



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 105067025 A

(43) 申请公布日 2015. 11. 18

(21) 申请号 201510458769. 2

(22) 申请日 2015. 07. 31

(71) 申请人 西南科技大学

地址 621000 四川省绵阳市涪城区青龙大道  
中段 59 号

(72) 发明人 郭锋 朱宝龙

(74) 专利代理机构 成都九鼎天元知识产权代理  
有限公司 51214

代理人 项霞

(51) Int. Cl.

G01D 21/00(2006. 01)

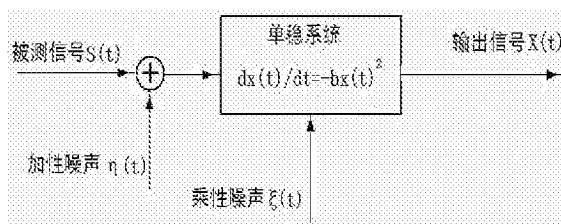
权利要求书1页 说明书4页 附图4页

(54) 发明名称

一种利用单稳系统随机共振效应检测微弱信号的方法

(57) 摘要

本发明提供了一种利用单稳系统随机共振效应检测微弱信号的方法。该方法基于随机共振理论,利用噪声,而非抑制噪声,通过多次调节一个系统参数和注入系统的噪声强度,使系统输出信噪比最佳,可以最大化地提高系统输出信噪比,从而实现对微弱信号的最佳检测。本发明特别适合机械故障、电子故障检测等低信噪比、低频微弱特征信号检测。



1. 一种利用单稳系统随机共振效应检测微弱信号的方法,其特征在于,所述方法包括以下步骤:

步骤一:初始化单稳系统  $\frac{dx(t)}{dt} = -b x(t)^2 + x(t) \xi(t) + \eta(t) + s(t)$  中的  $b, \xi(t)$ ;在该系统中,  $x(t)$  为系统输出信号,  $b$  为系统结构参数,  $\eta(t)$  是加性高斯白噪声,  $s(t)$  为周期信号,  $\xi(t)$  是注入系统的乘性高斯分布白噪声。

步骤二:选择固定系统结构参数  $b$  或者乘性高斯分布白噪声  $\xi(t)$  中的一个,调节另一个,直到系统输出信号的信噪比达到最大;

步骤三:固定上一步中被调节的对象最后的取值,调节另一个,直到系统输出信号的信噪比达到最大;

步骤四:返回执行步骤三,直到系统输出信噪比不再增大为止。

2. 如权利要求 1 所述的利用单稳系统随机共振效应检测微弱信号的方法,其特征在于,系统输出信号  $x(t)$  进行傅里叶变换 (FFT) 后计算信噪比。

3. 如权利要求 1 所述的利用单稳系统随机共振效应检测微弱信号的方法,其特征在于,系统结构参数  $b$  调节范围为  $(0, 5)$ 。

4. 如权利要求 1 至 3 任一项所述的利用单稳系统随机共振效应检测微弱信号的方法,乘性高斯分布白噪声  $\xi(t)$  强度  $D$  的调节范围为  $(0, 1)$ 。

## 一种利用单稳系统随机共振效应检测微弱信号的方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于低信噪比条件下微弱信号的检测方法,特别涉及一种利用单稳系统随机共振效应检测微弱信号的方法。

### 背景技术

[0002] 微弱信号检测的首要任务是提高信噪比,以便从强噪声中检测出有用的微弱信号。由于微弱信号的检测能提高测量灵敏度和可检测下限,因此在物理、化学、生物以及许多工程技术领域都得到了广泛应用。常采用的微弱信号检测方法都是抑制噪声来提取微弱信号,在强噪声背景和信号的频率非常低的情况下,显得无能为力。

[0003] 当系统的非线性、输入信号与噪声三者之间存在某种匹配时,系统输出信噪比最优,这种非线性现象即随机共振。随机共振的概念是由意大利物理学家 Roberto Benzi、美国物理学家 Alfonso Suter 和意大利物理学家 Angelo Vulpoiani 等人 1981 年在研究古气象冰川问题时提出的。当有噪声的系统发生随机共振时,部分噪声能量会转化为有用信号的能量,从而使系统输出信噪比大大提高,即给特定系统加入一定强度的噪声,不但不会阻碍反而会提高信号检测的性能。

[0004] 目前基于随机共振检测信号模型通常为双稳系统或分段线性系统模型。其中,

(1) 双稳模型满足方程

$$\frac{dx}{dt} = ax - bx^3 + s(t) + \xi(t)$$

其中  $s(t)$  为输入信号,  $\xi(t)$  为噪声,  $a > 0$ ,  $b > 0$ , 势能函数为

$$U(x) = -\frac{a}{2}x^2 + \frac{b}{4}x^4$$

(2) 分段线性模型满足方程

$$\frac{dx}{dt} = \begin{cases} \frac{c}{a-b} + s(t), & x(t) < -b \\ -\frac{c}{b} + s(t), & -b < x(t) < 0 \\ \frac{c}{b} + s(t), & 0 \leq x(t) < b \\ -\frac{c}{a-b} + s(t), & x(t) \geq b \end{cases}$$

应用双稳模型检测信号时模型参数与系统特性有关,改变系统参数则系统特性会随着改变,需要调节系统  $a$ 、 $b$  两个参数;而分段线性系统需要调节  $a$ 、 $b$ 、 $c$  三个参数,构建模型复杂,不利于工程应用。

### 发明内容

[0005] 为解决上述问题,本发明提供了一种利用单稳系统随机共振效应检测微弱信号的方法,所述方法包括以下步骤:

步骤一:初始化单稳系统  $\frac{dx(t)}{dt} = -bx(t)^2 + x(t)\xi(t) + \eta(t) + s(t)$  中的  $b$ 、 $\xi(t)$ ;在该系统中,  $x(t)$  为系统输出信号,  $b$  为系统结构参数,  $\eta(t)$  是加性高斯白噪声,  $s(t)$  为周期信号,  $s(t) = A\cos(\Omega t)$ ,  $\xi(t)$  是注入系统的乘性高斯分布白噪声。

[0006] 步骤二:选择固定系统参数  $b$  或者乘性高斯分布白噪声  $\xi(t)$  中的一个,调节另一个,直到系统输出信号的信噪比达到最大;

步骤三:固定上一步中被调节的对象最后的取值,调节另一个,直到系统输出信号的信噪比达到最大。

[0007] 步骤四:返回执行步骤三,直到系统输出信噪比不再增大为止。

[0008] 进一步的,系统输出信号  $x(t)$  进行傅里叶变换 (FFT) 后计算信噪比。

[0009] 进一步的,系统结构参数  $b$  调节范围为  $(0, 5)$ 。

[0010] 进一步的,乘性高斯分布白噪声  $\xi(t)$  强度  $D$  的调节范围为  $(0, 1)$ 。

[0011] 本发明的有益效果为:

本发明针对现有双稳随机共振和分段线性随机共振检测微弱信号需要调节参数较多,不利于工程适用的不足,提供一种基于单稳态随机共振的微弱周期信号检测方法,该方法基于随机共振理论,利用噪声,而非抑制噪声,通过多次调节一个系统参数和注入系统的噪声强度,使系统输出信噪比最佳,可以最大化地提高系统输出信噪比,从而实现了对微弱信号的最佳检测。本发明特别适合机械故障、电子故障检测等低信噪比、低频微弱特征信号检测。

## 附图说明

[0012] 图 1 为本发明单稳系统结构框图。

[0013] 图 2 为本发明方法的微弱低频周期信号检测流程图。

[0014] 图 3 为仿真信号时域波形图。

[0015] 图 4 为仿真信号幅度谱图。

[0016] 图 5 为调节系统结构参数  $b$  后单稳系统输出信号幅度谱图。

[0017] 图 6 为调节乘性高斯白噪声的强度  $D$  后单稳系统输出信号幅度谱图。

[0018] 图 7 为多次调节参数  $b$  和  $D$ , 系统输出信噪比不再增大时的输出信号幅度谱图。

## 具体实施方式

[0019] 本发明针对现有双稳随机共振和分段线性随机共振检测微弱信号需要调节参数较多,不利用工程适用的不足,提供一种基于单稳态随机共振的微弱周期信号检测方法。下面进行详细说明。

[0020] 为实现本发明所述方法,先建立一个单稳模型系统为:  $\frac{dx}{dt} = -bx^2 + x\xi(t) + \eta(t) + s(t)$ , 系统的框图表示如图 1 所示。

[0021] 其势能函数  $U(x) = bx^3/3$  为单稳态形式,各个参数的含义为:  $x(t)$  为系统输出信

号,  $b$  为系统结构参数,  $\eta(t)$  是加性高斯白噪声,  $s(t) = A \cos(\Omega t)$  为被噪声  $\eta(t)$  淹没的周期信号,  $\xi(t)$  是注入系统的乘性高斯白噪声, 其均值为 0, 强度为  $D$ 。

[0022] 根据随机共振理论及申请人数次实验研究, 参数  $b$  调节范围为  $(0, 5)$ , 乘性高斯白噪声  $\xi(t)$  强度  $D$  的调节范围为  $(0, 1)$ 。

[0023] 利用上述模型检测微弱信号的方法包括如下步骤:

步骤一: 初始化单稳系统  $\frac{dx(t)}{dt} = -bx^2 + x(t)\xi(t) + \eta(t) + s(t)$  中的  $b$ 、 $\xi(t)$ 。

[0024] 步骤二: 选择固定系统参数  $b$  或者乘性高斯白噪声  $\xi(t)$  中的一个, 调节另一个, 直到系统输出信号的信噪比达到最大。

[0025] 步骤三: 固定上一步中被调节的对象最后的取值, 调节另一个, 直到系统输出信号的信噪比达到最大。

[0026] 步骤四: 重复步骤三, 直到系统输出信噪比不再增大为止。

[0027] 采用上述方法, 只需要调节一个系统参数, 采用向单稳系统注入乘性高斯白噪声的方法, 通过调节这个系统参数和注入系统的噪声强度, 实现对微弱低频周期信号的检测。

[0028] 本系统的技术原理为: 单稳系统  $dx/dt = -bx^2$  只有一个稳态  $x_s = 0$ , 当向该单稳系统注入乘性高斯白噪声后系统变为  $dx/dt = -bx^2 + x\xi(t)$ , 设乘性噪声强度为  $D$ , 则此时系统有两个工作状态, 一个是稳态  $x_s = 0$ , 一个是非稳态  $x_s = D/b$ 。当系统输入含噪声的微弱信号时, 通过调节系统参数和注入的乘性噪声强度, 使该非线性系统发生随机共振现象, 将一部分噪声能量转换为信号的能量, 从而大大提高系统输出信噪比, 检测出微弱周期信号。

[0029] 需要强调的是, 选择先固定  $b$  调节  $\xi(t)$  或者选择先固定  $\xi(t)$  调节  $b$  都是可行的, 具体根据实际使用选择。这种可选择性的设计与本单稳模型单一调节方式使得本发明具有更强的操作性, 提高应用范围, 降低设计难度。

[0030] 优选的, 系统输出信号  $x(t)$  进行傅里叶变换 (FFT) 后计算信噪比。

[0031] 下面结合图 2 到图 6 对本发明方法具体应用进行举例阐述。图 2 为信号检测流程图。取输入信号  $s(t) = A \cos(2\pi ft)$ , 其中  $A$  为信号幅度,  $t$  代表时间,  $f$  代表信号频率。与信号一起输入单稳系统的加性高斯白噪声  $\eta(t)$  是零均值的高斯分布白噪声, 其强度为  $P$ 。本实例中取  $A = 0.1$ ,  $P = 0.05$ ,  $f = 0.1$  Hz。图 3 为加性高斯白噪声与输入信号相加后的仿真信号时域波形图, 可以看出, 输入信号已经被噪声完全淹没。图 4 为加性高斯白噪声与输入信号相加后的仿真信号幅度谱图, 从中不能分辨出信号  $s(t)$  的频率, 所以不能检测出  $s(t)$ 。

[0032] 实例的具体实现包括以下步骤:

步骤一: 初始化单稳态模型  $dx/dt = -bx^2 + x\xi(t) + \eta(t) + s(t)$  的参数, 包括系统参数  $b$ , 以及注入的乘性高斯白噪声  $\xi(t)$  的强度  $D$ 。本实例中初始化值取  $b = 0.2$ ,  $D = 0.4$ 。

[0033] 步骤二: 仿真信号加入单稳系统  $dx(t)/dt = -bx(t)^2 + x(t)\xi(t) + \eta(t) + s(t)$ 。

[0034] 基于随机共振理论, 本系统的输出信噪比为

$$SNR = \pi W_s^2 A^2 \left\{ 4W_s \left[ 1 - \frac{W_s^2 A^2}{2(W_s^2 + 4\pi^2 f^2)} \right] \right\}^{-1}$$

$$\text{其中 } W_0 = \frac{D}{\pi} \exp \left[ 1 - \frac{1}{2D} \ln \left( \frac{D'}{D'P} + 1 \right) - \frac{b\sqrt{P}}{D\sqrt{D}} \arctan \left( \frac{D\sqrt{D}}{b\sqrt{P}} \right) \right], \quad W_1 = -\frac{W_0}{\sqrt{DP}} \arctan \left( \frac{D\sqrt{D}}{b\sqrt{P}} \right).$$

其中  $W_0$  为无信号输入时系统的两个状态间的特征转移速率,  $W_1$  为系统两个状态间的特征转移速率对信号的导数。

[0035] 步骤三: 固定注入的乘性高斯白噪声强度  $D$ , 调节系统参数  $b$ 。当  $b=0.6$  时, 单稳系统发生随机共振, 输出信噪比最大为 7, 输出信号幅度谱如图 5 所示, 可以明显分辨出在 0.1Hz 处存在信号。

[0036] 步骤四: 固定系统参数为  $b=0.6$ , 调节乘性高斯白噪声强度  $D$ 。当  $D=0.35$  时, 单稳系统发生随机共振, 输出信噪比最大为 12, 输出信号幅度谱如图 6 所示, 从图中可以更明显分辨在 0.1Hz 处的信号。

[0037] 步骤五: 固定步骤四中乘性高斯白噪声  $x(t)$  的强度  $D$  最后的取值, 调节系统参数  $b$ , 使系统输出信噪比最大; 然后固定系统参数为  $b$ , 调节乘性高斯白噪声  $x(t)$  的强度  $D$ 。重复该步骤, 直到输出信噪比不再增大为止。

[0038] 本实例中当  $b=0.05$ ,  $D=0.75$  时, 系统输出信噪比不再增大。此时系统输出信噪比为 25, 输出信号幅度谱见图 7。

[0039] 仿真结果表明: 通过本发明的单稳系统, 通过调节系统参数和注入的乘性高斯白噪声强度, 利用随机共振的特性, 可以很好地把淹没在噪声中的微弱低频周期信号提取出来。本系统调节的参数少, 可以减少系统成本, 易于工程实现。本实例中输出信号中还含有噪声, 可以再级联一个本单稳系统以提高输出信噪比, 也可以采用滤波平滑等措施进一步处理。

[0040] 以上所述, 仅为本发明的一个实例实施方式, 但本发明的保护范围不局限于此, 任何在本发明涉及的技术范围内进行的变化或替换, 都属于本发明的保护范围

本发明的有益效果为:

本发明针对现有双稳随机共振和分段线性随机共振检测微弱信号需要调节参数较多, 不利于工程适用的不足, 提供一种基于单稳态随机共振的微弱周期信号检测方法, 该方法基于随机共振理论, 利用噪声, 而非抑制噪声, 通过多次调节一个系统参数和注入系统的噪声强度, 使系统输出信噪比最佳, 可以最大化地提高系统输出信噪比, 从而实现对微弱信号的最佳检测。本发明特别适合机械故障、电子故障检测等低信噪比、低频微弱特征信号检测。

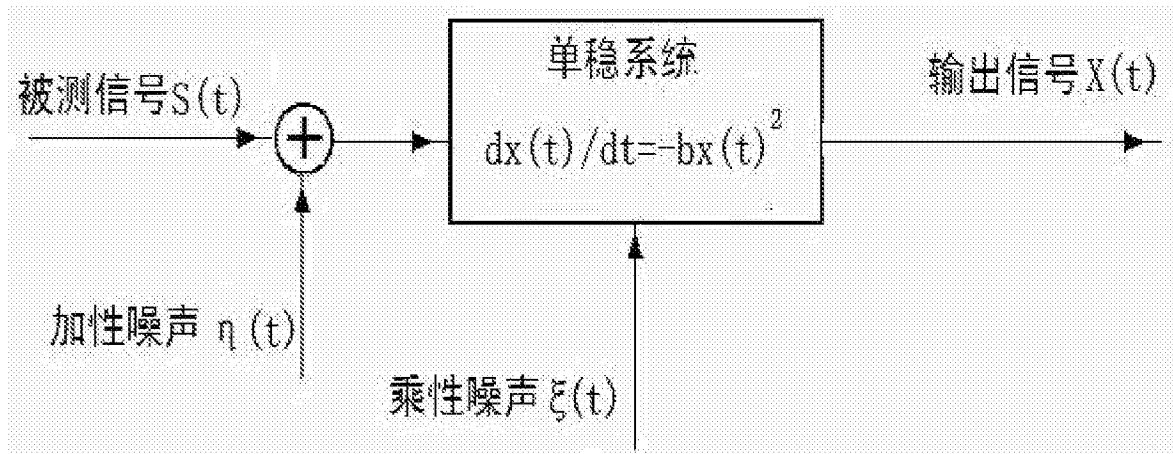


图 1

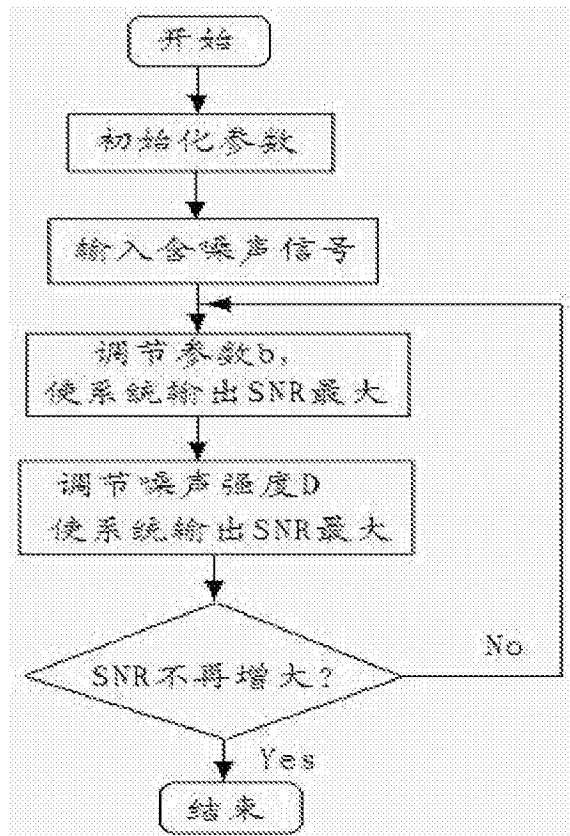


图 2

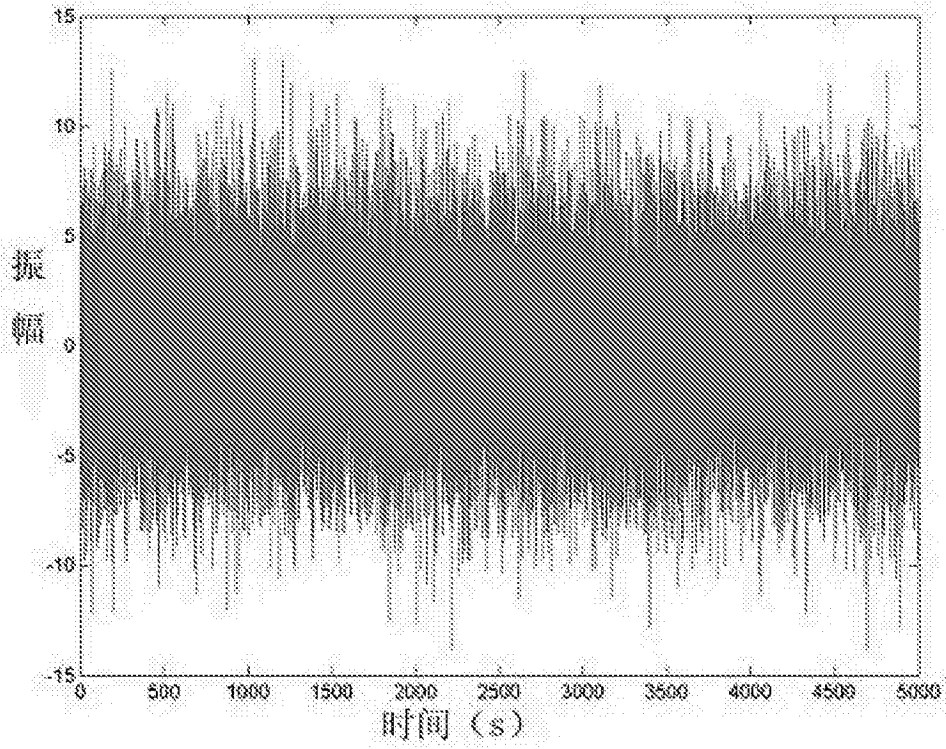


图 3

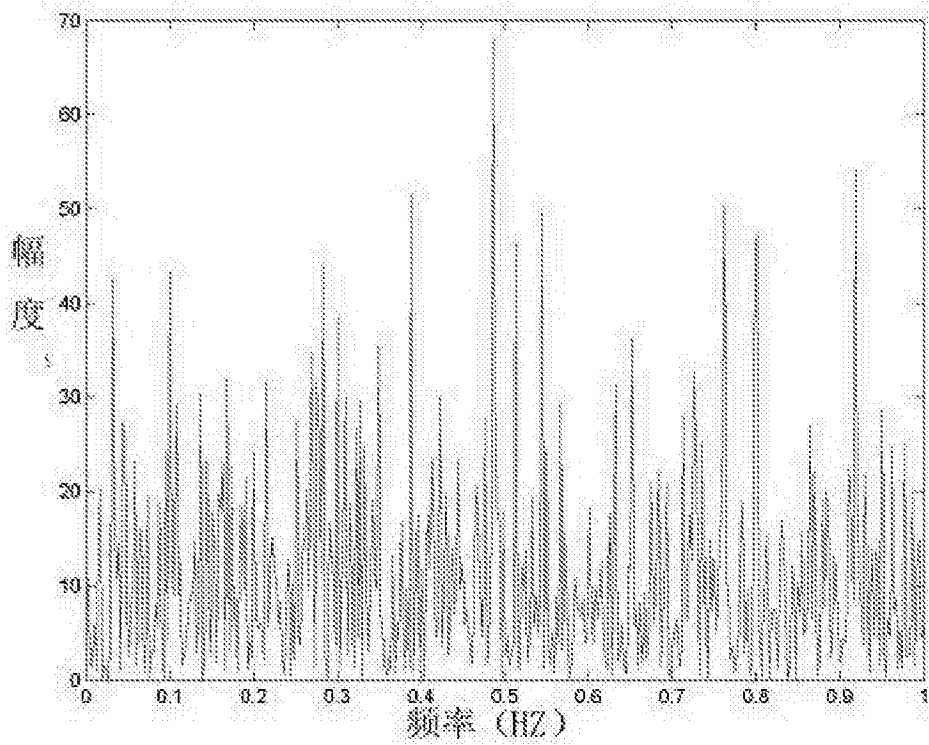


图 4



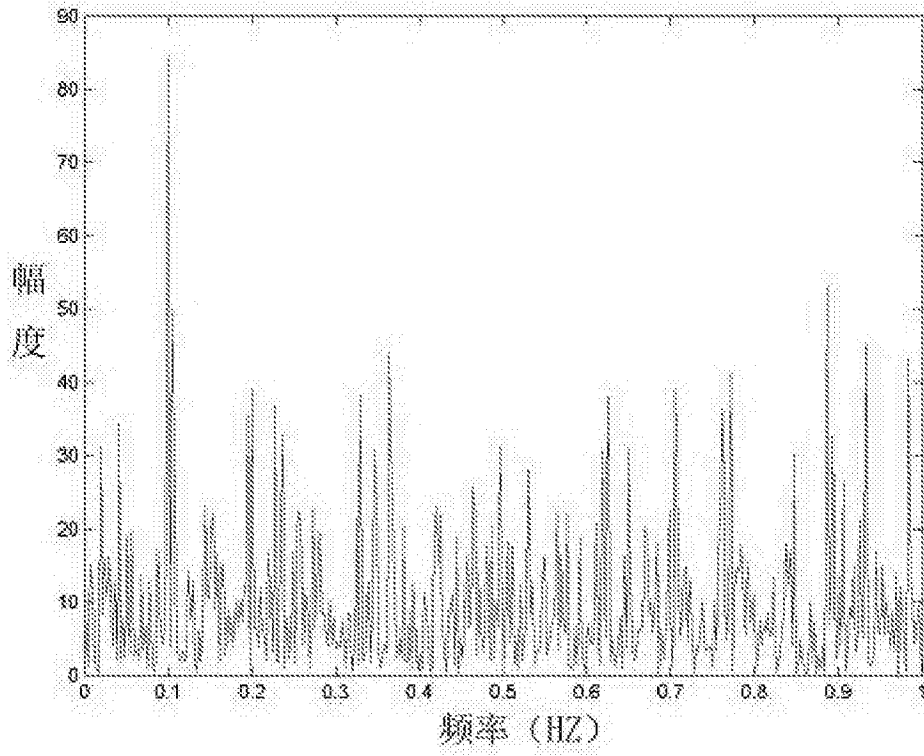


图 5

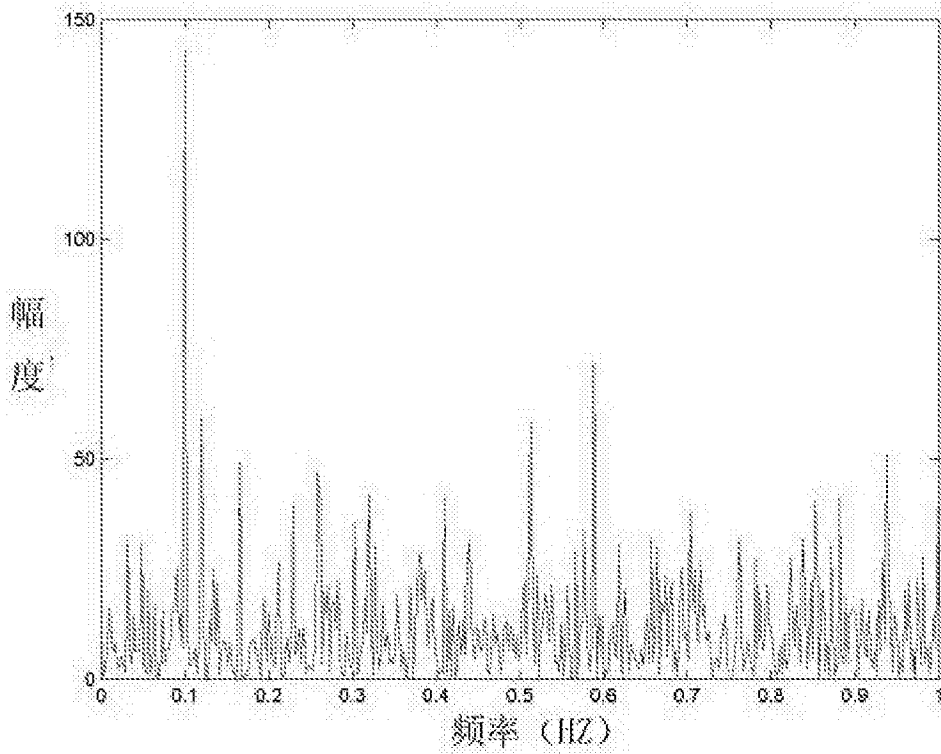


图 6

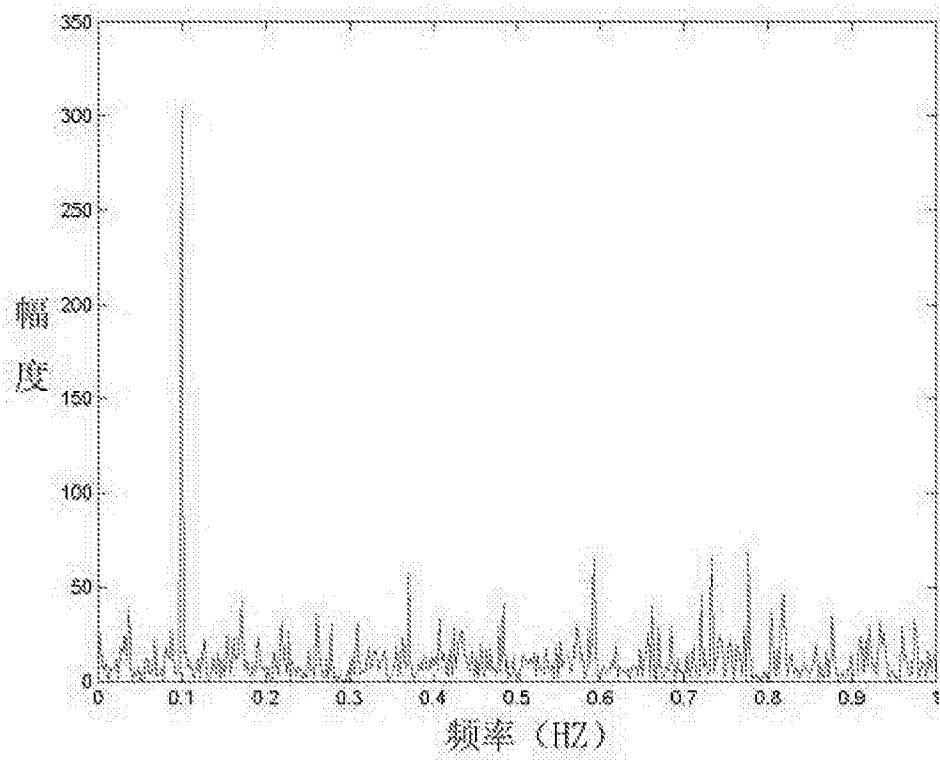


图 7