

基于信号预处理的杜芬振子弱信号检测方法^{*}芮国胜¹ 刘林芳² 张嵩³

(1. 海军航空工程学院电子信息工程系 烟台 264001;

2. 海军航空工程学院信号与信息处理山东省重点实验室 烟台 264001)

摘要: 杜芬振子对周期信号极其敏感,对噪声具有较强免疫力,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。为进一步提高杜芬振子检测含噪信号的性能,本文提出了先对待测信号预处理再送入杜芬振子的弱信号检测算法,并在理论上进行了证明。该方法先将待测信号分割、叠加、延拓再送入杜芬振子进行检测,仿真表明该方法在将信号分割成多段、叠加、延拓时可获得较大的信噪比增益,其中分割数目为3时,检测信噪比下限降低约为2 dB,分割数目为5时,检测信噪比下限降低约为3 dB。

关键词: 混沌检测;弱信号检测;杜芬振子

中图分类号: TP911.7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 0322

Duffing oscillator weak signal detection method based on Signal preprocessing

Rui Guosheng¹ Liu Linfang² Zhang Song³

(1. Dept. Electronic Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China;

2. Signal and information processing provincial key laboratory in Shandong, Naval Aeronautical
and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: Duffing oscillator is extremely sensitive to the periodic signal and has strong immunity to noise. So it is used for the detection of weak periodic signal in strong noise background and the measurement of its parameters. In order to further improve its detection performance, a new method of Duffing oscillator weak signal detection based on signal preprocessing is proposed and is proved in theory. The new method firstly processes the signal by segmentation, stacking, extension then sends the processed signal to Duffing oscillator to detect. Simulation results show that the proposed method can obtain a large SNR gain, when the segmentation number is three, the lower limit of detection SNR reduces about 2dB, when the number of segmentation is five, the lower limit of detection SNR reduces about 3dB.

Keywords: chaotic detection; weak signal detection; Duffing oscillator

1 引言

混沌理论应用于弱信号检测最早由 Birx 于 1992 年提出^[1],此后越来越多的国内外学者对其进行了深入研究,使混沌弱信号检测理论得到了较快发展。在研究初期,混沌弱信号检测理论主要集中于单一频率周期信号的检测^[2-3]。近年来,研究者将混沌信号检测的理论应用于通信信号的解调和保密通信中^[4-7],取得了较好效果。在范德波尔振子、杜芬振子、洛伦兹振子、Rossler 振子等诸多振子中,杜芬振子是一种典型的混沌振子,广泛应用在弱信号检测上,具有初值敏感性、抗噪性强、灵敏度高等特点^[8]。文献[9]应用定量分析方法研究了某一类杜芬振子系统周期解的唯一性及其在一定条件下精确周期信号的获取方法;文献

[10]提出了一种改进的基于杜芬振子的弱信号检测方法,该方法通过设置相关参数使系统阈值与微弱周期信号幅值大致相当来检测幅值更小的正弦信号;为利用杜芬振子检测不同频率信号,文献[11]提出了变尺度微弱特征信号检测方法,仅用一组确定的参数来检测任意频率、任意相位的特征信号;文献[12]研究了杜芬系统大周期态的相轨迹特性,提出了一种利用杜芬振子大周期相轨迹运动实现频率测量的方法。上述文献集中于杜芬振子检测弱信号方法的研究,没有研究如何进一步降低检测信号的信噪比下限。

为检测信噪比更低的信号,本文在杜芬振子弱信号检测的基本原理的基础上,提出了一种基于信号分割的预处理手段,然后再送入杜芬振子进行检测,并对其进行了理论证明和仿真验证,仿真结果表明该方法可以明显提高检测

效果。

2 杜芬振子的弱信号检测原理

2.1 弱信号检测方法

杜芬方程本质是一个二阶微分方程。在众多的混沌系统模型中,杜芬振子系统是应用和研究较为充分的模型之一,在微弱信号检测领域应用较为广泛的是 Holmes 型杜芬方程,其标准形式如下:

$$\ddot{x}(t) + k\dot{x}(t) - \alpha x(t) + \beta x^3(t) = \gamma \cos(t) \quad (1)$$

式中: k 为阻尼比, $-\alpha x(t) + \beta x^3(t)$ 为非线性恢复力, $\gamma \cos(t)$ 为系统内置周期策动力。在系统参数设置确定的条件下,随着周期策动力幅值 γ 由小变大,系统将在相图上依次呈现出同宿轨道、分岔状态、混沌状态;继续增大 γ 值,直至 $\gamma > \gamma_d$ 时,系统进入大尺度周期等状态, γ_d 为系统的相变阈值。应用杜芬振子进行弱信号检测,主要利用其混沌状态到大周期状态的相变来判断信号是否存在。选定式(1)中系统参数为: $k = 0.5, \alpha = 1, \beta = 1, (x_0, y_0) = (0, 0)$ 。系统的混沌状态与大周期状态相图如图 1 所示。

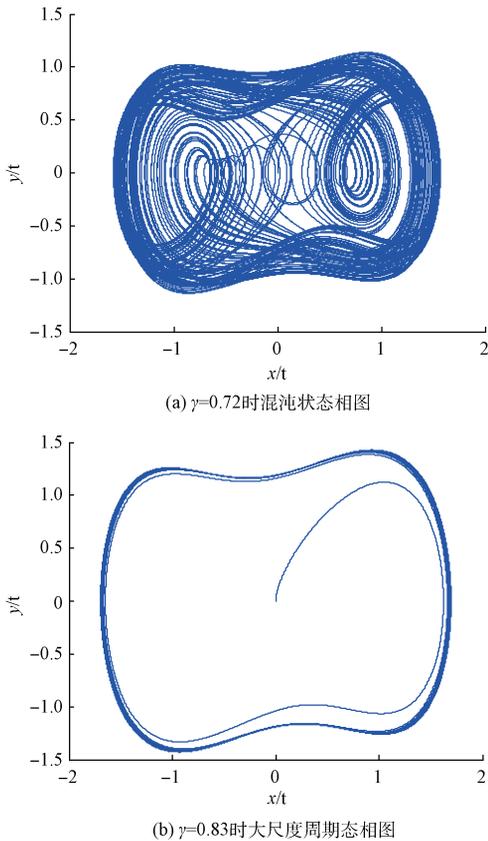


图 1 杜芬系统混沌态和大周期态相图

针对式(1)的杜芬振子模型,构建弱信号检测模型:

$$\ddot{x}(t) + k\dot{x}(t) - \alpha x(t) + \beta x^3(t) = \gamma_c \cos(t) + s(t) \quad (2)$$

式中: γ_c 为系统内置周期策动力幅值, $s(t) = a \cos(t) + \eta(t)$ 为待检测信号, $a \cos(t)$ 是与周期策动力 $\gamma_c \cos(t)$ 同频

同相的待检测信号,且 $a > 0$, $\eta(t)$ 为加性噪声。

为利用杜芬振子对不同频率的信号进行检测,将式(1)变换为微分方程组形式,构建弱信号检测模型如式(3),式中 $s(t) = a \cos(\omega t) + \eta(t)$ 为待检测信号, ω 为待测信号的角频率。

$$\begin{cases} \dot{x} = \omega y \\ \dot{y} = \omega(-ky + x - x^3 + \gamma_c \cos(\omega t) + s(t)) \end{cases} \quad (3)$$

杜芬振子只对周期信号敏感,对噪声具有免疫力,换句话说噪声不能使系统发生相变。因此,为使仅有信号存在时振子发生相变,要满足以下条件: $\gamma_c \leq \gamma_d, \gamma_c + a > \gamma_d$ 。

2.2 ZCN 相变判别标准

杜芬振子弱信号检测的关键是对混沌振子的相变判别^[13],目前混沌振子相变判别的方法有梅尔尼克夫方法、什尔尼克夫方法、李雅普诺夫指数方法、图像识别法、过零检测法、双振子差分方法^[14]、相位差值法等。其中过零周期数(zero-crossing number, ZCN)算法具有计算量少、稳定可靠的优点。其基本原理是根据相图上一定时间内轨迹定向穿过零点的次数来判断是否进入大尺度周期状态。在大周期状态下系统的过零周期数恒定,且大于混沌状态下系统的过零周期数;在混沌状态下系统的过零周期数没有固定值。

在 $k = 0.5, \alpha = 1, \beta = 1, (x_0, y_0) = (0, 0), \omega = 1$ 时,得到本文所用杜芬振子在不同策动力下的过零周期数特性如图 2 所示。可以看出,随着策动力幅值的增加,ZCN 逐渐增大,直到 $\gamma = 0.824$ 时达到最大值 320,此时系统进入大周期状态;随着策动力幅值继续增加,ZCN 保持不变。

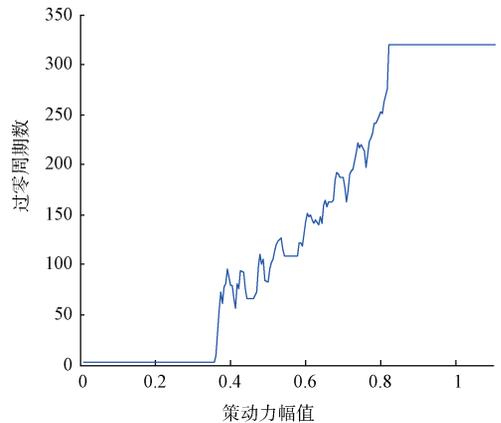


图 2 不同策动力幅值下的过零周期数曲线

3 信号预处理的杜芬振子弱信号检测方法

3.1 算法描述

为利用杜芬振子检测信噪比更低的信号,本文提出了信号分割、叠加、延拓检测算法,其步骤如下:

1)将含噪待测信号均分成 N 段,为方便性能分析可以认为每段分割后信号的初始相位相同;

- 2) 结合对应叠加的手段,将 N 段信号累积并取平均;
- 3) 将新的累积信号重新延拓到原始信号长度;
- 4) 采用杜芬模型检测新的重构信号。

3.2 理论分析

结合上文的思想描述对文中算法进行理论证明。由式(2)知含噪待测信号为: $s(t) = a\cos(t) + \eta(t)$, $\eta(t)$ 为高斯白噪声。将信号分割成 N 段后,设采样间隔为 Δt ,每段采样点数为 M ,则第 i 段信号第 j 个采样点为:

$$s_{ij} = a\cos[(i-1)M\Delta t + (j-1)\Delta t] + \eta[(i-1)M\Delta t + (j-1)\Delta t] = A_{ij} + \eta_{ij} \quad (4)$$

式中: $A_{ij} = a\cos[(i-1)M\Delta t + (j-1)\Delta t]$, $\eta_{ij} = \eta[(i-1)M\Delta t + (j-1)\Delta t]$ 。叠加取平均后相应抽样点值为:

$$s_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_{ij} + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \eta_{ij} \quad (5)$$

由于 $a\cos(t)$ 为确定性周期信号,对应于不同的分段中相应的取样点其值基本相同,而 $\eta(t)$ 为高斯白噪声,故式(5)变为:

$$s_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s_{ij} = A_j + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \eta_{ij} \quad (6)$$

设噪声有效值为 σ_n ,则分割、叠加之前的信噪比为:

$$SNR_{input} = \frac{A_j}{\sigma_n} \quad (7)$$

分割、叠加之后由式(6)可知,噪声累加取平均,此时噪声的均方值为:

$$\overline{\eta_{ij}^2} = E\left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \eta_{ij}\right]^2 = \frac{1}{N^2} E\left[\sum_{i=1}^N \eta_{ij}^2\right] + \frac{1}{N^2} \times 2E\left[\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{k=i+1}^N \eta_{ij} \eta_{kj}\right] \quad (8)$$

式中: $E\left[\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{k=i+1}^N \eta_{ij} \eta_{kj}\right]$ 表示不同时刻噪声取样值两两相乘之和的数学期望均值,当分割的每段信号足够长时,不同时刻噪声取样值互不相关,其乘积的数学期望值为零,因此式(8)变为:

$$\overline{\eta_{ij}^2} = \frac{1}{N^2} E\left[\sum_{i=1}^N \eta_{ij}^2\right] = \frac{1}{N} \sigma_n^2 \quad (9)$$

此时噪声的有效值为:

$$\sigma_{nout} = \sqrt{\overline{\eta_{ij}^2}} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sigma_n \quad (10)$$

此时信噪比为:

$$SNR_{output} = A_j / \frac{1}{\sqrt{N} \sigma_n} = \sqrt{N} \frac{A_j}{\sigma_n} \quad (11)$$

由式(7)和式(11)可得将信号分割、叠加后的信噪比增益为:

$$SNIR = \frac{SNR_{output}}{SNR_{input}} = \sqrt{N} \quad (12)$$

因此,将信号分割、叠加、延拓算法可以改善信噪比。

3.3 仿真实验

设计仿真实验,参数设置与上文一致,分别对现有方法

和本文提出的新方法进行仿真验证,每个信噪比点进行1000次蒙特卡罗仿真,计算其能检测到信号的概率,得到在不同信噪比下的仿真概率曲线如图3所示。对于本文所提的方法,由式(12)可知 N 越大信噪比改善越好,检测性能提高越高。仿真时分别以 $N=3, N=5$ 为例进行验证,不失一般性。

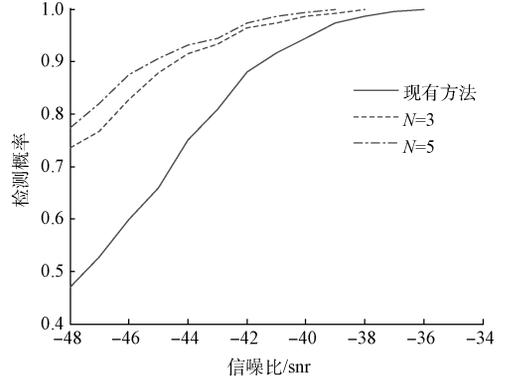


图3 分割成3段和5段时不同信噪比下检测概率曲线

由图3可以看出:

- 1) 现有方法和文中方法检测弱信号时的检测概率随着信噪比的增加而增加;
- 2) 文中方法检测概率明显高于现有方法的检测概率,说明本文所提方法具有更好的检测性能;
- 3) $N=5$ 时检测概率高于 $N=3$ 时的检测概率,验证了本文所提方法 N 越大检测效果越好。
- 4) 检测概率为1时,现有方法检测信噪比下限 $SNR = -36$ dB,本文所提方法 $N=3$ 时信噪比下限 $SNR = -38$ dB,降低了约2 dB; $N=5$ 时信噪比下限 $SNR = -39$ dB,降低了约3 dB。

因此,文中所提的新方法具有更好的检测效果。

4 结论

文章研究了杜芬振子弱信号检测的基本原理,在此基础上提出了基于信号分割预处理的方法,以降低其检测信噪比下限并从理论上进行了证明。仿真结果表明:本文算法可以有效提升系统检测性能,进一步降低系统的可检测信噪比门限。其中分割数目为3时检测信噪比下限能降低约2 dB,分割数目为5段时检测信噪比下限能降低约3 dB。

参考文献

[1] BIRX D L, PIPENBERG S J. Chaotic oscillators and complex mapping feed forward networks (CMFFNS) for signal detection in noisy environments[C]//1992. IJCNN., International Joint Conference on Neural Networks. IEEE, 1992(2): 881-888.

- [2] CHONGSHENG L. Study of weak signal detection based on second fft and chaotic oscillator[J]. Nature and Science. 2005, 3(2):59-64.
- [3] 张嵩, 芮国胜, 段鲁生, 等. 二进制调制信号 Duffing 振子检测方法及其抗噪声机理分析[J]. 电讯技术, 2011, 51(10): 15-19.
- [4] 吴勇峰, 张世平, 孙金玮, 等. 基于 Duffing 振子的 BPSK 载波信号检测方法研究[J]. 高技术通讯, 2011, 21(9): 979-984.
- [5] 张嵩, 芮国胜, 孙文军, 等. Duffing 振子中随机微分方程的"欧拉-丸山"数值解法[J]. 电子测量技术, 2011, 34(3): 37-40, 61.
- [6] 潘勃, 李骞, 冯金富, 等. 一种新的离散混沌同步保密通信方案[J]. 计算机应用, 2010, 30(1): 198-202.
- [7] 谢涛, 魏学业, 王钰, 基于混沌振子周期区域的微弱信号检测方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(6): 47-51.
- [8] 行鸿彦. 基于压缩感知的脉冲同步的混沌保密通信系统[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(7): 1510-1517.
- [9] 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.
- [10] 任志玲, 刘银报, 史旭鹏. 基于 Duffing 振子的弱正弦信号检测的改进[J]. 计算机测量与控制, 2011, 19(6): 1301-1303.
- [11] 范胜波, 赖志慧, 冷永刚, 等. 基于 Duffing 振子的变尺度微弱特征信号检测方法研究[J]. 物理学报, 2012, 61(5): 1-9.
- [12] 赵志宏, 杨绍普, 刘永强. 基于 Duffing 振子的随机共振研究[J]. 动力学与控制学报, 2014, 12(2): 160-164.
- [13] 孙金玮, 吴勇峰, 张世平. 用相位差值判别 Duffing 振子相变的新方法[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(1): 161-164.
- [14] 芮国胜, 张洋, 张嵩, 等. 联合增益递推的 Duffing 系统弱信号检测算法[J]. 电子学报, 2012(6): 1269-1273.
- [15] 徐新智, 郭静波. 基于状态估计的混沌直扩信号联合均衡与解调[J]. 物理学报, 2011, 60(2): 128-134.

作者简介

芮国胜, 1968 年出生, 2001 年于哈尔滨工程大学获信号与信息处理专业博士学位, 现为教授、博士生导师, 主要研究方向为现代通信系统、小波理论与应用以及军事通信工程等。

刘林芳, 1990 年出生, 现为海军航空工程学院硕士研究生, 研究方向为通信信号的混沌振子检测。

E-mail: liulinfangsdu@163.com

张嵩, 1979 年出生, 博士, 讲师, 主要从事通信信号的混沌振子检测方面的研究。

(上接第 122 页)

- [2] WILLIAMS C. Robust chaotic communications exploiting waveform diversity. Part 1: correlation detection and implicit coding[J]. Communications, IET, 2008, 2(10): 1213-1222.
- [3] LIN I S, WEINER A M. Selective correlation detection of photonic generated ultrawideband RF signals[J]. Journal of Lightwave Technology, 2008, 26(15): 2692-2699.
- [4] 杨杉, 赵杉, 王建. 基于小波阈值处理的弱周期脉冲信号混沌检测[J]. 计算机仿真, 2014, 31(11): 332-335.
- [5] 胡华, 钟洁. 新型锁相放大器的设计[J]. 电子测量技术, 2014, 37(8): 16.
- [6] 夏均忠, 刘远宏, 冷永刚, 等. 微弱信号检测方法的现状分析[J]. 噪声与振动控制, 2011(3): 156-161.
- [7] 查光明, 熊贤祚. 扩频通信[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2006: 64-75.
- [8] 张群英. 伪随机序列编码脉冲信号在近地雷达中的应用研究[J]. 电子信息学报, 2011, 33(2): 424-428.
- [9] 张宝荣, 郑德忠, 孙长伟, 等. 基于伪随机序列的微弱光信号检测[J]. 电子学报, 2009, 37(9): 2083-2084.
- [10] 徐立平, 胡斌, 周边. 一类 m 列三值互相关函数的证明[J]. 息工程大学学报, 2015, 16(1): 1-2.

作者简介

谌东, 1984 年出生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电子对抗总体技术。

E-mail: summer20140701@163.com

何林, 1991 年出生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为光电测量技术。

陈树春, 1982 年出生, 本科, 工程师, 主要研究方向为电子对抗总体技术。

温强, 1963 年出生, 硕士, 教授, 主要研究方向为光电测量技术。

E-mail: wenq1303@163.com