

基于 Duffing 振子大周期态相轨迹的频率测量方法

刘海波, 吴德伟, 卢 虎, 王永庆, 蒋文婷

(空军工程大学信息与导航学院, 陕西西安 710077)

摘 要: 对 Duffing 振子大周期态相轨迹特性进行了研究, 提出了一种利用 Duffing 振子大周期相轨迹运动实现频率测量的方法. 仿真结果表明, 该方法的检测信噪比下限要高于现有的基于强参考模式的检测方法, 但该方法不存在检测盲区问题, 在单振子频率覆盖方面也有了大幅提高, 极大降低了检测系统的设计难度, 而且单振子即可实现对 chirp 信号的检测, 拓展了 Duffing 振子检测技术的应用.

关键词: Duffing; 相轨迹; 频率; 测量

中图分类号: TP302.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2013) 10-2010-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.10.022

A New Frequency Measuring Method by Using Duffing Oscillator's Phase Trajectory in Great Periodic Motion

LIU Hai-bo, WU De-wei, LU Hu, WANG Yong-qing, JIANG Wen-ting

(Information and Navigation Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077, China)

Abstract: The characteristics of Duffing oscillator's phase trajectory in great periodic motion are analyzed, base on which, a new frequency measuring method is proposed. The simulation results indicate, the detecting signal-to-noise ratio lower limit of the proposed method is higher than that of the existed strong referential detecting method. However, the proposed method has no blind angle, and the frequency detection range is greatly enlarged. As a result, the complexity of the measuring system can be reduced on a large scale. In this method, one Duffing oscillator is capable of measuring chirp signal, which is an exploration for the application of the detection technologies based on Duffing oscillators.

Key words: Duffing; phase trajectory; frequency; measuring

1 引言

Duffing 振子具有对周期信号敏感, 而对噪声具有较强免疫力的特性, 被研究用于强噪声背景下弱周期信号的检测及其各项参数的测量^[1-4]. 文献[5, 6]从理论上证明了 Duffing 振子在大周期状态下具有周期解, 且解唯一, 为利用 Duffing 振子测量未知信号频率奠定了理论基础. 文献[7]利用 Duffing 振子强参考信号检测模式实现弱 chirp 信号频率等参数的估计, 该方法是通过观察 Duffing 振子的一次相变来判断待测信号频率, 并通过构造 Duffing 振子滤波器组才能实现一定频率范围的覆盖, 计算量大, 且结构极为复杂; 文献[8]通过在 Duffing 振子策动力中加入谐振扰动, 利用阵发混沌现象测定未知信号频率, 该方法同样是一种强参考信号检测模式, 单个振子频率覆盖范围有所改善, 但由于阵发混沌现象的产生受到相变过渡带的影

响^[9], 该方法只能在信噪比较高的情况下使用, 检测精度较低. 当谐振频率与待测信号频率相同时, 还需要多次测量以消除检测盲区, 给应用带来不便.

本文利用 Duffing 振子大周期态相轨迹特点, 提出了一种弱信号频率测量方法. 与基于强参考模式的检测方法相比, 虽然检测信噪比下限有所提高, 但该方法结构简单, 不需要构造 Duffing 振子滤波器组便可实现较大频率范围的覆盖, 也不存在检测盲区问题, 该方法单振子即能够对 chirp 信号频率变化率、初始频率等参数进行估计, 为 Duffing 振子检测技术的应用提供了一种新思路.

2 Duffing 振子检测模型及其相轨迹运动特点

Holmes 型 Duffing 振子强参考检测模式的状态方程为^[10, 11]:

$$\begin{cases} \dot{x} = \omega_0 y \\ \dot{y} = \omega_0(-ky + x^3 - x^5 + \gamma \cos \omega_0 t + \epsilon F(t)) \end{cases} \quad (1)$$

式中, k 为阻尼比, ω_0 为系统参考角频率, $-x^3 + x^5$ 为非线性恢复力; $\gamma \cos \omega_0 t$ 为参考信号, γ 为其幅度; ϵ 为输入信号加权因子, 用于调整输入信号幅度; $F(t) = A \cos(\omega t + \varphi) + n(t)$ 为输入信号, $A \cos(\omega t + \varphi)$ 为待检信号, A 、 ω 和 φ 分别为其幅度、角频率和初相; $n(t)$ 为信号噪声. 不考虑输入信号的影响, 随着 γ 由 0 开始增大, Duffing 振子相轨迹将依次出现同宿态、周期分岔、混沌态和大尺度周期态. 强参考信号检测模式检测原理是调整参考信号幅度使得系统处于混沌状态向大周期态转变的临界状态, 当待测信号中含有同频或相近频率的周期信号, 且与参考信号相位一致时, 系统将发生相变, 从而实现检测.

强参考检测模式中单振子存在检测盲区^[12], 频率覆盖极窄^[13], 且不同振子需要单独设置检测阈值, 这导致检测系统的设计极为复杂; 而利用阵发混沌进行检测时, 由于过渡带的影响, 导致检测精度较低^[9]. 本文所提检测方法将系统策动力中的参考信号项去除, 直接利用待测信号作为系统策动力, 利用 Duffing 振子大周期态相轨迹特性实现频率检测, 较好地避免了上述问题. 新的检测方程为:

$$\begin{cases} \dot{x} = \omega_0 y \\ \dot{y} = \omega_0(-ky + x^3 - x^5 + \epsilon F(t)) \end{cases} \quad (2)$$

由于 Duffing 方程为非线性方程, 它不存在精确的解析解, 故数值计算是对其进行研究的一种主要方法^[14,15]. 下面利用数值计算对式(2) Duffing 振子相轨迹特点进行考察.

仿真条件 1 设 $k = 0.5$ ^[16], $\omega = \omega_0 = 2\pi \times 1e3 \text{rad/s}$, 系统初始状态 $(x_0, y_0) = (0, 0)$, 积分步长 $h = 1.1e-5 \text{s}$, $\epsilon = 1$, $n(t)$ 为 -50dBW 高斯白噪声, 并利用定步长四阶-龙哥库塔方法进行计算.

分别调整待测信号幅度 $A = 0.7320$ 和 $A = 0.7325$, 得到系统处于混沌态和大周期态的相轨迹图及其对应的正余弦波形输出如图 1(a)(b)(c)(d)所示. 其中, ϕ 为相轨迹点 (x, y) 对应的相空间角, 且

$$\sin \phi = \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}}, \cos \phi = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} \quad (3)$$

可以看出, 图 1(a)(b)所示的 Duffing 振子混沌态相轨迹具有遍历性和长期不可预测性, 其在分布域内对应的相空间角也不具有规律性, 而图 1(c)(d)所示的大周期态相轨迹规律性明显, 且相轨迹在其分布域内的运动周期与策动力周期相同.

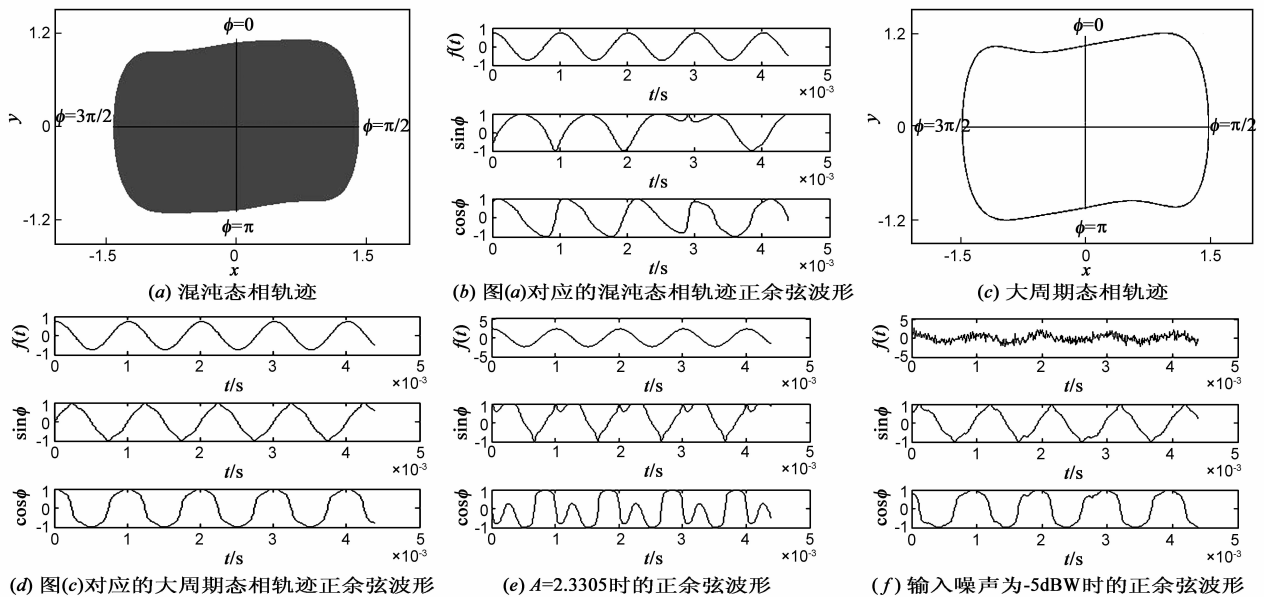


图1 Duffing振子相轨迹及其正余弦波形

调整 $A = 2.3305$, 其他条件如仿真条件 1, 得到在策动力过大情况下系统相轨迹对应的正余弦波形如图 1(e)所示. 可以看出, 相轨迹周期与策动力周期仍然保持相同, 但正余弦曲线变得复杂, 不利于描述与策动力相位的对应关系.

调整 $A = 0.7325$, 将噪声功率提高到 -5dBW , 调整 $\epsilon = 1.2$, 其他条件如仿真条件 1, 相轨迹对应的正余弦波形如图 1(f)所示. 可以看出, 由于噪声较强, 已无法辨别出策动力波形, 但 Duffing 振子相轨迹具有一定的抑制噪声的能力, 正余弦输出波形受噪声影响较小.

通过大量数值仿真,总结得到式(2)大周期态相轨迹及其正余弦曲线主要具有如下几个特点:

(1)策动力幅值在大于临界值的较大范围内浮动时,大周期相态不会改变,且呈中心对称的环状域变化幅度很小.

(2)不考虑噪声影响,系统在稳定大周期运动状态下具有 $2\pi/\omega$ 周期解,且解唯一^[5,6].

(3)大周期状态下,策动力幅度的变化会引起相空间相位与策动力相位之间的对应关系有小幅度的变动,但不会影响两者周期相同的关系.当策动力幅值不变时,相轨迹点与策动力采样点一一对应的关系稳定.

(4)当策动力角频率 ω 偏离参考角频率 ω_0 时,系统随着策动力幅值的增大仍然依次经历同宿态、周期分岔、混沌态和大尺度周期态,只是发生或保持相轨迹运动状态所需的策动力幅值大小与 ω/ω_0 有关.以 $\omega/\omega_0 = 1$ 为基准,随着 ω/ω_0 减小,系统所需策动力幅值降低;而 ω/ω_0 增大,系统所需策动力幅值升高.

(5)Duffing 振子相轨迹运动状态对噪声体现了一定的免疫能力.在强噪声影响下,大周期环状域变得粗糙,但并不改变其运动状态,且从统计上来看,仍与策动力保持同周期的对应关系.

从以上 Duffing 振子大周期相轨迹特点可以看出,其正余弦曲线频率能够准确反映参考频率附近一定范围内的周期待测信号频率信息,而 Duffing 振子对噪声具有一定免疫力的特性使得即使噪声较强情况下,相轨迹的正余弦曲线仍能较好体现待测信号频率.因此,调整输入信号幅度和 Duffing 振子参数,使相轨迹保持在大周期运动状态,通过考察其相轨迹频率信息即可实现待测周期信号频率的测量.下面给出一种利用 Duffing 振子大周期态相轨迹实现频率测量的方法.

3 利用 Duffing 振子大周期相轨迹测量弱信号频率

待测信号表达式重写如下:

$$F(t) = A\cos(\omega t + \varphi) + n(t) \quad (4)$$

其中, $\omega = 2\pi f$, f 为待测信号频率.利用 Duffing 振子大周期相轨迹实现弱信号频率测量的方法原理如图 2 所示,其具体步骤为:

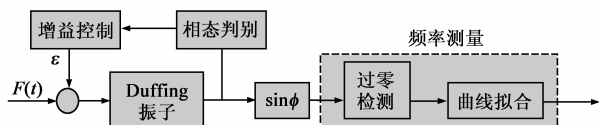


图2 Duffing振子弱信号频率测量原理框图

Step1 将 $F(t)$ 作为输入,放入 Duffing 振子检测系统,调整参考信号角频率 ω_0 ,使其处于待测信号频率附

近,然后调整 ϵ ,通过相态判别使相轨迹运动处于大周期态,得到相轨迹点坐标 (x_i, y_i) , ($i = 1, 2, \dots$).

Step2 根据相轨迹点坐标 (x_i, y_i) 计算对应的正弦值:

$$\sin\phi_i = \frac{x_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}} \quad (5)$$

Step3 测量相轨迹正弦值曲线频率.本文采用过零检测法进行测量:

首先根据相轨迹正弦值曲线过零点位置 u_m ($m = 1, 2, \dots, M$) 计算待测信号瞬时频率 f_m :

$$f_m = \frac{1}{2(u_{m+1} - u_m)h} \quad (6)$$

用 $g_1(t) = at + b$ 对数据 u_m, f_m 进行最小二乘曲线拟合,得到:

$$\begin{cases} \hat{f}' = a \\ \hat{f} = b \end{cases}$$

$$\text{约束条件是 } \min_{a, b} \sum_{k=1}^{M-1} |g(u_k) - f_k|^2 \quad (7)$$

其中, \hat{f} 即为待测信号初始频率估计值, \hat{f}' 为待测信号频率变化率估计值.

测量时,改变参考频率即可实现不同频段周期信号的检测.在强噪声情况下,相轨迹的大周期运动会掺杂少量暂态混沌,在曲线拟合过程中,可以通过剔除突变点的方法去除暂态混沌的影响,而曲线拟合后的频率测量结果可用于调整 Duffing 振子参考频率,使系统相变的阈值稳定在一定范围内,方便输入信号功率的控制.

4 仿真实验

实验 1 设 $k = 0.5$, $\omega_0 = 2\pi \times 1e4 \text{ rad/s}$, $(x_0, y_0) = (0, 0)$, 积分步长 $h = 1.1e - 6 \text{ s}$; 设 $A = \sqrt{2}$, 即待测信噪功率为 0dBW; 设 $n(t)$ 为高斯白噪声, 增益系数 $\epsilon = 0.65$, 检测时间长度设为 1s. 调测待测信号频率和 $n(t)$ 功率, 得到不同信噪比下利用所提方法的 20 次独立测量统计结果如图 3 所示. 其中

期望偏差 = (测量值期望 - 真实值) / 真实值

从图 3 可以看出,待测频率从 $f_L = 9 \text{ kHz}$ 调整到 $f_H = 11.7 \text{ kHz}$, 检测系统测量误差都能够保持在相对较小的水平, 比文献[13]中强参考模式检测方法的实验结果具有更大的频率覆盖范围. 实验数据发现, 随输入信噪比提高, 这一覆盖范围有所增大. 当待测信号频率小于 f_L 时, 检测系统相轨迹与待测信号周期相同的特性急剧变差, 不再适合用于频率测量; 当待测信号频率大于 f_H 时, 相轨迹混沌运动急剧增多, 也不再适合频率测量. 从图 3 还可以看出, 测量值期望偏差随噪声增大而

增大,这是由于噪声影响,使相轨迹在大周期运动状态下掺有少量暂态混沌运动导致的.但在 f_H 附近,期望偏差急剧减小,可能是由于噪声和待测信号在此处产生了随机共振,策动力得以增强的结果.

实验 2 调整 ϵ 的值,其他条件如实验 1,得到在信噪比 $\eta = 0\text{dB}$ 情况下,频率测量值的期望偏差及其均方差随 ϵ 的变化如图 4 所示.可以看出, ϵ 的减小,使得系统可测频段左移,而且 ϵ 不同取值情况下,期望偏差最小点仍位于 f_H 附近.因此,在保证相轨迹处于大周期运动状态的前提下调整 ϵ ,使待测频率值落于 f_H 附近,有

利于减小因噪声引起的期望偏差.

实验 3 为考察检测时间 T 对检测结果的影响,将待测信号频率设定为 10kHz ,其他条件如实验 1.改变系统检测时间 T ,测量值期望偏差和均方差变化如图 5 所示.可见,随着检测时间减小,系统检测性能有所降低,但幅度不大.在 $\eta = 0\text{dB}$, $T = 0.001\text{s}$ 处,频率测量值期望偏差不超过 70Hz ,均方差不超过 180Hz .相比之下,此时 FFT 方法的频率分辨率仅为 1kHz .因此,所提方法具有小数据量的特点.

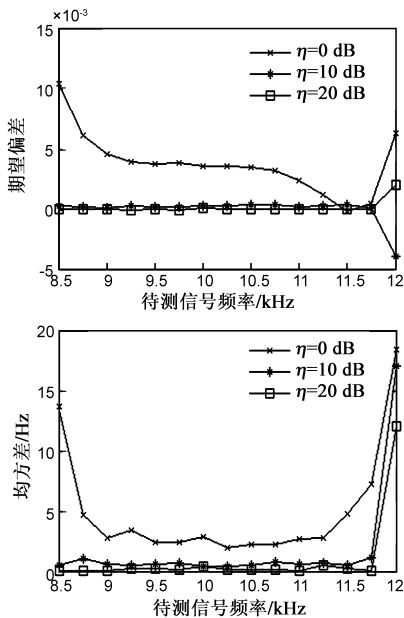


图3 不同信噪比下频率测量值期望偏差和均方差曲线

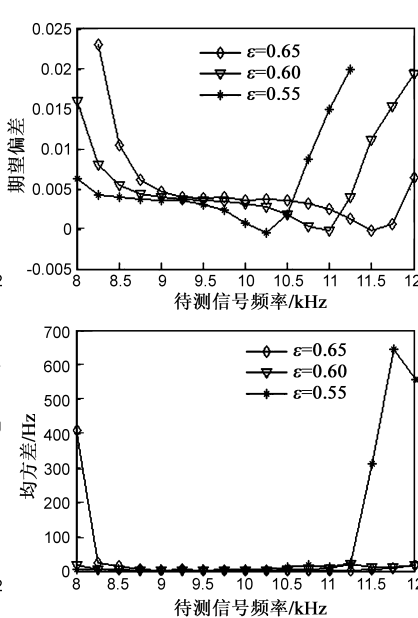


图4 ϵ 不同情况下频率测量值期望偏差与均方差曲线

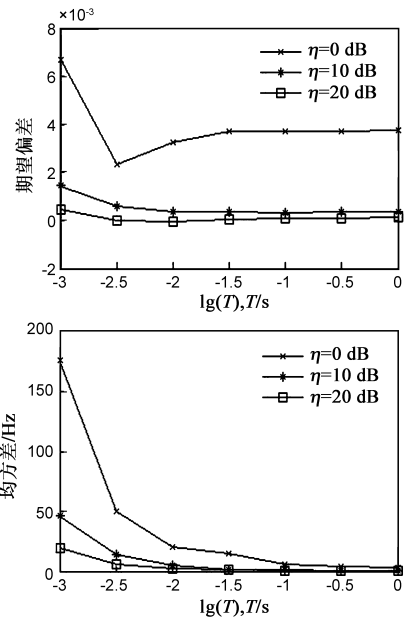


图5 频率测量值期望偏差和均方差随检测时间的变化曲线

实验 4 将待测信号 $F(t)$ 设为 chirp 信号, $F(t) = \sqrt{2}\cos 2\pi(0.5at + 9000)t + n(t)$, 则 $f' = a$, 即为信号的频率变化率, 初始频率为 9kHz ; 设 $\epsilon = 0.65$, 其他条件设置如实验 1. 调整 a 的值和噪声功率, 得到所提方法对待测信号频率及其变化率估计值的 20 次统计结果如图 6 和图 7 所示.

从图 6 和图 7 可以看出, 频率变化率 f' 在 100Hz/s 至 3000Hz/s 内取值, 系统能较为稳定地实现初始频率及其变化率的测量. f' 取值过大, 则测量时间内待测信号瞬时频率超出可测范围, 误差急剧增大; f' 取值过小, 噪声对其测量值的影响凸显, 相对误差明显增加.

实验 5 其他条件如实验 1 不变, 参考文献 [17] 的实验方法, 将 $n(t)$ 通过一个滤波器产生色噪声 $z(t)$, 考察色噪声背景对检测性能的影响. 该滤波器设计为四阶 IIR 低通滤波器, 通带频率为 0.3, 截止频率为 0.5 (归一化频率), 其传递函数为:

$$H(Z) = \frac{\mu_F(1 + 4Z^{-1} + 6Z^{-2} + 4Z^{-3} + Z^{-4})}{1 - 1.3609Z^{-1} + 1.0771Z^{-2} - 0.3854Z^{-3} + 0.0595Z^{-4}} \quad (8)$$

设定 $\mu_F = 4.243e-2$, 使滤波前后 $n(t)$ 和 $z(t)$ 功率几乎相同. 调待测信号频率, 并通过调整 $n(t)$ 功率从而实现 $z(t)$ 功率的调整. 设 $\epsilon = 0.5$, 得到色噪声影响下所提方法在不同信噪比下的 20 次独立测量统计结果如图 8 所示.

可以看出, 在色噪声背景下, 检测系统体现出与实验 1 类似的仿真结果, 比强参考模式检测方法同样具有更宽的检测范围, 在检测性能上也有一定变化. 总结大量实验数据发现, 信噪比提高, 检测的覆盖范围增大, 但不同分布的色噪声对检测系统影响不同. 总体来说, Duffing 振子大周期态对色噪声同样具有抑制能力, 但功率相同情况下, 噪声谱越靠近信号频率, 其对 Duffing 振子相轨迹运动状态的影响越明显, 使得检测的覆盖范围和性能有所降低.

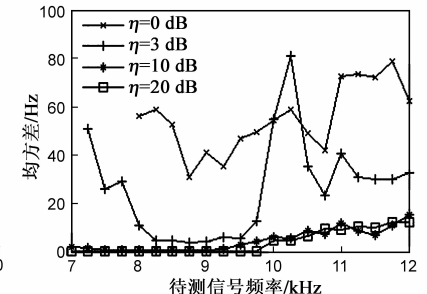
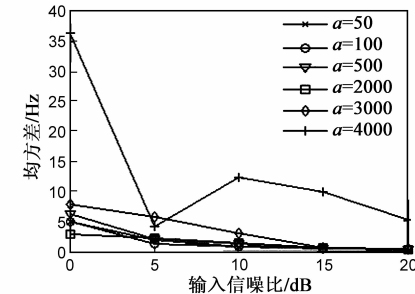
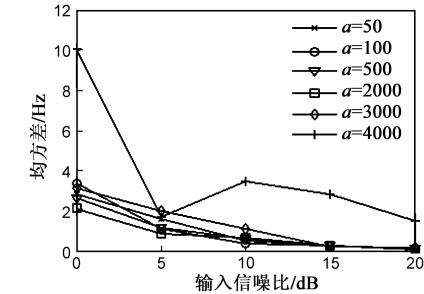
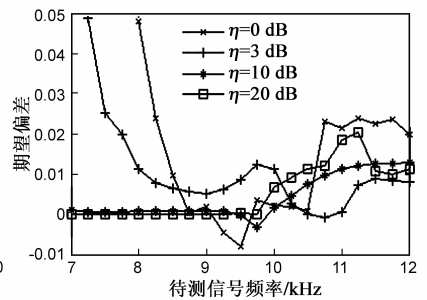
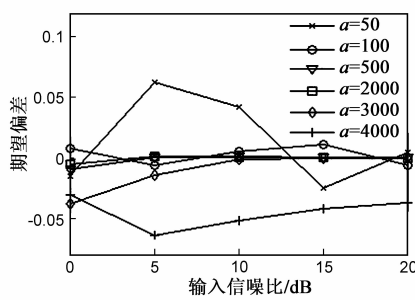
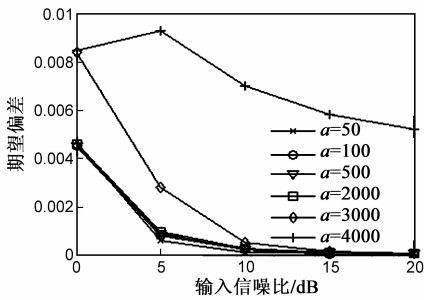


图6 初始频率测量值期望偏差和均方差随输入信噪比的变化曲线

图7 频率变化率测量值期望偏差和均方差随输入信噪比的变化曲线

图8 色噪声背景下频率测量值期望偏差和均方差曲线

5 结论

本文研究了 Duffing 振子大周期态相轨迹特性,提出了一种利用 Duffing 振子大周期相轨迹运动实现频率测量的方法,主要结论如下:

(1)与基于强参考模式的 Duffing 振子检测阵列检测方法相比,所提方法的检测信噪比下限有所提高,但不需要通过增加检测振子消除检测盲区问题,在频率覆盖方面有了大幅提高,因此实现难度极大降低。

(2)在频率检测范围靠近上限部分存在期望偏差最小的区域,可以通过调整输入增益系数的方法将该区域对准待测频率,以减小测量偏差。

(3)所提方法具有小数据量的特点,即较少的数据量即可完成频率估计.单振子即可对 chirp 信号进行测量,在检测能力方面有了拓展。

该方法的局限性在于,它需要在判定系统处于大周期态的情况下才能实现频率测量。

参考文献

[1] 冷永刚,赖志慧,范胜波,等.二维 Duffing 振子的大参数随机共振及微弱信号检测研究[J].物理学报,2012,61(23):230502-1-230502-10.
LENG Yong-gang, LAI Zhi-hui, FAN Sheng-bo, et al. Large parameter stochastic resonance of two-dimensional duffing oscillator and its application on weak signal detection [J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(23): 230502-1 - 230502-10. (in Chinese)

[2] DENG Xiao-ying, LIU Hai-bo, LONG Teng. A new complex

Duffing oscillator used in complex signal detection [J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(17): 2185 - 2191.

[3] 王冠宇,陈大军,林建亚,等. Duffing 振子微弱信号检测方法的统计特性研究[J].电子学报,1998,26(10):38-44.
WANG Guan-yu, CHEN Da-jun, LIN Jian-ya, et al. The statistical characteristics of weak signal detection based on Duffing oscillator [J]. Acta Electronica Sinica, 1998, 26(10): 38 - 44. (in Chinese)

[4] 路鹏,李月.微弱正弦信号幅值混沌检测的一种改进方案[J].电子学报,2005,33(3):527-529.
LU Peng, LI Yue. A modified chaos-based weak sinusoidal signal amplitude detection approach [J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(3): 527 - 529. (in Chinese)

[5] 李月,杨宝俊,林红波,等.基于特定混沌系统微弱谐波信号频率检测的理论分析与仿真[J].物理学报,2005,54(5):1994-1999.
LI Yue, YANG Bao-jun, LIN Hong-bo, et al. Simulation and theoretical analysis on detection of the frequency of weak harmonic signals based on a special chaotic system [J]. Acta Physica Sinica, 2005, 54(5): 1994 - 1999. (in Chinese)

[6] 王坤,关新平,丁喜峰,等. Duffing 振子系统周期解的唯一性与精确周期信号的获取方法[J].物理学报,2010,59(10):6859-6863.
WANG Kun, GUAN Xin-ping, DING Xi-feng. Acquisition method of precise periodic signal and uniqueness of periodic solutions of buffing oscillator system [J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(10): 6859 - 6863. (in Chinese)

[7] 文忠,李丽萍.基于 Duffing 振子的弱 Chirp 信号检测与参数估计[J].自动化学报,2007,33(5):536-539.
WEN Zhong, LI Li-ping. Detection and parameter estimation of

- weak chirp signal using Duffing oscillator [J]. Acta Automatica Sinica, 2007, 33(5): 536 – 539. (in Chinese)
- [8] 翟笃庆, 刘崇新, 刘尧, 等. 利用阵发混沌现象测定未知信号参数[J]. 物理学报, 2010, 59(2): 816 – 825.
ZHAI Du-qing, LIU Chong-xin, LIU Yao, et al. Determination of the parameters of unknown signals based on intermittent chaos [J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(2): 816 – 825. (in Chinese)
- [9] 刘海波, 吴德伟, 金伟, 等. Duffing 振子微弱信号检测方法研究[J]. 物理学报, 2013, 62(5): 050501-1 – 050501-6.
LIU Hai-bo, WU De-wei, JIN Wei, et al. Study on weak signal detection method with Duffing oscillators [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(5): 050501-1 – 050501-6. (in Chinese)
- [10] 李月, 杨宝俊. 混沌振子检测引论[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004. 51 – 55.
LI Yue, YANG Bao-jun. Chaotic Oscillator Detection Introduction [M]. Beijing, Publishing House of Electronics Industry, 2004. 51 – 55. (in Chinese)
- [11] 金天, 张骅. 基于统计方法的混沌 Duffing 振子弱信号检测与估计[J]. 中国科学: 信息科学, 2011, 41(10): 1184 – 1199.
JIN Tian, ZHANG Hua. Statistical approach to weak signal detection and estimation using Duffing chaotic oscillator [J]. Science China: Information Sciences, 2011, 41(10): 1184 – 1199. (in Chinese)
- [12] 姜万禄, 吴胜强, 张建成. Duffing 振子的两种检测微弱信号的方法及区别[J]. 燕山大学学报, 2002, 26(2): 114 – 118.
JIANG Wan-lu, WU Sheng-qiang, ZHANG Jian-cheng. Two methods of weak signal detection of Duffing oscillator and their Difference [J]. Journal of Yanshan University, 2002, 26(2): 114 – 118. (in Chinese)
- [13] WANG Guan-yu, CHEN Da-jun, LIN Jian-ya, et al. The application of chaotic oscillators to weak signal detection [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1999, 46(2): 440 – 444.
- [14] 刘海波, 吴德伟, 戴传金, 等. 基于 Duffing 振子的弱正弦信号检测方法研究[J]. 电子学报, 2013, 41(1): 8 – 12.
LIU Hai-bo, WU De-wei, DAI Chuan-jin, et al. A new weak sinusoidal detection method based on Duffing oscillators [J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(1): 8 – 12. (in Chinese)
- [15] 李月, 徐凯, 杨宝俊. 混沌振子系统周期解几何特征量分析与微弱周期信号的定量检测[J]. 物理学报, 2008, 57(6): 3353 – 3358.
LI Yue, XU Kai, YANG Bao-jun. Analysis of the geometric characteristic quantity of the periodic solutions of the chaotic oscillator system and the quantitative detection of weak periodic signal [J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(6): 3353 – 3358. (in Chinese)
- [16] 芮国胜, 张洋, 苗俊, 等. 联合增益递推的 Duffing 系统弱信号检测算法[J]. 电子学报, 2012, 40(6): 1269 – 1273.
RUI Guo-sheng, ZHANG Yang, MIAO Jun, et al. A weak signal detection method by Duffing system with the gain [J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(6): 1269 – 1273. (in Chinese)
- [17] 李月, 石要武, 马海涛, 等. 淹没在色噪声背景下微弱方波信号的混沌检测方法[J]. 电子学报, 2004, 32(1): 87 – 90.
LI Yue, SHI Yao-wu, MA Hai-tao, et al. Chaotic detection method for weak square wave signal submerged in colored noise [J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(1): 87 – 90. (in Chinese)

作者简介



刘海波 男, 1985 年 1 月出生于江苏省连云港市, 空军工程大学信息与导航学院博士在读, 主要研究方向为导航对抗及弱信号检测技术.

E-mail: 13992864936@126.com



吴德伟 男, 1963 年出生于吉林省吉林市, 博士, 现为空军工程大学信息与导航学院教授、博士生导师, 主要研究方向为军用导航理论技术、导航对抗技术.

E-mail: wudewei74609@126.com