

12-12-2019

Pulse Signal Detection Based on Dual Extended Duffing Oscillators

Wenmao Luo

Department of Telecommunications, Nanjing College of Information Technology, Nanjing 210023, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Pulse Signal Detection Based on Dual Extended Duffing Oscillators

Abstract

Abstract: Because the chaotic oscillator can detect signal under lower SNR than the usual signal detection methods, it has been widely studied. In order to extend the application range of the existing chaotic oscillator to aperiodic pulse signal detection, a detection method based on dual Duffing oscillator is proposed. The method uses the difference between the state variables of two generalized time scale Duffing oscillators to detect signal. By selecting the system parameters rationally, *the method can detect aperiodic square pulse while the SNR is as low as -30 dB*, and detect signals at lower SNR than existing methods. Simulation results show that *the method can be applied to signal detection in a wide range of signal sampling frequency and a wide range of signal amplitude*.

Keywords

pulse signal detection, dual chaotic oscillator, Duffing oscillator, variable time scale

Recommended Citation

Luo Wenmao. Pulse Signal Detection Based on Dual Extended Duffing Oscillators[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(7): 1416-1420.

基于双扩展型 Duffing 振子的脉冲信号检测方法

罗文茂

(南京信息职业技术学院通信学院, 江苏 南京 210023)

摘要: 由于混沌振子能达到比通常的信号检测方法更低的信噪比, 所以得到了广泛的研究。为了拓展现有混沌振子对非周期脉冲信号检测的适用范围, 提出了一种基于双扩展型 Duffing 振子的检测方法。该方法利用两个广义时间尺度变换 Duffing 振子之间的状态变量差值检测信号, 通过合理选择系统参数, 可以检测信噪比低至 -30 dB 的非周期方波脉冲, 比现有方法能达到更低的信号检测信噪比。通过仿真发现该方法能适用于多样的信号采样频率、很宽的信号幅值范围。

关键词: 脉冲信号检测; 双混沌振子; Duffing 振子; 变时间尺度

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2019) 07-1416-05

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.17-0259

Pulse Signal Detection Based on Dual Extended Duffing Oscillators

Luo Wenmao

(Department of Telecommunications, Nanjing College of Information Technology, Nanjing 210023, China)

Abstract: Because the chaotic oscillator can detect signal under lower SNR than the usual signal detection methods, it has been widely studied. In order to extend the application range of the existing chaotic oscillator to aperiodic pulse signal detection, a detection method based on dual Duffing oscillator is proposed. The method uses the difference between the state variables of two generalized time scale Duffing oscillators to detect signal. By selecting the system parameters rationally, *the method can detect aperiodic square pulse while the SNR is as low as -30 dB*, and detect signals at lower SNR than existing methods. Simulation results show that *the method can be applied to signal detection in a wide range of signal sampling frequency and a wide range of signal amplitude*.

Keywords: pulse signal detection; dual chaotic oscillator; Duffing oscillator; variable time scale

引言

自 1963 年洛伦兹提出混沌理论以来, 混沌理论得到了广泛的研究。在工程领域, 混沌从一种被认为是有害的现象转变到一种具有实际应用价值的现象加以讨论。混沌已经在工程中取得了广泛的

应用, 如混沌保密通信、混沌神经网络、混沌优化方法、天气系统等。本文探讨的混沌信号检测是混沌理论的一个应用分支。

如何在噪声中提取信号是许多工程技术不可忽略的一个重要环节, 传统的方法有相关法、小波去噪、谱分析、独立成分分析等, 而利用混沌理论检测信号^[1-2]则提出的时间不长。目前混沌信号检测只是处于起步阶段, 在信号检测类型、信号检测的方法等方面都有待进一步推进。

适用于微弱信号检测的混沌方法较少, 绝大部分的检测方法使用了 Duffing 振子^[3-5], 少数使用了



收稿日期: 2017-05-27 修回日期: 2017-08-08;
基金项目: 国家自然科学基金(61071022), 南京信息职业技术学院自然科学基金(YK20180501), 南京信息职业技术学院科技创新团队资助;
作者简介: 罗文茂(1975-), 男, 四川乐山, 硕士, 副教授, 研究方向为信号处理。

<http://www.china-simulation.com>

• 1416 •

Lorenz 振子、类 Liu 振子等。

已有的混沌信号检测方法仅能检测周期信号、非周期脉冲信号, 如 chirp 信号则无法检测, 其能检测的信号类型有待拓展。混沌信号检测的方法现在仅有观察相变^[6]和状态变量差异^[7]2 种方法, 其方法论有待拓展。

对于非周期脉冲信号检测问题较少文献讨论, 文献[8]提出了基于扩展型 Duffing 振子的检测方法, 该方法利用单一的变尺度 Duffing 振子的相变对非周期脉冲信号进行了检测, 并指出其检测信噪比比文献[9]的要低, 但是其问题在于只能检测脉冲的存在性, 不能对脉冲的具体参数进行估计。文献[9]利用环形耦合 Duffing 振子间的同步突发来检测非周期脉冲信号, 是目前可见的比较有效的一种方法, 但如后所述, 该方法还存在一些问题。

文献[8]提出扩展型 Duffing 振子比环形耦合 Duffing 振子所采用的常规 Duffing 振子对噪声的抑制作用更强, 有鉴于此, 本文提出了一种基于双扩展型 Duffing 振子的微弱非周期脉冲信号检测方法。通过合理选择系统参数, 本文方法能适用于不同的信号采样频率、很宽的信号检测动态范围, 可以检测到更窄的脉冲信号, 即检出信号的信噪比门限更低, 仿真结果支持了这一结论。

1 环形耦合 Duffing 振子的性能分析

对于文献[9]提出的双向环形耦合 Duffing 振子, 当振子数为 3 时, 其形式为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = y_1 \\ \dot{y}_1 = -0.32y_1 + x_1 - x_1^3 - 0.1(x_1 - x_3) - \\ \quad 0.1(x_1 - x_2) + r \cos(t) + s(t) + n(t) \\ \dot{x}_2 = y_2 \\ \dot{y}_2 = -0.32y_2 + x_2 - x_2^3 - 0.1(x_2 - x_1) - \\ \quad 0.1(x_2 - x_3) + r \cos(t) \\ \dot{x}_3 = y_3 \\ \dot{y}_3 = -0.32y_3 + x_3 - x_3^3 - 0.1(x_3 - x_2) - \\ \quad 0.1(x_3 - x_1) + r \cos(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: x_1 、 x_2 、 x_3 、 y_1 、 y_2 、 y_3 为 3 个振子的状态变

量, 阻尼系数为 0.32, 耦合系数为 0.1, r 为周期驱动力幅度, $s(t)$ 是待检测信号, $n(t)$ 是噪声。对于第一个振子, $-0.32y_1$ 是阻尼力, $x_1 - x_1^3$ 是线性、非线性回复力, $-0.1(x_1 - x_3)$ 等是振子间线性回复力的耦合项, $r \cos(t)$ 是周期驱动力。

将信号加入由 3 个振子构成的双向环形耦合 Duffing 振子系统中的一个振子的周期驱动力中, 由于 Duffing 振子对一定强度噪声的免疫能力, 如果只是噪声输入了振子系统, 3 个振子会始终保持同步状态。但是如果噪声中混入了一定时宽和幅度(即一定能量)的脉冲信号, 可以观测到加入信号的振子和其它振子间会出现同步突变现象, 即从 $y_3 - y_1$ 中可以看出该现象。从同步突变中可以看出脉冲信号出现的上下沿位置, 突变的幅度反应了脉冲信号的能量大小。以上描述即为双向环形耦合 Duffing 振子系统对微弱脉冲信号的检测原理。

通过定步长 4 阶龙格库塔法仿真了该混沌系统对微弱非周期脉冲信号的检测效果, 其中 $r=0.23$, 此时 3 个振子均处于倍周期分岔的状态, 振子初始值 $[-0.35; -0.65; -0.2; -0.15; -0.4; -0.5]$ 。信号采样时间间隔为 0.08 s, 采样点数为 10 000 点时, 按时间顺序依次加入 8 个方波脉冲, 这 8 个脉冲的时宽、幅度分别为: 4 s、2、4 s、1、4 s、0.5、12 s、0.5、20 s、0.5、28 s、0.5、36 s、0.5、44 s、0.5, 脉冲叠加的加性高斯白噪声均值为 0、方差为 1, 其噪声混合脉冲的信号如图 1 所示, 经过环形耦合振子系统输出的信号为图 2 所示。

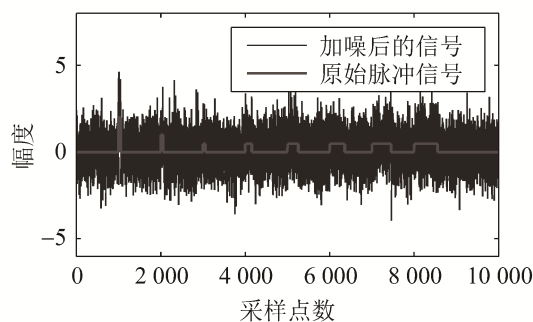


图 1 采样点数为 10 000 时的输入信号
Fig. 1 Input signal with a sampling number of 10 000

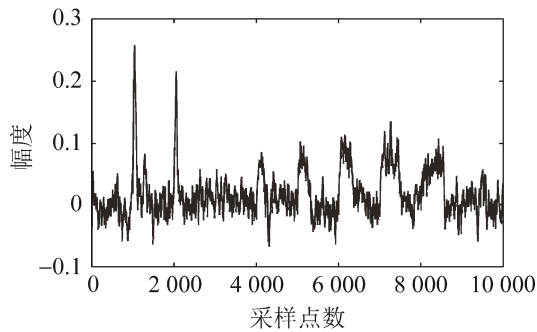


图 2 振荡器输出信号 $(y_3 - y_1)$
Fig. 2 Oscillators' output signal $(y_3 - y_1)$

通过进一步仿真可以发现在脉冲信号时宽保持不变的情况下, 采样频率越高检测性能越好。其原因在于数值求解时截断误差的影响, 不同的数值算法的求解结果也是不一样的。在现实脉冲检测中, 由于脉冲宽度无法改变, 应该加大信号采样频率, 以获取更好的数值求解精度, 得到更理想的检测结果, 当然其不利的一面在于对硬件的要求会更高。

为了降低脉冲信号检测的信噪比门限, 并改善环形耦合 Duffing 振子的一些缺陷, 提出一种基于双扩展型 Duffing 振子的微弱脉冲信号检测方法。后续分析表明, 该方法与双向环形耦合振子相比在脉冲信号检测的多个方面都具有优势。

2 双扩展型 Duffing 振子脉冲检测

扩展型 Duffing 振子利用时间尺度变换方法, 将 Duffing 振子在频率上进行拓展, 使 Duffing 振子能适应任意频率参数信号。扩展型 Duffing 振子的形式为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = y_1 \\ \dot{y}_1 = -\omega_0 k y_1 + \omega_0^2 (x_1 - x_1^3 + r \cos(\omega_0 t)) + \omega_0^2 (s(t) + n(t)) \end{cases} \quad (2)$$

式中: ω_0 是周期驱动力的角频率。

文献[8]利用该扩展型 Duffing 振子进行了微弱脉冲信号的检测, 其检测原理是脉冲信号会使 Duffing 振子从临界混沌状态向大周期态转换这一相变过程。该文献指出该模型对微弱脉冲信号的检测信噪比可以达到-40 dB 左右, 同时可以克服传

统 Duffing 振子的一些局限性, 如临界幅值的多边性、不确定性等。但是该文献只是通过相变检测非周期脉冲信号的有无, 并不能检测脉冲信号的个数、出现时刻、脉冲宽度、幅度等信息, 所以在需要检测脉冲信号的具体信息时并不适用。

本文将两个相同参数的扩展型 Duffing 振子构成双振子系统, 系统的输出由 2 个振子的状态变量相减(即 $y_2 - y_1$)得到。

将待检测信号加入其中一个振子中, 而另一个振子保持自激振荡, 由于待检测信号对振子状态的扰动, 导致其与自激振荡振子状态失步, 从两个振子的输出变量之间的差值即可显示出待检测脉冲的信息。

通过仿真总结出该系统的设计规律如下:

(1) 振子状态的选择

由于倍周期分岔和大周期状态是比较有规律的振子状态, 所以可以利用这 2 个状态的振子进行信号检测。如上一节所述的双向环形耦合振子检测脉冲信号即利用振子的倍周期分岔状态。但是对于双扩展型 Duffing 振子而言, 经过仿真发现其在大周期态下才能很好检测脉冲信号, 而倍周期分岔状态下检测效果很差。

(2) 周期驱动力的角频率和采样频率的选择

通过仿真发现, 周期性驱动力的角频率和信号的采样频率有相应的制约关系。信号的采样频率越高, 周期性驱动力的角频率应该越大才能保证信号的检测效果。具体而言, 信号的采样周期和周期性驱动力的角频率的乘积在 0.1 左右时信号检测的效果最佳, 其值偏离 0.1 较多时脉冲检测效果将变得很差。

3 仿真分析

在以下仿真中, 双扩展型 Duffing 振子的参数都固定为: 阻尼系数为 0.7, 周期性驱动力的幅度为 1.4、角频率为 10 000 rad/s, 信号采样频率为 128 205 Hz, 采样点数为 100 000, 双振子的初始值都为 0, 此时振子处于大周期状态。

3.1 双扩展型 Duffing 振子脉冲检测仿真

(1) 对大信号进行检测

在振子中加入方差为 0.1 的加性高斯白噪声, 在噪声中混入 3 个幅度为 0.8、采样点数为 15 点的单极性脉冲, 输入信号如图 3 所示。可以看出脉冲信号被噪声淹没, 不能分辨出脉冲信号的细节。该信号通过双扩展型 Duffing 振子的输出(即 2 个振子的状态变量之差: y_2-y_1)如图 4 所示, 可以看出振子脉冲可以被正确检出。

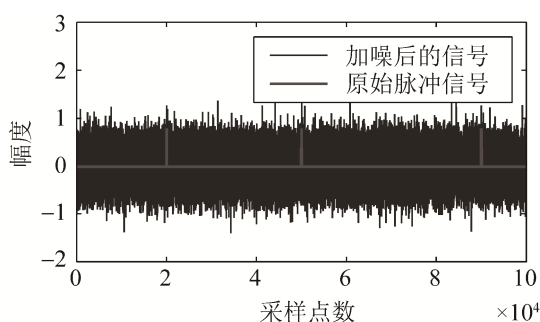


图 3 采样点数为 100 000 时的输入信号
Fig. 3 Input signal with a sampling number of 100 000

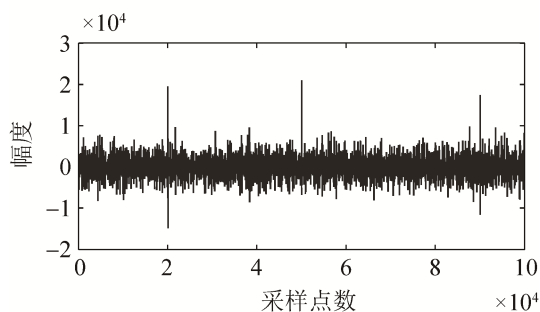


图 4 双扩展振子输出信号(y_2-y_1)
Fig. 4 Dual extended oscillators' output signal (y_2-y_1)

由于环形耦合 Duffing 振子无法对高采样频率信号进行检测, 所以在仿真中设置信号采样频率为 125 Hz, 同样在振子中加入与图 3 结构相同的信号, 即噪声方差同样为 0.1, 3 个脉冲宽度为 0.12 s 的脉冲分别位于 160 s、400 s、720 s 处。其振子的输出结果(即(1)式中振子状态变量之差: y_3-y_1)如图 5 所示。可以看出该振子无法检测出这种时间结构的窄脉冲。

(2) 对小信号进行检测

在振子中加入方差为 0.1×10^{-6} 的加性高斯白

噪声, 在噪声中混入 3 个幅度为 0.8×10^{-3} 、采样点数为 15 点的单极性脉冲, 如图 6 所示。通过双扩展型 Duffing 振子的输出如图 7 所示。可以看出振子可以检测出小幅度的窄脉冲信号。通过进一步仿真发现, 信号的幅度在大于 0.8×10^{-14} 时能正常检测信号, 在其范围内信号检测成功率不随信号幅度的不同而变化, 所以其对于信号的幅度容许范围是非常宽的。而另一方面, 环形耦合 Duffing 振子则不能对小信号进行检测, 其检测小信号幅度的量级在 10^{-1} 左右。

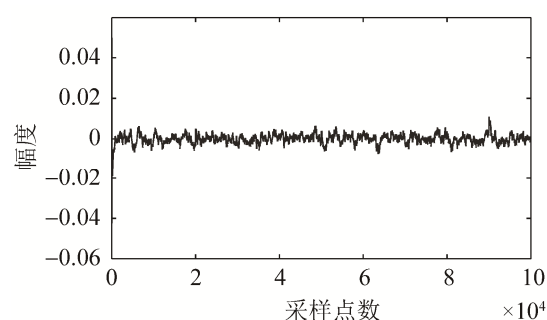


图 5 环形耦合振子输出信号(y_3-y_1)
Fig. 5 Ring coupling oscillator's output signal (y_3-y_1)

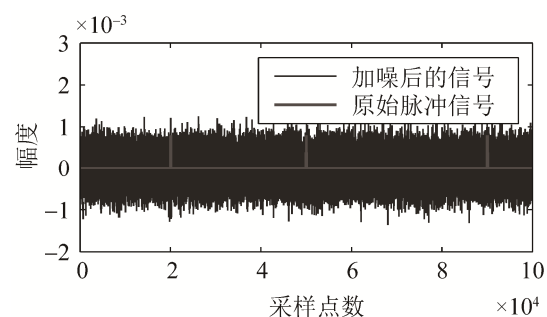


图 6 采样点数为 100 000 时的输入信号
Fig. 6 Input signal with a sampling number of 100 000

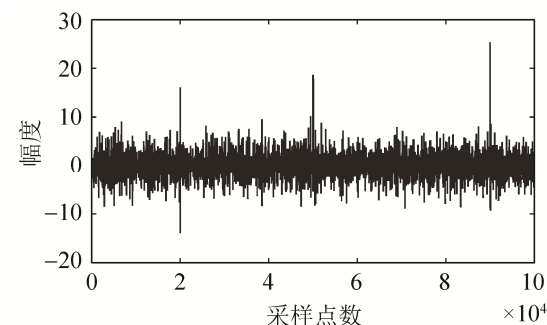


图 7 振子输出信号(y_2-y_1)
Fig. 7 Oscillators' output signal (y_2-y_1)

3.2 检测概率的探讨

为了探讨双扩展型 Duffing 振子对不同宽度脉冲信号的检测能力, 以下对不同脉宽信号的检测概率进行了蒙特卡洛仿真。仿真中环形耦合 Duffing 振子的系统参数和 3.1 节中的相同。在检测概率的仿真中, 每次仿真在振子中加入方差为 0.1 的加性高斯白噪声和 1 个幅度为 0.8 的在 50 000 点处开始的单极性脉冲。如果振子的输出最高脉冲信号比第二高脉冲信号高出 1/3, 则认为检测成功。

仿真中, 对从 5 个采样点到 60 个采样点宽度的脉冲信号进行检测, 以宽度 5 进行步进。对每种宽度的脉冲进行 100 次检测实验, 成功检测的概率结果如图 8 所示。从该图可以看出本文方法对非周期方波脉冲信号的检测能力可以达到 15 个采样点宽度, 而双向环形耦合 Duffing 振子的检测能力为 40 个采样点宽度。

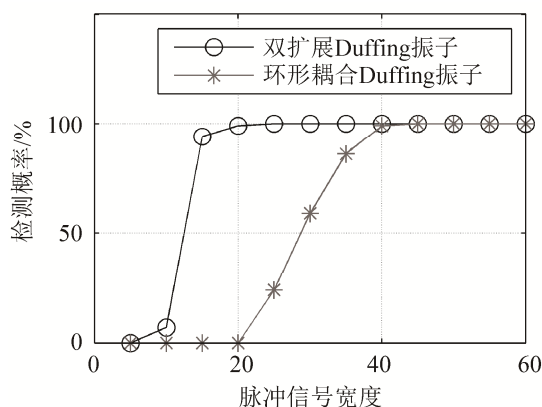


图 8 不同宽度脉冲信号的检测概率

Fig. 8 Detection probability of pulse signals with different widths

4 结论

针对非周期微弱脉冲检测问题, 提出了一种基于双扩展型 Duffing 振子的脉冲检测方法。该方法利用扩展型 Duffing 振子的多频率适应性和良好的抗噪能力, 通过构造双振子检测系统获得了以下优势: (1) 可以适用于更多的信号采样频率; (2) 待检测信号的动态范围很宽, 信号幅值可以低至 10^{-14} 量级; (3) 可以检测更窄的脉冲信号, 即相同

采样率下可以在更低的信噪比下检测信号。通过与环形耦合 Duffing 振子的脉冲检测方法进行对比, 仿真结果验证了该方法的以上优势。

参考文献:

- [1] Birx D I. Chaotic oscillators and CMFFNS for signal detection in noise environments[C]. Proc. IEEE International Joint Conference on Neural Networks. New York: IEEE, 1992(2): 881-888.
- [2] Wang G Y, Chen D J, Lin J Y, et al. The application of chaotic oscillators to weak signal detection[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics (S0278-0046), 1999, 46(2): 440-444.
- [3] Vahedi H, Gharehpetian G B, Karrari M. Application of Duffing oscillators for passive islanding detection of inverter-based distributed generation units[J]. IEEE Transactions on Power Delivery (S0885-8977), 2012, 27(4): 1973-1983.
- [4] Lai Z H, Leng Y G. Weak-signal detection based on the stochastic resonance of bistable Duffing oscillator and its application in incipient fault diagnosis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing (S0888-3270), 2016, 81(15): 60-74.
- [5] Peng H H, Xu X M, Yang B C, et al. Implication of two-coupled differential Van der Pol Duffing oscillator in weak signal detection[J]. Journal of the Physical Society of Japan (S0031-9015), 2016, 85(4): 044005.
- [6] Lin X, Dai Y P, Zhao L H. A Linear Least Square with Duffing Chaotic Detection Designed in Micro-Distance Movement Measurement System[J]. Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics (S1343-0130), 2016, 20(2): 287-293.
- [7] Ye Y, Yue L, Mandic D P, et al. Regular nonlinear response of the driven Duffing oscillator to chaotic time series[J]. Chinese Physics B (S1674-1056), 2009, 18(3): 958-968.
- [8] 曾喆昭, 周勇, 胡凯. 基于扩展型 Duffing 振子的局部放电信号检测方法研究[J]. 物理学报, 2015, 64(7): 070505.
Zeng Zhezao, Zhou Yong, Hu Kai. Study on partial discharge signals detection by extended Duffing oscillator[J]. Acta Phys. Sin., 2015, 64(7): 070505.
- [9] 吴勇峰, 黄绍平, 金国彬. 基于耦合 Duffing 振子的局部放电信号检测方法研究[J]. 物理学报, 2013, 62(13): 130505.
Wu Yongfeng, Huang Shaoping, Jin Guobin. Study on partial discharge signal detection by coupled Duffing oscillators[J]. Acta Phys. Sin., 2013, 62(13): 130505.