合器分离出 1% 的激光作为本振光,通过第二偏振控制器到达第二 1:1 耦合器,与超窄线宽激光光源的瑞利散射光相干涉,形成光外差探测。

3. 一种用于权利要求 1-2 中任一权利要求所述的复合型光纤传感系统的传感方法,其特征在于,所述传感方法包括以下步骤:

将瑞利散射光按时间顺序截断为多条散射迹线;对 K 条散射迹线进行平均,获取 T 条平均曲线;

抽取时域信号,分别计算各个时域信号的小波信息熵;

将小波信息熵作为 K 条散射迹线时间内的综合评价,小波信息熵增大时,表明对应位置 j 处发生振动,用于确定振动位置;

对振动信号进行分类。

## 一种复合型光纤传感系统和传感方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及光纤传感领域,尤其涉及一种基于布拉格光栅、马赫-曾德干涉仪和相位型光时域反射仪原理的复合型光纤传感系统和传感方法。

### 背景技术

[0002] 分布式光纤传感系统由于其灵敏度高,不受电磁干扰,检测范围广,成本低等特点,广泛应用于长距离油气管道监测及周界安防,建筑结构健康监测等领域,是近数十年的研究热点。

[0003] Mach-Zehnder/Sagnac 干涉仪分布式光纤传感系统,利用检测两传感光路中由外界扰动所造成的相位差变化,并通过相关时延估计的方法进行定位,能对振动进行良好的感知。但由于相关时延估计方法本身确定时延的难度性,使得该方法定位精度不高,对振动点的准确判断困难重重。

[0004] 基于相干瑞利散射的相位敏感型光时域反射技术(相敏 OTDR、 $\Phi$ -OTDR),通过使用长相干光源,检测光脉冲返回光的相干结果,其干涉方法能有效实现动态响应,能同时实现高定位精度和高灵敏度检测,尤其是对于微弱扰动信号的检测。但是由于其发射脉冲的频率受到光纤长度的限制,其频率响应非常低,导致无法对振动事件进行有效的识别,误报率高。

### 发明内容

[0005] 本发明提供了一种复合型光纤传感系统和传感方法,本发明实现了对振动事件的定位和识别,有效降低了误报率,详见下文描述:

[0006] 一种复合型光纤传感系统,包括:用于振动检测的传感光纤,还包括:正向注入传感光纤的超窄线宽激光光源,

[0007] 超窄线宽激光光源发出的连续探测光经过一个声光调制器调制为脉冲光,再经过第一掺铒光纤放大器放大后,通过第一环形器注入传感光纤;

[0008] 背向瑞利散射光反向到达第一环形器,从另一端口通过第二掺铒光纤放大器、第二环形器到达光纤布拉格光栅;

[0009] 窄线宽激光光源发出的探测光经过第一 1:1 耦合器分为 2 束,一束通过隔离器反向注入传感光纤,另一束通过第一偏振控制器反向注入参考臂光纤;

[0010] 选取超窄线宽激光光源和窄线宽激光光源的激光频率,使超窄线宽激光光源的激光频率落在光纤布拉格光栅的反射带内,窄线宽激光光源的激光频率处在光纤布拉格光栅的通带内;

[0011] 瑞利散射光将被光纤布拉格光栅反射重新进入第二环形器,并从第二环形器的另一出口到达第一光电探测器,光信号转换为电信号,并被第一采集卡采集;

[0012] 窄线宽激光光源的探测光和反射功率低于 1% 的瑞利散射光通过光纤布拉格光栅,与通过参考臂光纤的探测光在第三 1:1 耦合器处发生干涉;

[0013] 干涉光由第二光电探测器检测到,转化为光信号,经第二采集卡采集后传输给计算机进行处理。

[0014] 所述系统还包括:1:99 耦合器和第二偏振控制器,

[0015] 超窄线宽激光光源通过 1:99 耦合器分离出 1% 的激光作为本振光,通过第二偏振控制器到达第二 1:1 耦合器,与超窄线宽激光光源的瑞利散射光相干涉,形成光外差探测。

[0016] 一种复合型光纤传感方法,所述传感方法包括以下步骤:

[0017] 将瑞利散射光按时间顺序截断为多条散射迹线;对 K 条散射迹线进行平均,获取 T 条平均曲线;

[0018] 抽取时域信号,分别计算各个时域信号的小波信息熵;

[0019] 将小波信息熵作为 K 条散射迹线时间内的综合评价,小波信息熵增大时,表明对应位置 j 处发生振动,用于确定振动位置;

[0020] 对振动信号进行分类。

[0021] 本发明提供的技术方案的有益效果是:本发明提供了一种信号分辨率高,噪声水平低、灵敏度高、定位精度高、频率分辨率高、误报率低的分布式光纤振动传感系统。解决了复用中干涉仪和散射仪光信号的混合分离问题,提高了系统的信号质量,使信号便于探测,提高了系统的稳定程度,同时,克服了现有系统不能兼有高定位精度和高频率分辨率的问题,该系统同时具有分布式光纤检测系统所特有的分布式、受电磁等外界干扰小等特点,且安装方便,可以很好的满足各种振动检测和监测应用,尤其是长距离的管道监测与周界安防等。

## 附图说明

[0022] 图 1 为一种复合型光纤传感系统的结构示意图;

[0023] 图 2(a) 为振动信号时域波形的示意图;

[0024] 图 2(b) 为振动信号小波包分解结果的示意图。

[0025] 附图中,各标号所代表的部件列表如下:

- |                       |                |
|-----------------------|----------------|
| [0026] 1:超窄线宽激光光源;    | 2:1:99 耦合器;    |
| [0027] 3:声光调制器;       | 4:第一掺铒光纤放大器;   |
| [0028] 5:第一环形器;       | 6:传感光纤;        |
| [0029] 7:第二掺铒光纤放大器;   | 8:第二环形器;       |
| [0030] 9:FBG;         | 10:窄线宽激光光源;    |
| [0031] 11:第一 1:1 耦合器; | 12:隔离器;        |
| [0032] 13:第一偏振控制器;    | 14:参考臂光纤;      |
| [0033] 15:第一环形器;      | 16:第二 1:1 耦合器; |
| [0034] 17:第二偏振控制器;    | 18:第一光电探测器;    |
| [0035] 19:调幅解调电路;     | 20:第一采集卡;      |
| [0036] 21:第二光电探测器;    | 22:第二采集卡;      |
| [0037] 23:计算机。        |                |

## 具体实施方式

[0038] 为使本发明的目的、技术方案和优点更加清楚,下面对本发明实施方式作进一步地详细描述。

[0039] 光纤布拉格光栅 (FBG) 技术,通过将光纤特定位置制成折射率周期分布的光栅区,对特定波长范围内的光波进行反射,对其他波长光波进行透射,其特点是可具有极高的反射率和很窄的反射带宽。

[0040] 本发明实施例设计的光纤传感系统成功结合了 Mach-Zehnder 干涉仪和相敏 OTDR 技术,使系统同时拥有极高的定位精度和很高的频率响应;引入 FBG,实现干涉仪光信号与 OTDR 光信号的光分离,有效提高了两部分光信号的质量(即提高信噪比),使得系统能够准确地对振动事件进行定位和识别,有效降低误报率。

[0041] 实施例 1

[0042] 一种基于相敏 OTDR 原理、Mach-Zehnder 干涉仪原理、FBG 波分复用原理的复合型光纤传感系统,包括:在需要检测振动的范围内铺设一条传感光纤 6,利用传感光纤 6 作为传感器和信号传输介质,实现振动的检测和监测;使用一超窄线宽激光光源 1(线宽数百 kHz)作为相敏 OTDR 部分光源(光频率  $\nu_1$ ),正向向传感光纤 6 注入探测光。

[0043] 其中,超窄线宽激光光源 1 发出的连续探测光经过一个声光调制器 (AOM) 3 调制为脉冲光,再经过第一掺铒光纤放大器 (EDFA) 4 放大后,通过第一环形器 5 注入传感光纤 6。探测光脉冲沿传感光纤 6 传播,沿途若有振动事件发生,其背向瑞利散射光的光相位将受到振动事件调制,导致背向瑞利散射光的光强发生变化。

[0044] 之后,背向瑞利散射光反向到达环形器 5,从另一端口通过第二掺铒光纤放大器 (EDFA) 7 到达第二环形器 8,在第二环形器 8 的出口端到达一窄带的高反射率的 FBG(例如,反射率 99%,3dB 反射波长为 1550.0nm-1550.3nm) 9;

[0045] 另一方面,使用一个窄线宽激光光源 10(线宽数 MHz)作为 Mach-Zehnder 干涉仪部分光源,其光频率  $\nu_2$  较  $\nu_1$  有微小差别(差别零点几个 nm,如  $\nu_1$  为 1550.2nm,  $\nu_2$  为 1549.9nm),其中,来自超窄线宽激光光源 1 的探测光与来自窄线宽激光光源 10 的探测光共用同一根传感光纤 6,同时窄线宽激光光源 10 使用同一光缆中的另一根光纤作为参考光纤。窄线宽激光光源 10 发出的探测光经过第一 1:1 耦合器 11 分为 2 束,一束通过隔离器 12 反向注入传感光纤 6,另一束通过第一偏振控制器 13 反向注入参考臂光纤 14。这里,隔离器 12 用于防止来自超窄线宽激光光源 1 的探测光进入窄线宽激光光源 10 中,造成器件损坏。

[0046] 传感光纤 6 内的探测光,受到沿途振动信号的调制,到达第一环形器 5,经过第二掺铒光纤放大器 7(EDFA) 和第二环形器 8 到达 FBG 9。此时,在 FBG 9 前端,窄线宽激光光源 10 的探测光和超窄线宽激光光源 1 的瑞利散射光处于混合状态。

[0047] 通过选取超窄线宽激光光源 1 和窄线宽激光光源 10 的激光频率,使得超窄线宽激光光源 1 的激光频率落在 FBG 9 的反射带内,而窄线宽激光光源 10 的激光频率处在 FBG9 的通带内。此时,超窄线宽激光光源 1 的瑞利散射光将被 FBG 9 反射重新进入第二环形器 8,并从第二环形器 8 的另一出口到达第一光电探测器 18,光信号转换为电信号,并被第一采集卡 20 采集。

[0048] 为了进一步提高相敏 OTDR 的信号质量,可在超窄线宽激光光源 1 后通过 1:99 耦合器 2 分离出 1% 的激光作为本振光,通过第二偏振控制器 17 到达第二 1:1 耦合器 16,与超

窄线宽激光光源 1 的瑞利散射光相干涉,形成光外差探测。之后第一光电探测器 18 将检测到干涉产生的拍信号,经过调幅解调电路 19 后由第一采集卡 20 采集送入计算机 23 处理。

[0049] 另一方面,窄线宽激光光源 10 的探测光和极小部分超窄线宽激光光源 1 的瑞利散射光(反射功率低于 1%)通过 FBG 9,与通过参考臂光纤 14 的探测光在第三 1:1 耦合器 15 处发生干涉。之后干涉光由第二光电探测器 21 检测到,转化为光信号,经第二采集卡 22 采集后传输给计算机 23 进行处理。

[0050] 由于窄线宽激光光源 10 的探测光功率是超窄线宽激光光源 1 的瑞利散射光功率的数百倍,再经过 FBG 9 的衰减,从 FBG 9 泄漏的超窄线宽激光光源 1 的瑞利散射光将不会影响到窄线宽激光光源 10 的探测光光强。

[0051] 综上所述,本发明实施例设计了一种有机结合 Mach-Zehnder 干涉仪和相敏 OTDR 的光纤传感系统。本系统拥有和相敏 OTDR 一样的定位精度,同时可以获得振动的高频细节,进而进行精确的振动类型识别,有效降低系统的误报率。另一方面,由于相敏 OTDR 使用反向瑞利散射光进行探测,其反射光强度极低(平均功率通常仅数十 uW),而干涉仪光强功率大(通常为数 mW),导致相敏 OTDR 的光信号易被淹没于干涉仪的信号中。引入 FBG,系统成功实现两部分光信号的分离,提高了系统的信噪比。系统成功实现了干涉仪和散射仪的光路结合以及光信号分离,使得系统结构相对简单,成本较低。

[0052] 实施例 2

[0053] 在计算机 23 处,选用较高的采样频率(如 100MHz)。分别从第一采集卡 20、第二采集卡 22 得到超窄线宽激光光源 1 的瑞利散射信号  $S_2$ ,以及窄线宽激光光源 10 的干涉探测信号  $S_1$ ,根据声光调制器 3 的调制信号的重复频率,将瑞利散射信号  $S_2$ 按时间顺序截断为多条散射迹线  $r = \{r_1, r_2, r_3, \dots, r_i, \dots, r_k\}$ 。

[0054] 为了实现振动事件的定位,使用改进型移动平均算法降低信号噪声,使用小波信息熵法消除传感光纤 6 沿线衰减的影响并快速准确定位振动发生位置。具体包括以下过程:

[0055] 101:对 K 条散射迹线进行平均,获取 T 条平均曲线;

[0056] 选取 K 条散射迹线  $r = \{r_1, r_2, r_3, \dots, r_i, \dots, r_k\}$ ,选取平均次数 M(推荐  $M > 50$ ),间隔参数 n(推荐  $n = 5$ ),对 K 条散射迹线采用:第 1 条到第 M 条进行平均、第 n 条到第 M-n+1 条进行平均……共得  $T = \text{int}((K-M)/n) + 1$  条平均曲线,即:

$$[0057] \quad R_i = \frac{1}{M} \sum_{j=(i-1)n+1}^{j=(i-1)n+M} r_j, j \in [1, T]$$

[0058] 其中,  $R_i$  为第 i 条移动平均所得曲线,  $\text{int}()$  为向下取整运算。

[0059] 102:抽取时域信号  $t_j = \{x_{ij}\}$ ,分别计算各个时域信号的小波信息熵,作为第 j 个信号点

[0060] 对应的探测点的评价指标;

[0061] 其中,  $x_{ij}$  为  $R_i$  的第 j 个值。这里 j 表征空域,对应位置信息。

[0062] 小波信息熵为使用小波分析提供被测信号在不同频率尺度、时间尺度下的细节信息,使

[0063] 用香农信息熵计算规则对被测信号的不确定度的估计。将每个探测点作为独立的

系统,则振动事件将增加对应探测点的混乱程度,改变信号能量的分布,从而增大该探测点的小波信息熵值。当该值增大时,则判定对于探测位置处发生振动事件。具体计算过程如下:

[0064] 首先,对时域信号  $t_j$  进行  $N$  层小波分解,得到各层小波分量,

$$[0065] \quad t_j = \sum_{k=1}^N D_k + A_N$$

[0066] 这里,  $D_k$  为第  $k$  层小波分解得到的高频小波分量,  $A_N$  为第  $N$  层小波分解得到的低频小波分量。为使符号简单明了,将上式统一表示为,

$$[0067] \quad t_j = \sum_{k=1}^{N+1} C_k$$

[0068] 其中,  $C_k$  分别为经过  $N$  层小波分解后得到的  $k+1$  个小波分量。

[0069] 然后,计算各个尺度下的能量  $E_k$ ,

$$[0070] \quad E_k = \sum |C_k|^2$$

[0071] 之后,计算各个探测位置处的小波信息熵:

$$[0072] \quad Swt_j = - \sum_{k=1}^N p_k \cdot \log_2(p_k)$$

[0073] 其中,

$$[0074] \quad p_k = \frac{E_k}{E_{total}}$$

$$[0075] \quad E_{total} = \sum_k^{N+1} E_k$$

[0076] 其中,  $Swt_j$  为第  $j$  点处的小波信息熵;  $p_k$  为第  $k$  个小波分量所占总能量的比重;  $E_{total}$  为信号总能量。

[0077] 103: 将小波信息熵  $Swt_j$  作为对传感光纤 6 上  $K$  条散射迹线时间内的综合评价,该值增大时,表明对应位置  $j$  处发生振动,通过公式  $A = (n_c c j) / (2fs)$  可确定振动位置;

[0078] 其中,  $c$  为光速,  $n_c$  为光纤折射率,  $fs$  为第一采集卡 20 采样率。

[0079] 104: 对振动信号进行分类。

[0080] 为了降低系统的误报率,在定位振动后,还需对振动细节进行分析识别,判定振动种类。当小波信息熵  $Swt_j$  显示有振动产生时,提取  $K$  条散射迹线对应时间内的窄线宽激光光源 10 的干涉探测信号  $S_1$ 。由于干涉探测信号  $S_1$  为连续光探测,其频率分辨率由第二采集卡 22 的采样率决定。若取第二采集卡 22 采样率为 100MHz,则其频率分辨率为 50MHz。在得到振动细节信息后可有多种方法对信号进行分类,这里仅以小波包能量法举例说明。具体包括以下过程:

[0081] 在输油管线上,振动事件的频率通常在 20KHz 以下,先对干涉探测信号  $S_1$  进行降采样,将采样率降低到 40KHz。之后进行 4 层小波包分解,可得到 16 个小波包分量,选取前 8 个分量,如图 2(b) 所示,作为 BP 神经网络的输入特征向量,用于事件识别。

[0082] 在应用前,先将事先采集的各类事件的干涉探测信号作为训练和验证集,参见图 2(a),为 BP 神经网络的输入量,对 BP 网络进行训练和验证。

[0083] 使用训练好的神经网络即可实现常见事件的判别,如针对管道应用的人工挖掘、机械挖掘等。

[0084] 综上所述,本发明实施例通过对超窄线宽激光光源 1 的瑞丽散射信号进行改进型移动平均算法和小波信息熵算法可得到振动精确位置。窄线宽激光光源 10 的干涉信号则包含丰富频率信息,对其进行小波包分解,经由神经网络可判别出振动种类,降低了误报率。

[0085] 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。

[0086] 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。



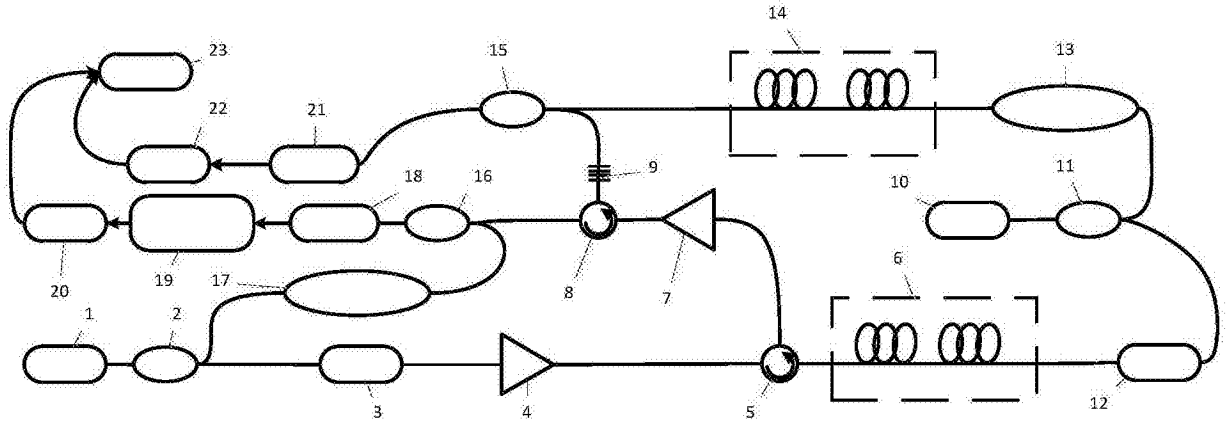


图 1

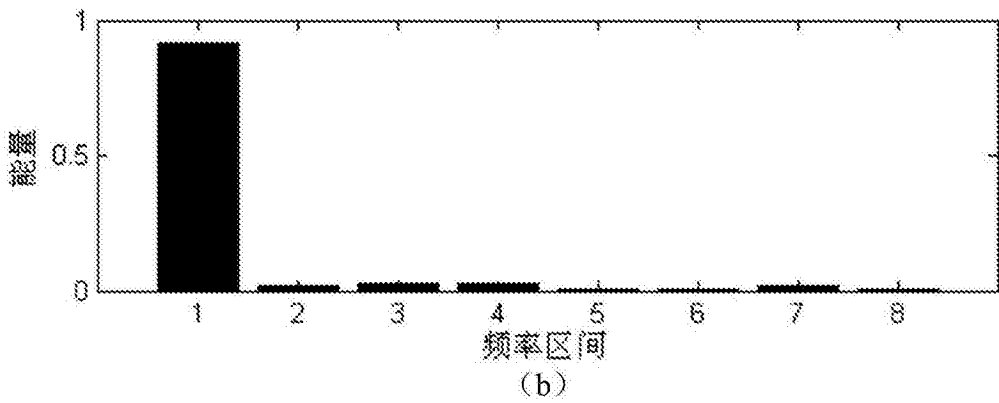
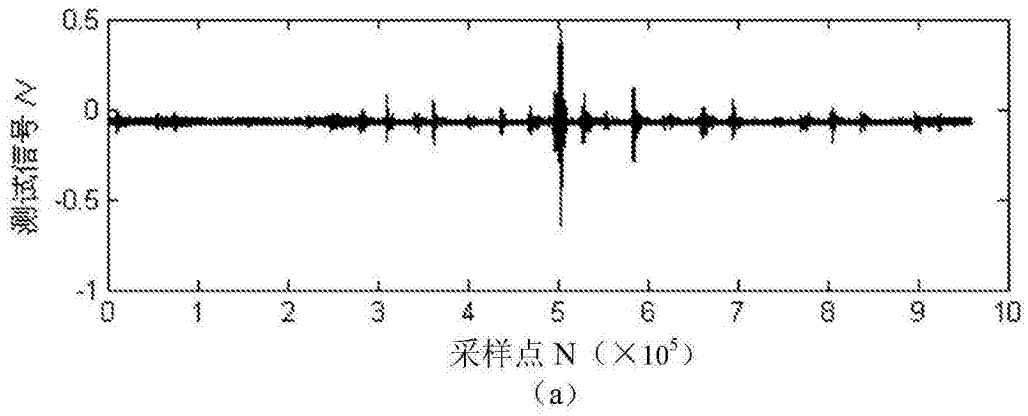


图 2