



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102879081 B

(45) 授权公告日 2016.06.29

(21) 申请号 201210341427.9

(22) 申请日 2012.09.17

(73) 专利权人 北京航天时代光电科技有限公司
地址 100091 北京市海淀区丰滢东路1号

(72) 发明人 姜萌 王巍 魏宇峰 王学锋
王军龙

(74) 专利代理机构 中国航天科技专利中心
11009

代理人 安丽

(51) Int. Cl.

G01H 9/00(2006.01)

审查员 刘云丽

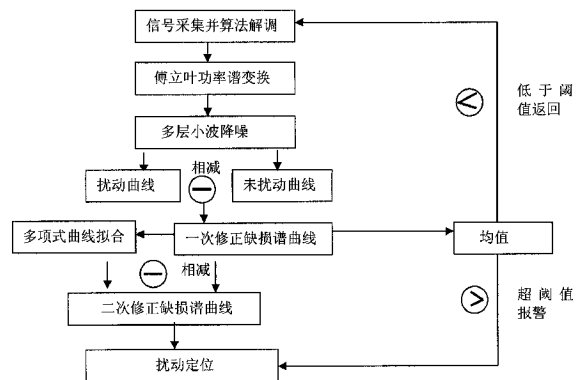
权利要求书1页 说明书5页 附图3页

(54) 发明名称

一种分布式光纤振动系统中的数据处理方法

(57) 摘要

一种分布式光纤振动传感器的数据处理方法,可以有效解决缺损谱倾斜情况并实现扰动信息的阈值触发报警。首先通过对两路信号归一化消除光路噪声,其次采用小波多层分解并重构技术实现缺损谱的降噪,并采用曲线拟合修正倾斜的缺损谱,实现平直的缺损谱,提高缺损点准确性,提高扰动测量的定位精度。



1. 一种分布式光纤振动传感器系统的数据处理方法,其特征在于包括以下步骤:

第一步,选择采样频率,对分布式光纤振动传感器系统中两路探测模块得到的时域光强信号进行实时采集;

第二步,对第一步得到的两路时域光强信号进行解调,得到相位扰动的变化量,该变化量与外界对光纤施加扰动产生的应变成正比;

第三步,对相位扰动的变化量进行傅立叶变换,得到扰动定位的缺损谱,缺损谱中缺损点的频率值能对传感光纤中扰动位置进行定位;

第四步,对第三步得到的缺损谱采用多层小波算法进行一维信号消噪处理,去除缺损谱中信号噪声,提取有用信号,得到经过小波降噪的缺损谱;

第五步,将第四步得到的经小波降噪的缺损谱与传感光纤没有扰动时的频域谱相减得到一次修正的频域缺损谱,求取采样时间内一次修正的频域缺损谱强度均值,当频域缺损谱强度均值超过设定阈值时,进入第六步进行二次修正,同时进行扰动报警;如果没有超过设定阈值,则回到第一步继续采样;

第六步,利用最小二乘法对第五步得到的一次修正的频域缺损谱进行曲线拟合得到频域谱,将拟合后的频域谱与一次修正的频域缺损谱相减,得到二次修正的频域缺损谱,再通过最小二乘算法对缺损点的频率值进行提取;

第七步,根据第六步得到的缺损点频率值计算扰动点的位置。

2. 根据权利要求1所述的分布式光纤振动传感器系统的数据处理方法,其特征在于:设定所述阈值的方法为:确定采样点数,对一次修正的频域缺损谱曲线上采样点数的纵坐标的强度求均值,得到未受扰动的均值为a;然后在施加扰动情况下,求均值为b;设置 $Y=(a+b)/2$ 作为扰动触发报警阈值。

一种分布式光纤振动系统中的数据处理方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种分布式光纤振动传感器系统中的数据处理方法,属于光纤传感技术领域。

背景技术

[0002] 基于分布式光纤振动传感器的长距离光纤智能安防系统作为一种先进的新型安全防范系统,除了具有一般光纤传感器灵敏度高、无需中继供电、抗电磁干扰等优点之外,还具有隐蔽性好、可与光纤通讯网络构成智能防范系统等优点。因此,光纤智能安防系统已经成为当前最有前景的安全防范系统之一,具有巨大的民用价值和军用价值。

[0003] 如果采用一般电类传感器对入侵行为进行探测,由于设施长度较长,单个传感器的探测范围较小,需要装备的传感器数量巨大,会导致系统的造价昂贵、能耗较高。光纤安防系统的优势是可以利用与管道同步预埋光缆实现振动信号检测。利用各种光纤传感技术进行安全预警成为近年来预警技术发展的一个热点,因此在长距离地理油气管线安全预警、军用涉密光缆数据安全等方面有着迫切的市场需求前景。

[0004] 目前分布式光纤振动传感器发展的方向是:一是干涉型,包括萨格奈克干涉仪型,双马赫泽德干涉仪型;二是时域反射型,利用背向瑞利散射光的相干。长距离分布式光纤振动传感器基本采用与管道同埋的通讯光缆中的一芯或多芯,利用扰动导致的光传输的相位变化对扰动位置进行解调,萨格奈克干涉仪型利用谱缺损定位,双马赫泽德干涉仪利用时延差和相关算法定位。

[0005] 基于时域反射型的分布式光纤振动系统中背向瑞利散射光强度微弱,其微弱信号外差探测电路对信噪比要求高,随着传感光纤长度增加,信号比降低,因此该系统测量长度不长。其次,该系统得到的微弱信号处理需要多次平均,影响了系统响应时间。

[0006] 基于双马赫泽德干涉仪系统的参考臂和信号臂都在同一光缆内,同时都会受到扰动影响,影响其相关算法的相关度。其次由于单模光纤双折射,光波的偏振态会发生随机变化。双马赫泽德干涉仪型需要对系统偏振态进行实施闭环控制,其控制算法的速度不能满足偏振态连续变化的需要,传感器在实际监测中定位不准确。

发明内容

[0007] 本发明的技术解决问题是:克服现有技术的不足,提供一种分布式光纤振动系统中的数据处理方法,提供了一种单芯Sagnac干涉型分布式光纤振动传感器系统中提高定位精度的数据处理方法,可以消除倾斜缺损谱的影响,提高扰动定位测量的精度。

[0008] 本发明的技术解决方案是:一种分布式光纤振动传感器的数据处理方法,包括以下步骤:

[0009] 第一步,选择采样频率,对分布式光纤振动传感器系统中两路探测模块得到的时域光强信号进行实时采集;

[0010] 第二步,对第一步得到的两路时域光强信号进行解调,得到相位扰动的变化量,该

相位变化量与外界对光纤施加扰动产生的应变成正比；

[0011] 第三步,对相位扰动的变化量进行傅立叶变换,得到扰动定位的缺损谱,缺损谱中缺损点的频率值能对传感光纤中扰动位置进行定位；

[0012] 第四步,对第三步得到的缺损谱采用多层小波算法进行一维信号消噪处理,去除缺损谱中信号噪声,提取有用信号,得到经过小波降噪的缺损谱；

[0013] 第五步,将第四步得到的经小波降噪的缺损谱与传感光纤没有扰动时的域谱相减得到一次修正的频域缺损谱,求取该采样时间内一次修正的频域缺损谱强度均值,当频域谱强度均值超过设定阈值时,进入第六步进行二次修正,同时进行扰动报警;如果没有超过设定阈值,则回到第一步继续采样；

[0014] 第六步,利用最小二乘法对第五步得到的一次修正的频域缺损谱进行曲线拟合得到频域谱,将拟合后的频域谱与一次修正的频域谱相减,得到二次修正的频域缺损谱,再通过最小二乘算法对缺损点的频率值进行提取；

[0015] 第七步,根据第六步得到的缺损点频率值计算扰动点的位置。

[0016] 所述设定阈值的方法为:确定采样点数,对一次修正的频域缺损谱曲线上采样点数的纵坐标的强度求均值,得到未受扰动的均值为a;然后再施加扰动情况下,求均值为b;设置 $Y=(a+b)/2$ 作为扰动触发报警阈值。

[0017] 本发明与现有技术相比具有如下优点:

[0018] (1)本发明通过小波分解并重构技术降低了系统噪声,有利于缺损谱的准确提取,并设置阈值实现了实时的报警阈值触发,进行二次修正,提高扰动定位测量的精度,为实现长距离分布式光纤振动传感器系统提供了可能,满足了实际应用的需要。

[0019] (2)通过对傅立叶变换频谱进行补偿,消除了原始信号的畸形,从而使得缺损谱定位曲线更准确。

[0020] (3)本发明确定阈值的方法,能够根据实际布设的传感光纤例如地埋光缆,光纤围栏等情况进行自动调整,进行实时的触发告警。

附图说明

[0021] 图1为分布式光纤振动传感器系统的光路图；

[0022] 图2为本发明分布式光纤振动传感器数据处理方法的流程图；

[0023] 图3为干涉信号的傅立叶变换频域谱和经过解调算法后的傅里叶变换频域谱对比;其中(a)为噪声较大频域谱图,(b)经过解调算法的频域谱图；

[0024] 图4为本发明经过多层小波分解并重构降噪的发生扰动时频域缺损谱；

[0025] 图5为本发明经过多层小波分解并重构降噪的未发生扰动的频域谱；

[0026] 图6为本发明一次修正的频域缺损谱；

[0027] 图7为本发明最终二次修正的频域缺损谱,平坦的缺损谱用于提高扰动定位精度。

具体实施方式

[0028] 如图1所示,分布式光纤振动传感器系统包括光发射模块1,用于发出稳定的宽光谱激光,并根据光缆系统长度状态人工调节稳定光源;光干涉模块由 3×3 光纤耦合器2、延迟光纤3、连接光纤4、 3×3 光纤耦合器5连接组成,其作用是将光发射模块的宽光谱激光进

行分光、延时控制处理,生成有一定相位差的两路干涉光,通过监控线路向末端反射模块进行传输,并收由末端反射模块反射回来的携带有扰动源物理特征的光信号,经逆向分光、时延控制处理,形成干涉信号光输出。

[0029] 传感光纤6为单芯光纤,在3×3光纤耦合器5的端口和远端反射模块7的端口之间,线路上每一点均可作为一监控单元进行传感监测;

[0030] 光接收模块8、9的主要作用是利用光电效应把光信号转变为电信号的光电检测器,其作用是检测经过传输后的微弱光信号,并放大、整形、再生成原传输信号经过信息采集与处理模块10的采集与计算之后将定位信息输出给光纤振动预警系统。

[0031] 根据“光弹效应”,光纤传输特性的变化将引起光纤中传输光相位的变化,从而使光的相位根据振动源的特征产生调制。当外界触发作用在光缆上时,将引起光纤的长度和折射率发生变化。波长为 λ 的激光在长度为 l 的光纤内传播后,对应的相位延迟 ϕ 为:

$$[0032] \quad \phi = \frac{2\pi}{\lambda} nl = \beta l \quad (1)$$

[0033] 其中 β 为光波传播常数, n 为折射率,当外界扰动作用在光纤上时,光相位变化 $\Delta\phi$ 为:

$$[0034] \quad \Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (\Delta nl + n\Delta l) = \beta\Delta l + l\Delta\beta = \beta\varepsilon l + l\frac{d\beta}{dn}\Delta n + l\frac{d\beta}{dD}\Delta D \quad (2)$$

[0035] 可以看出相位变化的原因为:弹光效应导致光纤长度的变化 Δl 和光纤折射率的变化 Δn ,以及纵向应变导致光纤直径的变化 ΔD 。忽略横向应变和剪切应变的影响,则第三项可忽略不计。根据弹光效应的原理:

$$[0036] \quad \varepsilon = P(1-2\nu)/E$$

$$[0037] \quad \Delta n = -\frac{n^3}{2} \frac{P(1-2\nu)}{E} [(1-2\nu)P_{11} - \nu P_{21}]$$

[0038] 其中 ε 是光纤受到应变, E 为光纤材料的弹性模量, P 为均匀受压的轴向压力, ν 为材料的泊松比, P_{11}, P_{12} 为光纤弹光系数张量,将上述式子带入到公式(2)中,即可得到:

$$[0039] \quad \Delta\phi = \beta(1 - \frac{n^3}{2}) [(1-2\nu)P_{11} - \nu P_{21}] \Delta l \quad (3)$$

[0040] 则可以得到相位变化 $\Delta\phi$ 与光纤长度 Δl 的变化关系,定义 $\gamma = \beta(1 - \frac{n^3}{2}) [(1-2\nu)P_{11} - \nu P_{21}]$ 为由光纤性质决定的常数,可以看出光相位变化 $\Delta\phi = \gamma \Delta l$ 与光纤内部的轴向应变成正比,与外加力学量成正比,两者呈线性关系。这样,解调出相位变化,光缆感受到的外界振动信息就能被准确提取。

[0041] 基于3×3光纤耦合器的萨格奈克干涉型分布式光纤振动传感器系统,利用3×3光纤耦合器两臂的固定相位差为 $2\pi/3$,实现对光路的非对称解调。根据本发明所采用的光路方案,分布式光纤振动传感器系统中探测器两端接收到的光强 $x(k), y(k)$ 为:

$$[0042] \quad \begin{cases} x(k) = A \cos \alpha + A \cos[\Delta\phi(k) + \alpha] \\ y(k) = B \cos \beta + B \cos(\Delta\phi(k) + \beta) \end{cases}$$

[0043] A 和 B 为两路信号的振幅变化量, k 为采样点数, α, β 为初始相位,将两路信号分别微分并差乘,在通过积分可以得到相位的变化量 $\Delta\phi(k)$:

$$[0044] \quad AB\sin(\alpha - \beta)\Delta\varphi(k) = \int x'(k) * y(k) - x(k) * y'(k) + A\cos\alpha * y(k) - B\cos\beta * x(k) \quad (4)$$

[0045] 将得到的相位变化量进行傅立叶变换,可以得到频域谱,当有扰动触发光缆时,频域谱表现出特征频率对应的光强明显小于周边频率对应的光强,呈现一系列周期性的极小值点,这种谱为缺损谱,通过缺损谱极值点的频率可以对扰动点进行定位。由于傅立叶变换的缺损谱不平直,导致极小值点提出不准确,严重影响了扰动定位精度。

[0046] 本发明提供的分布式光纤振动传感器系统中的数据处理方法正是要解决这些问题。本发明具体步骤如流程图2所示:

[0047] 第一步,选择采样频率,对分布式光纤振动传感器系统中两路探测模块得到的时域光强信号进行实时采集;

[0048] 第二步,对第一步得到的两路时域光强信号进行解调,得到相位扰动的变化量,该相位变化量 $\Delta\varphi(k)$ 与外界对光纤施加扰动产生的应变成正比,见公式(4);

[0049] 第三步,对相位扰动的变化量进行傅立叶变换,得到扰动定位的缺损谱,缺损谱中缺损点的频率值能对传感光纤中扰动位置进行定位。缺损点的频率值 $f_{s,null}$ 为:

$$[0050] \quad f_{s,null} = \frac{\omega_{s,null}}{2\pi} = \frac{(2N-1)c}{4nR}$$

[0051] 上式中,L为传感光纤总长度, R_1 为扰动点距离耦合器的距离,c为光速。由此可以得到扰动点距离远端反射模块的位置R为:

$$[0052] \quad R = \frac{(2N-1)c}{4n \cdot f_{s,null}}$$

[0053] N代表缺点数;

[0054] 第四步,对第三步得到的缺损谱采用多层小波算法进行一维信号消噪处理,去除缺损谱中信号噪声,提取有用信号,得到经过小波降噪的缺损谱;

[0055] 第五步,将第四步得到的经小波降噪的缺损谱与传感光纤没有扰动时的域谱相减得到一次修正的频域缺损谱,求取该采样时间内一次修正的频域缺损谱强度均值,当频域谱强度均值超过设定阈值时,进入第六步进行二次修正,同时进行扰动报警;如果没有超过设定阈值,则回到第一步继续采样;

[0056] 第六步,利用最小二乘法对第五步得到的一次修正的频域缺损谱进行曲线拟合得到频域谱,将拟合后的频域谱与一次修正的频域谱相减,得到二次修正的频域缺损谱,再通过最小二乘算法对缺损点的频率值进行提取;

[0057] 第七步,根据第六步得到的缺损点频率值计算扰动点的位置。

[0058] 实例

[0059] 在实例中,所用激光器为SLD光源,中心波长1550nm,3dB带宽45nm,功率22mW。光纤耦合器为武汉邮电研究院生产单模耦合器,光电探测器为PINFET探测器,跨阻放大倍数为500K。跳线为FC/APC型单模光纤跳线。采集卡采用ADLINK DAQ2010型通过计算机对信号进行处理。

[0060] (1)选择适当的采样频率和采样点数k,对两路探测器得到的时域光强信号进行实时采集。采样频率为250kHz/s,采样数为50000点,故两点间隔分辨率为250000/50000=5Hz,则距离分辨率在35公里系统中最大为84.4米。

[0061] (2)根据探测器得到的时域功率变化 $P \approx -P_0 \phi_0 \cos(\omega_s t - \frac{\omega_s \tau}{2}) \sin(\frac{\omega_s \Delta \tau}{2})$, P_0 为初始功率, ω_s 为扰动频率, $\Delta \tau$ 为由延时光纤造成的时间差, 缺损点一般发生在 $\sin(\frac{\omega_s \Delta \tau}{2}) = 0$, 即 $\omega_s \Delta \tau / 2 = 0, \pi, \dots, N\pi$ 当出现扰动时, 根据缺损点的频率值就可以对扰动点进行定位。根据本发明所采用的两路信号解调算法, 得到相位扰动的变化量 $\Delta \phi(k)$ 。对时域信号进行傅里叶变换, 如图3所示, 未经解调算法频域谱, 图3(a)噪声较大, 经过解调算法的频域谱图3(b)噪声较小。

[0062] (3)本发明运用多层小波分析进行一维信号消噪处理。一维信号的小波分解, 选择一个小波并确定小波分解的层次M, 然后对信号进行M层小波分解; 母小波函数的选择与层数选择至关重要, 其目标都是最小化重构残差的方差以及最大化信噪比。

[0063] 一维小波重构。根据小波分解的第M层低频系数和量化处理后的第1至M层高频系数, 进行一维小波重构。可到经过小波降噪后的频域缺损谱如图4所示。可以看出经过小波降噪的频域缺损谱幅值从-10dB至-90dB, 谱线成倾斜状态, 无法对陷波点进行准确提取。

[0064] (4)选择没有扰动时的频域谱记录为本地噪声如图5所示, 与实时数据采集得到的经小波变换的频域谱减法得到一次修正处理得到的频域缺损谱, 如图6所示。可以计算出该频域谱的均值为25dB, 并以此频域谱均值设置作为扰动报警的触发阈值。

[0065] (5)通过最小二乘法对一次修正的频域缺损谱进行曲线拟合得到的频域谱, 与一次修正得到的频域谱实时相减。得到了二次修正的频域缺损谱, 如图7所示。可以看出该频域幅度非常平直, 并通过最小二乘算法可以对极值点进行准确提取。根据极值点准确计算扰动点的位置。

[0066] 根据扰动点位置计算公式:

$$[0067] \quad R = \frac{c}{4n \cdot f_{s, null}}$$

[0068] 可以得到扰动点发生的位置为31.67公里, 与通过OTDR探测得到扰动点位置标定误差 < 100米, 显著提供了定位精度。

[0069] 本发明说明书中未作详细描述的内容属于本领域技术人员的公知技术。

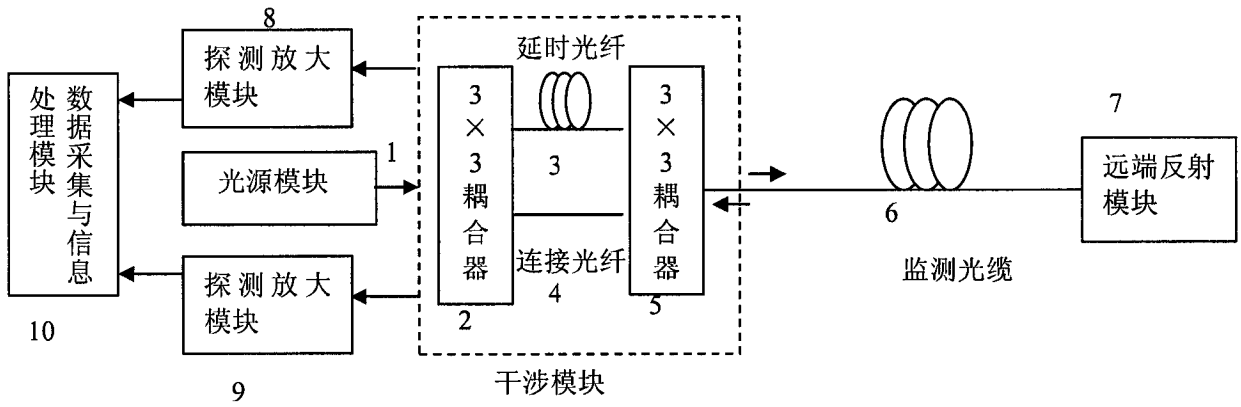


图1

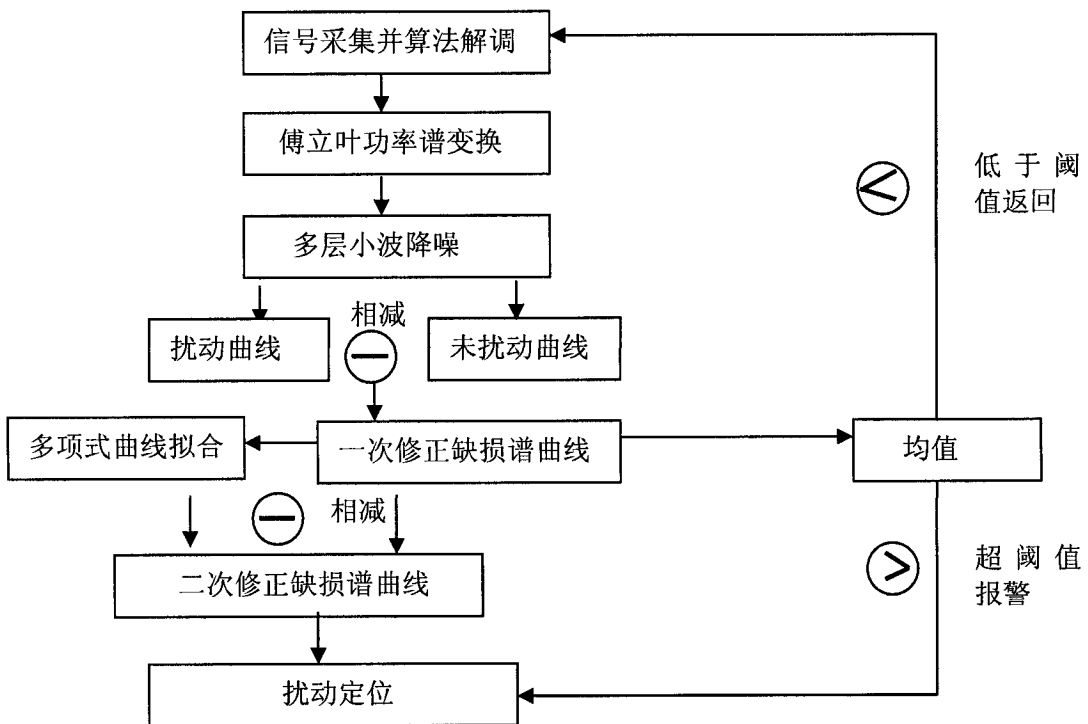


图2

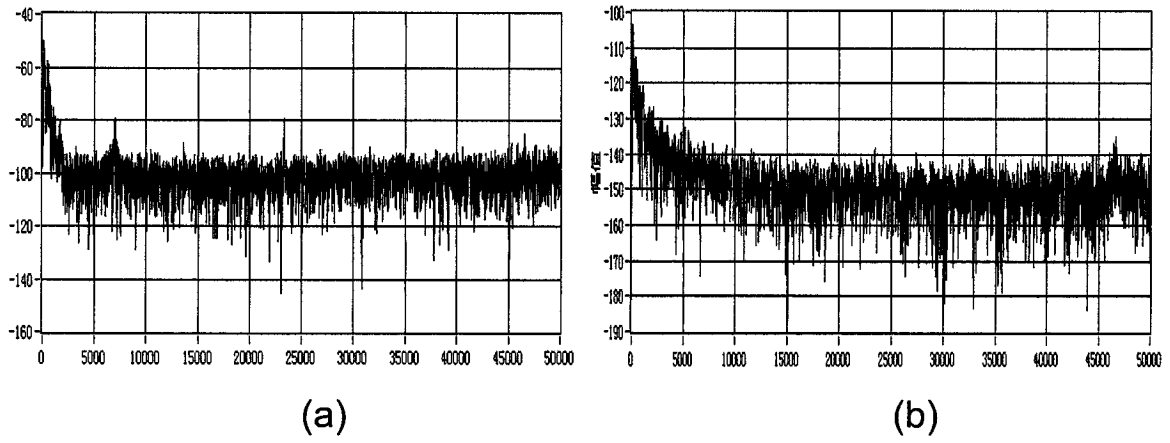


图3

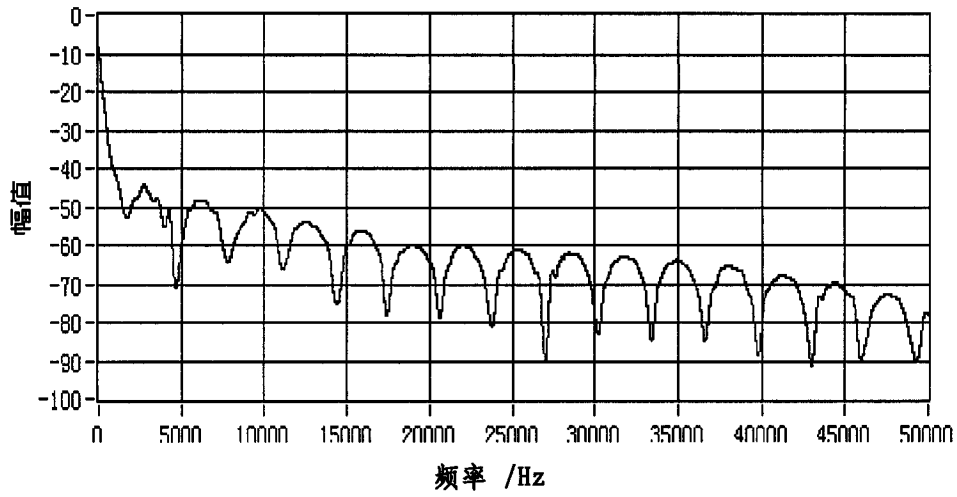


图4

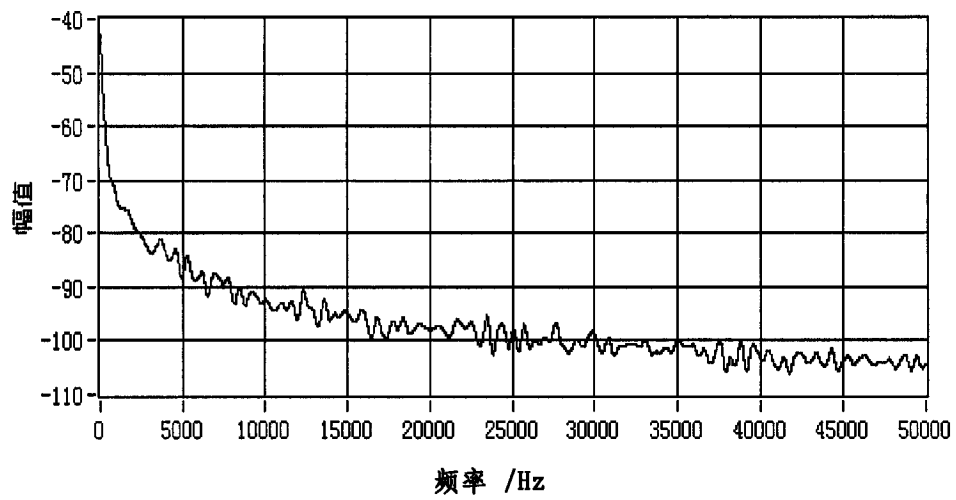


图5

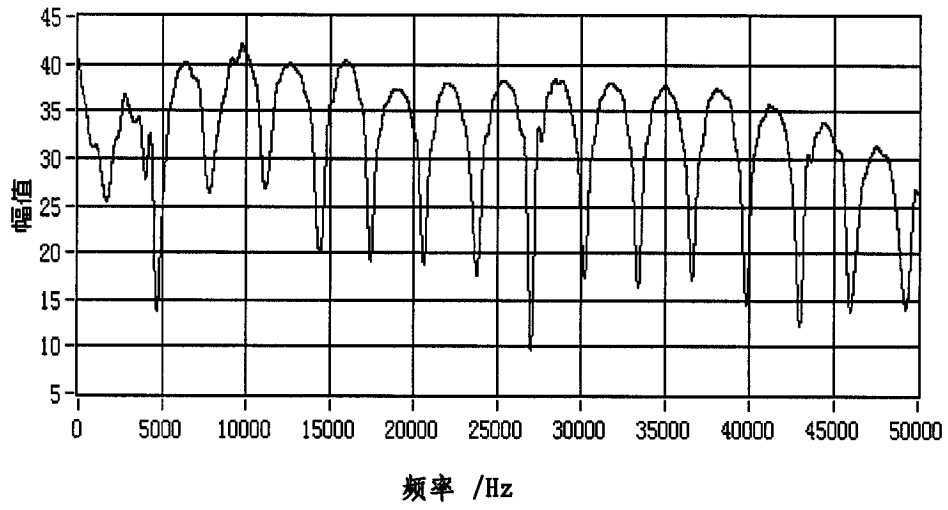


图6

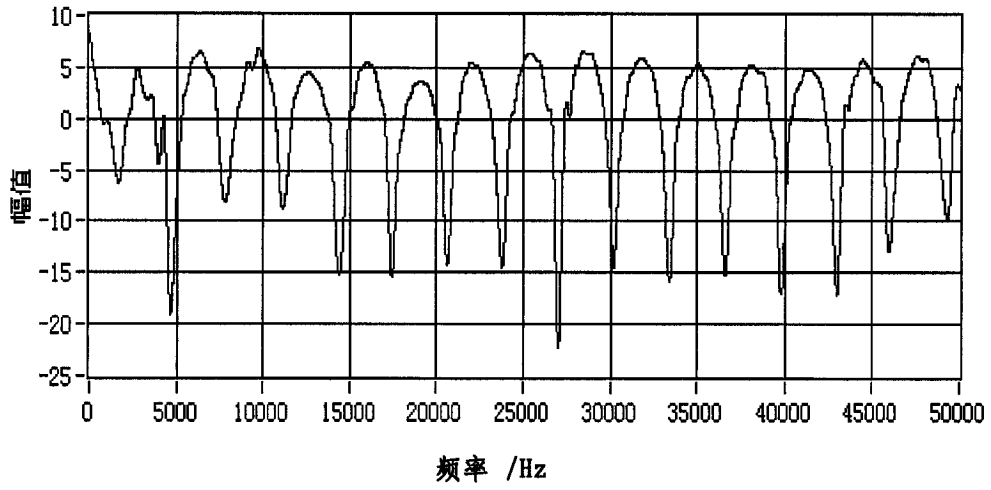


图7