

文章编号: 1001 - 893X(2011)10 - 0015 - 05

二进制调制信号 Duffing 振子检测方法 及其抗噪声机理分析*

张 嵩¹, 芮国胜¹, 段鲁生², 孙文军¹, 张 洋¹

(1. 海军航空工程学院 信号与信息处理山东省重点实验室, 山东 烟台 264001;
2. 解放军 92095 部队, 浙江 台州 318050)

摘要:根据二进制调制信号的特点及 Duffing 振子微弱信号检测技术,研究了二进制调制信号的 Duffing 振子检测原理,给出了 2ASK、2FSK 及 BPSK 调制信号的 Duffing 振子检测的方法和流程。从 Duffing 振子与匹配滤波器处理待测信号的不同原理出发,研究了 Duffing 振子输入前端信号信噪比提升的现象。指出二元通信信号的 Duffing 振子检测,无论调制方式如何,其检测性能只与 Duffing 振子相变判别方式有关;并提出 Duffing 振子利用内置周期驱动力的能量抵抗待测信号背景噪声的概念,从能量的角度分析了其抗噪声机理,解释了 Duffing 振子对噪声“免疫”的原因所在。

关键词:信号检测;混沌系统;Duffing 振子;二进制调制;抗噪声

中图分类号:TN911 文献标识码:A doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2011.10.004

Binary Modulated Signals Detection Methods Based on Duffing Oscillator and its Anti-noise Mechanism Analysis

ZHANG Song¹, RUI Guo-sheng¹, DUAN Lu-sheng², SUN Wen-jun¹, ZHANG Yang¹

(1. Signal and Information Processing Provincial Key Laboratory in Shandong, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China; 2. Unit 92095 of PLA, Taizhou 318050, China)

Abstract: According to the characteristics of the binary modulated signals and the Duffing oscillator weak signal detection technique, the detection of binary modulated signals using Duffing oscillator is studied. The detection methods and processes for 2ASK, 2FSK and BPSK signals are proposed. By comparison with the matched filter, a gain of signal-to-noise ratio(SNR) in input-end of Duffing oscillator is defined and analysed to illustrate why the chaotic Duffing oscillator can pull the clean signal out of the strong background noise from the perspective of energy. Conclusions are drawn that no matter how the modulation method is, the detection performance is only related with the phase transition identification method, and the Duffing oscillator uses the power of the periodic driving force to resist the strong background noise.

Key words: signal detection; chaotic system; Duffing oscillator; binary modulation; anti-noise

1 引言

随着人类社会的不断发展和科技的不断进步,

各种无线系统的应用使得空间电磁环境越来越复杂。通信系统,特别是某些频段上的无线通信系统会遭受到强烈的背景噪声干扰,某些情况下会造成

* 收稿日期:2011-05-09;修回日期:2011-07-01
基金项目:泰山学者专项建设基金资助项目
Foundation Item: Taishan Scholar Construction Fund

通信系统性能的急剧下降。传统的通信信号检测方法如相干检测法,其检测效果理想与否很大程度上取决于滤波器性能的好坏,而且随着噪声的增大,测量结果的精度恶化很快。因此,为保证可靠通信,有必要进一步研究信噪比检测门限低、检测精度高的通信信号检测方法。

近些年来对混沌理论的研究日趋深入和成熟,已有学者将混沌理论成功引入到微弱信号检测领域并取得了丰硕的成果^[1-3]。作为一种的新的信号检测技术,与常用的诸如滤波等技术相比,它不是试图消除或抑制噪声,而是利用混沌系统对初值的敏感性以及对噪声的“免疫力”从背景噪声中提取有用信号,显示了良好的抗噪声性能,在微弱信号检测领域正得到越来越多的关注和研究。混沌微弱信号检测研究初期主要集中在正弦信号或周期(如方波等)信号等单一频率信号的检测方面^[4,5]。由于数字调制信号远比单频周期信号复杂,利用混沌振子检测通信信号面临着许多困难。数字通信系统的主要特点是在有限的时间间隔内发送有限波形集中的一个波形,接收端的目标不是精确地再生被传输的波形,而是从受到噪声干扰的信号中判决出发送端发送的是哪一个波形。利用混沌振子检测通信信号既能克服混沌振子检测微弱正弦信号时存在不能精确求取信号幅度、频率或相位值的问题^[6],又能充分发挥混沌振子优良的抗噪声性能。文献^[7]研究了2FSK信号的Duffing振子检测问题。2009年,重庆邮电大学的高青山等提出利用功率谱熵对系统不同状态复杂度进行判别的新方法,结合混沌系统产生相变的相位条件,给出了利用Duffing振子进行强噪声背景下BPSK信号的解调方法和步骤^[8]。2010年,该研究小组由提出了ASK信号的混沌振子解调方法^[9]。

本文首先回顾了二进制调制信号的Duffing振子检测原理,并从Duffing振子与匹配滤波器处理待测信号的不同原理出发,研究了Duffing振子输入前端信号信噪比提升的现象,提出Duffing振子检测利用内置驱动力的能量抵抗待测信号背景噪声的概念,从能量的角度解释了Duffing振子对噪声的“免疫力”,得出混沌振子检测极低信噪比情况下信号的抗噪声机理。

2 二进制调制信号的混沌振子检测原理

2.1 Duffing振子微弱信号检测原理

混沌系统对初始条件的敏感性以及对噪声的

“免疫力”,是利用混沌系统进行微弱信号检测的基础。在众多的混沌系统模型中,Duffing振子系统是研究和应用较为充分的模型之一,其动力学方程为^[10]

$$\begin{cases} \dot{x} = \omega y \\ \dot{y} = \omega(-\delta y + x - x^3 + \gamma \cos(\omega t) + s(t) + n(t)) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\gamma \cos(\omega t)$ 为Duffing振子内置周期驱动力, δ 为阻尼比, $-x + x^3$ 是非线性恢复力, $s(t)$ 为待测信号, $n(t)$ 为待测信号背景噪声。

由于系统状态对内置周期驱动力强度 γ 有很强的敏感性, γ 取值不同,系统解在相空间就呈现不同状态,表现出丰富的非线性动力学行为,包括周期运动、分岔、混沌等复杂状态。利用Duffing振子检测微弱信号就是利用Duffing系统对周期驱动力强度的敏感性以及对噪声的“免疫力”,根据系统从混沌态到大尺度周期态的转变与否则来检查信号的存在或测量信号组图幅度、频率等某些物理特征。

2.2 二进制调制信号的Duffing振子检测

我们知道,二元数字通信系统中只有两个可能信号中的一个传送到接收机,而接收机就要根据输入的观测波形判断传送给它的是哪一个。那么,二进制信号检测就是一个二元假设检验问题。对于二进制信号的检测有两个可能的判决,因而有以下两个假设:假设 H_0 表示“信号 $s_0(t)$ 存在”,假设 H_1 表示“信号 $s_1(t)$ 存在”,信号检测就是对下面两个假设:

$$H_0: x(t) = s_0(t) + n(t)$$

$$H_1: x(t) = s_1(t) + n(t)$$

进行统计检验,判决一个假设成立。这正是二进制调制信号最佳接收机原理的出发点。

利用Duffing振子检测二进制调制信号,就是利用混沌振子对特定频率和相位信号的敏感性,根据振子输出相变发生与否来解决上述两个假设的判决问题:

$$D_0: H_0 \text{ 成立, 如果 Duffing 振子相变发生}$$

$$D_1: H_1 \text{ 成立, 如果 Duffing 振子相变没有发生}$$

利用Duffing振子检测二进制调制信号的基本思想是:首先设置Duffing振子的内置驱动力与载波同频同相,然后调节内置驱动力的强度 γ ,使Duffing振子处于混沌状态向大尺度周期状态过渡的临界状态,将混有噪声的待测信号作为待测信号 $s(t)$ 加入式(1)所述系统中。其检测过程示意图如图1所示。

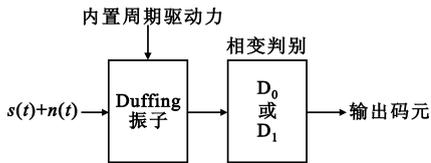


图 1 Duffing 振子检测流程示意图

Fig. 1 Block diagram of the detection process

2.2.1 2ASK 信号的 Duffing 振子检测

(1) 当基带传码“1”时, $s(t) = A\cos(\omega t + \varphi)$, 系统周期驱动力总幅度 $\gamma + A$ 大于临界阈值 γ_d , 此时系统将发生非平衡相变, 由混沌状态进入大尺度周期状态;

(2) 当基带传码“0”时, $s(t) = 0$, 此时系统输入只有噪声, 由于 Duffing 振子对噪声具有免疫力, 噪声的添加不会引起系统动力学行为发生根本的变化, 所以系统仍处于混沌状态;

(3) 判断 Duffing 振子是否发生相变, 分别判决出数字传码“1”或“0”。

2.2.2 2FSK 信号的 Duffing 振子检测

(1) 当基带传码“1”时, $s(t) = A\cos(\omega_1 t + \varphi)$, 系统周期驱动力总幅度 $\gamma + A$ 大于临界阈值 γ_d , 此时系统将发生非平衡相变, 由混沌状态进入大尺度周期状态;

(2) 当基带传码“0”时, $s(t) = A\cos(\omega_2 t + \varphi)$, 由于系统周期驱动力与信号频率不同, 不满足相变条件, 所以系统仍处于混沌状态;

(3) 判断 Duffing 振子是否发生相变, 分别判决出数字传码“1”或“0”。

2.2.3 BPSK 信号的 Duffing 振子检测

(1) 当基带传码“1”时, $s(t) = A\cos(\omega t)$ 与系统周期驱动力同频同相, 系统周期驱动力总幅度 $\gamma + A$ 大于临界阈值 γ_d , 此时系统将发生非平衡相变, 由混沌状态进入大尺度周期状态;

(2) 当基带传码“0”时, $s(t) = A\cos(\omega_2 t + \pi)$, 与系统周期驱动力同频反相, 不满足相变条件, 故系统仍处于混沌状态;

(3) 判断 Duffing 振子是否发生相变, 分别判决出数字传码“1”或“0”。

二进制调制信号的 Duffing 振子检测流程如图 1 所示。根据以上分析, 只要是二进制调制, 不论调制方式是 ASK、2FSK 或是 BPSK, 利用 Duffing 振子检测信号时, 其检测性能只与 Duffing 振子相变判别方法有关。

3 Duffing 振子输入端的信噪比增益现象

AWGN 信道下的二进制调制信号的最佳接收机是基于匹配滤波原理的, 本节我们将研究匹配滤波器和 Duffing 振子处理待测信号的不同原理, 揭示 Duffing 振子利用内置驱动力能量抗衡背景噪声的机理。

所谓匹配滤波器是指输出信噪比最大的线性滤波器, 其原理就是待测信号与信号自身作相关运算, 利用了确定信号的相关性与噪声的相关性的不同, 使得输出的信噪比在某一时刻达到最大。Duffing 振子在处理待测信号时, 待测信号与内置驱动力相加后通过混沌振子进行非线性运算。

假设 Duffing 振子输入端输入待测信号 $x(t) = s(t) + n(t)$, 其中 $s(t) = a\cos(\omega t + \varphi)$, $n(t)$ 为高斯白噪声, $\langle n(t)n(0) \rangle = \sigma^2 \delta(t)$, $\delta(t)$ 是 Dirac delta 函数, $\sigma^2 = N_0/2$ 表示噪声的双边功率谱密度, 那么待测有用信号与背景噪声之间的信噪比为

$$SNR = \frac{a^2}{N_0} \quad (2)$$

待测信号 $x(t)$ 加入式 (1) 所示 Duffing 系统后, 总的周期驱动力变为

$$\Gamma(t) = \gamma \cos(\omega t) + a \cos(\omega t + \varphi) = \gamma' \cos(\omega t + \theta) \quad (3)$$

其中:

$$\theta = \arctan\left[\frac{a \sin \varphi}{(\gamma_d + a \sin \varphi)}\right] \quad (4)$$

通常 $a \ll \gamma$, 所以 θ 很小, 其对 Duffing 系统的影响可忽略不计。

$$\gamma' = \sqrt{\gamma^2 + 2\gamma a \cos \varphi + a^2} \quad (5)$$

此时, 周期驱动力与背景噪声之间的信噪比为

$$SNR_{\text{total}} = \frac{(\gamma')^2}{N_0} = \frac{\gamma^2 + 2\gamma a \cos \varphi + a^2}{N_0} \quad (6)$$

如果待测信号满足文献 [10] 所述相变条件, 又由于 $a \ll \gamma$, 故 $SNR_{\text{total}} \gg SNR$ 。设加入 Duffing 振子后总的信噪比 SNR_{total} 与原被测信号信噪比 SNR 之间的差为信噪比增益为

$$G_{SNR} = SNR_{\text{total}} - SNR \gg 0 \quad (7)$$

虽然待测信号与背景噪声之间的信噪比非常小, 但是, 当被测信号和噪声一起加入到 Duffing 振子后, 由于待测信号与内置周期驱动力存在一定的频率和相位关系, 总的信噪比 SNR_{total} 远远大于 SNR , 在进行非线性运算之前就获得了一个很大的信噪比增益 G_{SNR} 。表 1 列举了当 Duffing 振子内置驱动力取临界值 0.821 6 时, 待测有用信号强度不同

而 SNR 保持相同的情况下,待测含噪声信号加入 Duffing 振子后获得的信噪比增益,其中待测信号载波频率为 1 rad/s, Duffing 振子积分步长为 0.001。表 2 所示为待测有用信号固定,不同信噪比下待测含噪声信号进入 Duffing 振子后获得的信噪比增益,其中待测信号载波频率为 1 rad/s, Duffing 振子积分步长为 0.001。由表 1 可以得出在待测含噪声信号 SNR 不变的情况下,待测有用信号绝对幅值越小,获得的信噪比增益 G_{SNR} 越大。由表 2 可以得出待测有用信号强度不变,待测含噪声信号不同 SNR 情况下,获得的 G_{SNR} 固定不变,且随着待测有用信号的幅值越小,获得的 G_{SNR} 越大。

表 1 固定 SNR、不同信号幅值情况下的信噪比增益
Table 1 SNR gains under the conditions of different power of signal and the same SNR

a	SNR/dB	SNR _{total} /dB	G_{SNR} /dB
0.000 01	-30	68.293 3	98.293 3
0.000 10	-30	48.293 4	78.293 4
0.001 00	-30	28.303 8	58.303 8

表 2 不同 SNR、不同信号幅值情况下的信噪比增益
Table 2 SNR gains under the conditions of different power of signal and different SNR

a	SNR/dB	SNR _{total} /dB	G_{SNR} /dB
0.000 01	-30	68.293 3	98.293 3
0.000 01	-40	58.293 3	98.293 3
0.000 01	-50	48.293 3	98.293 3
0.000 10	-30	48.294 3	78.293 4
0.000 10	-40	38.294 3	78.293 4
0.000 10	-50	28.294 3	78.293 4
0.001 00	-30	28.303 8	58.303 8
0.001 00	-40	18.303 8	58.303 8
0.001 00	-50	8.303 8	58.303 8

4 结 论

本文研究了二进制调制信号的 Duffing 振子检测方法及其抗噪声机理。通过对 2ASK、2FSK 以及 BPSK 调制信号的研究,指出二元通信信号的 Duffing 振子检测,无论调制方式如何,其检测性能只与 Duffing 振子相变判别方式有关。通过分析 Duffing 振子与匹配滤波器处理待测信号的原理不同,发现

Duffing 振子内置驱动力能起到提升待测信号信噪比的能力,从能量的角度解释了 Duffing 振子对噪声的“免疫力”原因所在,即 Duffing 振子利用内置驱动力的能量来抗衡待测信号背景噪声。通过具体计算,发现待测有用信号的绝对幅值越小,获得信噪比增益越大,再次证明了 Duffing 振子具有很强的检测微弱信号的能力。

参考文献:

- [1] 杨红英,葛传虎,叶昊,等. 基于 Duffing 振子的天然气管道泄漏检测方法[J]. 高技术通讯,2010,20(6):628-631.
YANG Hong-ying, GE Chuan-hu, YE Hao, et al. Leak Detection Based on Duffing Oscillators for Gas Pipelines[J]. High Technology Letters, 2010, 20(6):628-631. (in Chinese)
- [2] 兀旦晖. 基于图像识别混沌的弱信号检测方法研究[J]. 计算机测量与控制,2010,18(2):320-322.
WU Dan-hui. Method of research of weak Signal Detection Based on Image Recognition Chaos[J]. Computer Measurement & Control, 2010, 18(2):320-322. (in Chinese)
- [3] 王永生,姜文志,赵建军,等. 一种 Duffing 弱信号检测新方法及其仿真研究[J]. 物理学报,2008,57(4):2053-2058.
WANG Yong-sheng, JIANG Wen-zhi, ZHAO Jian-jun, et al. A New Method of Weak Signal Detection Using Duffing Oscillator and Its Simulation Research[J]. ACTA Physica Sinica, 2008, 57(4):2053-2058. (in Chinese)
- [4] Li Chongsheng. Study of Weak Signal Detection Based on second FFT and Chaotic Oscillator[J]. Nature and Science, 2005, 3(2):59-64.
- [5] 王玫,颜勇,张慧峰. 基于双 Duffing 振子差分的微弱信号频率检测[J]. 电路与系统学报,2010,15(2):118-121.
WANG Mei, YAN Yong, ZHANG Hui-feng. Frequency Detection of Weak Signal Based on Double Differential Duffing Oscillators[J]. Journal of Circuits and Systems, 2010, 15(2):118-121. (in Chinese)
- [6] Guanyu WANG, Sailing HE. A Quantitative Study on Detection and Estimation of Weak Signals by Using Chaotic Duffing Oscillators [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems - I: Fundamental Theory and Applications, 2003, 50(7):945-953.
- [7] YIN Cheng-qun, BI Hong-bo, HUANG Yi-ran. Study on Detection of 2FSK Signal Method by Using Duffing Oscillator [C]//Proceedings of the 4th Asia-Pacific Workshop on Chaos Control and Synchronization. Harbin:IEEE,2007:510-513.
- [8] 高清山,张天骐,黄铤,等. 基于 Simulink 的微弱信号混沌解调仿真研究[J]. 计算机应用,2009,29(12):3211-3214.
GAO Qing-shan, ZHANG Tian-qi, HUANG Yao, et al. Simulation Studies on Chaos Demodulation of Weak BPSK Signal Based on Simulink Tools[J]. Journal of Computer Applications, 2009, 29(12):3211-3214. (in Chinese)
- [9] 高清山,张天骐,蒋世文,等. 基于混沌振子的微弱 ASK

信号解调[J]. 电子技术与应用, 2010(4): 106 - 110.

GAO Qing-shan, ZHANG Tian-qi, JIANG Shi-wen, et al. Demodulation of ASK Signal Based on Chaotic Oscillator [J]. Application of Electronics Technology, 2010(4): 106 - 110. (in Chinese)

- [10] WANG Guanyu, CHEN Dajun, LIN Jianya, et al. The Application of Chaotic Oscillators to Weak Signal Detection [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1999, 46(2): 440 - 444.

作者简介:

张嵩(1979—),男,河南汝南人,分别于2002年和2007年获海军航空工程学院通信与信息系统学士学位和硕士学位,现为工程师、博士研究生,主要从事通信信号的混沌振子检测方面的研究;

ZHANG Song was born in Runan, Henan Province, in 1979.

He received the B. S. degree and the M. S. degree from Naval Aeronautical and Astronautical University in 2002 and 2007, respectively. He is now an engineer and currently working toward the Ph. D. degree. His research concerns chaotic oscillator detection in wireless communication signal processing.

Email: zsl1503@126.com

芮国胜(1968—),男,江苏南京人,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。

RUI Guo-sheng was born in Nanjing, Jiangsu Province, in 1968. He received the Ph. D. degree from Harbin Engineering University in 2001. He is now a professor and also the Ph. D. supervisor. His research interests include communication system, wavelet theory and its application, military communication engineering, etc.

《电讯技术》征稿启事

《电讯技术》(月刊)创刊于1958年,由中国西南电子技术研究所主办,系国内外公开发行的、理论与应用相结合的综合性电子专业科技刊物,为中文核心期刊。目前,已被英国 IEE《科学文摘(SA)》INSPEC、美国《剑桥科学文摘(CSA)》、波兰《哥白尼索引(IC)》等国外知名数据和国内多个中文数据库收录。

本刊主要刊登涉及下列应用方向和技术领域的述评、论文、新概念新技术新产品介绍:

- 电子系统工程
- 通信
- 导航
- 识别
- 飞行器测控
- 卫星应用
- 雷达
- 信息战
- 共性技术(包括天线、射频电路、信号处理、信息处理、监视与控制、时间与频率、先进制造、电磁兼容等)。

本刊栏目有:系统总体技术、信号与信息处理技术、计算机、网络及其应用技术、信道技术、先进制造技术、基础技术、述评与展望。

欢迎业内学者、专家及科技人员踊跃投稿。

来稿要求及注意事项:

(1)文稿务必主题明确,论述合理,逻辑严谨,数据可靠,叙述清楚,文字精炼。内容应保守国家机密,并提供所在单位的保密审查证明,引用他人作品应给出来源。

(2)文稿一般不应超过6000字,综述稿不超过8000字。稿件应附英文题名、作者名、单位名、摘要和关键词,基金项目应注明项目编号。中文题名一般不超过20个汉字,必要时可加副标题。

(3)摘要应包括目的、方法、结果和结论四要素,即用简洁的语言说明文章要解决的问题,主要工作过程及所采用的技术手段和方法,研究所获得的实验数据、结果及其意义。篇幅以200~300字为宜。

(4)关键词以3~8个为宜。为便于文献检索,应尽可能根据《中国图书馆分类法(第四版)》提供中图分类号。

(5)文中涉及的物理量和计量单位应符合国家有关标准。计量单位请用GB3100-3102-93《量和单位》规定的法定计量单位。注意区分各物理量符号的文种、大、小写、正斜体(矢量和矩阵用黑斜体)、上、下角标等。

(6)插图和表格只给出必要的,且应有图题和表题。插图最好采用计算机制作。照片以黑白为佳,也可采用扫描的电子文档(精度高于400 dpi, tif, jpg, psd等格式均可)。

(7)文稿中引用他人的成果,务请写明原作者姓名、题名、来源,一并在参考文献中给出,并在正文中相应位置进行标示,否则责任由来稿人自负。参考文献只择主要的,未公开发表的文献请勿列入参考文献。书写格式请参见GB/T 7714-2005文后参考文献著录规则。

(8)投稿邮箱:dianxunjishu@china.com,并尽量同时提供Word和pdf文档,无需另寄打印稿。来稿请注明作者详细通信地址、联系电话和有效电子邮箱,并注明拟投栏目。

(9)本刊编辑部将在3个月之内对来稿作出取舍,如逾期未收到处理意见或刊用通知,作者有权对稿件另行处理。稿件一经刊用,本刊将酌情从优支付稿酬并赠送当期样刊,本刊支付的稿酬中已包含作者著作权使用费。请勿一稿多投,否则后果自负。