

微弱直接序列扩频信号Duffing振子检测方法研究

盛广铭, 马德保

(解放军信息工程大学信息技术学院 郑州 450002)

【摘要】 Duffing系统对特定信号敏感及对噪声免疫的特性,使其在微弱信号检测中具有潜在应用。该文针对Duffing振子的分岔问题,通过对Duffing系统Feigenbaum行为的分析,导出了在微弱直接序列扩频信号检测中Duffing系统所表现出的间歇性混沌行为,提出了一种新的基于间歇性混沌行为的微弱直扩信号检测方法。通过仿真实验,验证了该方法的有效性。

关键词 混沌系统; 直接序列扩频信号; Duffing振子; 大尺度周期; 信号检测

中图分类号 TN975

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2012.05.010

Method for Weak DSSS Signal Detector Based on Duffing Oscillator

SHENG Guang-ming and MA Zhen-bao

(School of Information Technology, Information Engineering University Zhengzhou 450002)

Abstract Duffing system is sensitive to specific signal and immune against the noise. This characteristic can be used to detect weak signal. For the fork problem of Duffing oscillator, intermittent chaos action represented by Duffing system in weak direct sequence spread spectrum (DSSS) signal detection is deduced through analyzing the Duffing system and Feigenbaum action. A new method based on intermittent chaotic action is proposed for weak DSSS signal detection. Finally, simulation experiment shows the validity of this method.

Key words chaotic systems; direct sequence spread spectrum; Duffing oscillator; large-scale periodic; signal detection

直接序列扩频(DSSS)通信系统是直接序列扩频方式构成的扩展频谱通信系统,它在发送端用比信息比特率高许多的伪随机序列码直接去调制载波,进行频谱扩展。它具有多址接入、宽谱、低截获概率、抗干扰等良好的特性,这些特性使其得到了广泛的应用^[1-2]。

在无线电监测中,需要检测该类型的微弱通信信号。基本的检测方法是在一定频带内积累信号能量,该方法被称为能量检测器或辐射计^[3]。非线性载波检测器和码片率检测器也是DSSS信号检测的常用方法^[4-6]。另外,DSSS信号也可以通过一些谱相关方法进行检测^[7-8],文献[9-10]研究了利用PN序列周期进行DSSS信号检测的方法。但由于接收数据长度和计算复杂度的限制,上述检测器只有在信噪比大于-20 dB时才能有效地进行检测。因此,设计一种新的能够在较低信噪比下进行信号检测的检测器是一个十分急迫的问题。

Duffing振子作为一个经典的非线性动力系统具有不动点、周期行为、准周期行为和混沌运动4种状

态。当系统处于临界状态,对系统参数的一个微小扰动可以使系统行为发生本质上的改变^[11-12]。若将待检信号看作是系统周期驱动力的一个补充,那么系统的特性将随着输入信号的改变而改变。Duffing振子因其具有对周期小信号敏感同时对噪声免疫的独有特性,所以经常被应用于微弱信号检测^[13-15]。

对于Duffing系统的分岔行为,本文给出一种新的DSSS信号检测方案。基本思想是:一个掩盖在强噪声背景中的微弱周期信号可以利用Duffing振子的演化行为从混沌态到周期态的跃迁进行检测。DSSS信号可以看作是一系列的正弦信号,只是它的幅度系数在不断地随着时间改变。这就导致了不规则的间歇性混沌,也就是混沌行为和周期行为将会交替发生。

1 基本原理

本文所研究的Duffing方程标准形式为:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + k \frac{dx}{dt} - x^3 + x^5 = f \cos(\omega t) \quad (1)$$

式中, k 为阻尼率,一般选择 $k = 0.5$; $(-x^3 + x^5)$ 为

非线性回复力; $f \cos(\omega t)$ 为参考信号。

1) 当 $f=0$ 时, 根据微分方程理论, 可以在相平面上得到鞍点 $(0,0)$ 和焦点 $(\pm 1,0)$ 。微分方程从任意初始值开始的演化轨道, 根据初值条件的不同将收敛到两个焦点中的一个。

2) 当 $f \neq 0$, 根据 f 的不同, 动力系统表现出复杂的动力学行为。当 f 较小时, 系统演化逐渐收敛到两个焦点之一。随着 f 的增加, 系统状态从同宿轨道逐渐演化为混沌运动。当 f 大于另一个阈值 f_r (f_r 称为临界值), 系统的演化从混沌态跃迁到大尺度周期状态。Duffing 方程的动力学过程如图1所示。

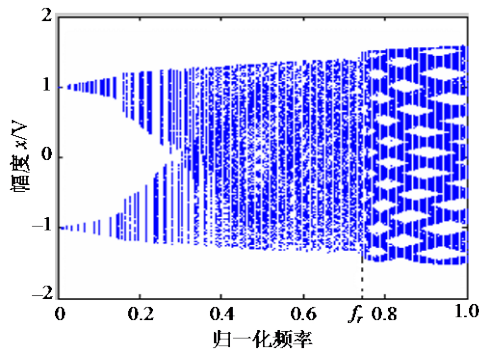


图1 Duffing方程的Feigenbaum图

Duffing 振子具有在临界状态时对噪声免疫和对特定的信号敏感的特性。该特性被应用到微弱信号的检测。在本文中, 利用系统相图从混沌态到大尺度周期状态的跃迁检测噪声环境中的微弱信号。

本文的检测模型为:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + k \frac{dx}{dt} - x^3 + x^5 = f_r \cos(\omega t) + \text{Input} \quad (2)$$

式(2)可改写为:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = y \\ \frac{dy}{dt} = -k \frac{dx}{dt} + x^3 - x^5 + f_r \cos(\omega t) + \text{Input} \end{cases} \quad (3)$$

首先, 令 $f = f_r$, 即系统被调整到临界状态; 然后, 待检信号被看作正弦驱动力 $f_r \cos \omega t$ 的扰动信号加到系统中。尽管噪声很强, 但它只会影响到演化轨道在相图中的局部变化而不会引起系统的相变。如果一个与系统参考信号具有相同频率的特定信号 $s(t)$ 被掩盖在强噪声环境中, 结果使得 f 大于 f_r , 那么相图将从混沌态跃迁到大周期状态。因此, 可以利用相图的突变检测噪声环境中是否掩盖了正弦信号。DSSS 信号可以看作是一系列的正弦信号, 只是其幅度随时间而变化, 因此, 就会导致不规则的间歇性混沌。

2 间歇混沌

根据前面的分析, 当待检信号为 DSSS 信号时, Duffing 系统将会表现出间歇性混沌行为。下面将详细地分析该行为。

由式(2)和式(3), 考虑待检信号为:

$$\text{Input} = s(t) + n(t) =$$

$$\begin{aligned} & \sqrt{2P}c(t)p(t)\cos((\omega + \Delta\omega)t + \varphi) + n(t) = \\ & \sqrt{2P}m(t)\cos((\omega + \Delta\omega)t + \varphi) + n(t) \end{aligned} \quad (4)$$

式中, $n(t)$ 为高斯噪声; $s(t)$ 为 DSSS 信号; $c(t)$ 为伪噪声序列; $p(t)$ 为所要传送的信息; $m(t)$ 为基带信号; $\Delta\omega$ 为待检信号与 Duffing 系统的参考信号频率之差, $\Delta\omega \ll \omega$; φ 为初始相差。那么, 此时 Duffing 系统的周期驱动力为:

$$\begin{aligned} r(t) &= f_r \cos(\omega t) + \sqrt{2P}m(t)\cos((\omega + \Delta\omega)t + \varphi) = \\ & F(t)\cos(\omega t + \theta(t)) \end{aligned} \quad (5)$$

其中:

$$F(t) = \sqrt{f_r^2 + 2f_r\sqrt{2P}m(t)\cos(\Delta\omega t + \varphi) + 2P} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \theta(t) &= \arctan \frac{\sqrt{2P}m(t)\sin(\Delta\omega t + \varphi)}{f_r\sqrt{2P}m(t)\cos(\Delta\omega t + \varphi)} = \\ & \arctan \frac{\frac{\sqrt{2P}}{f_r}m(t)\sin(\Delta\omega t + \varphi)}{1 + \frac{\sqrt{2P}}{f_r}m(t)\cos(\Delta\omega t + \varphi)} \end{aligned} \quad (7)$$

由式(5)~式(7)可以得到以下结论:

1) 由于待检信号很弱, 即 $\sqrt{2P} \ll f_r$, 那么 $\theta(t) \approx 0$ 。此时从动力学上它对系统的影响很小。因此, 系统状态在很大程度上取决于 $F(t)$ 。

2) 如果 $\Delta\omega = 0$, 那么 $F(t) = \sqrt{f_r^2 + 2f_r\sqrt{2P}m(t)\cos(\varphi) + 2P}$, 此时相差 φ 是决定系统状态的最重要因素。

①如果

$$\begin{cases} \arccos\left(\frac{\sqrt{2P}}{2f_r}\right) + 2k\pi \leq \varphi \leq \\ \pi - \arccos\left(\frac{\sqrt{2P}}{2f_r}\right) + 2k\pi \\ \pi + \arccos\left(\frac{\sqrt{2P}}{2f_r}\right) + 2k\pi \leq \varphi \leq \\ 2\pi - \arccos\left(\frac{\sqrt{2P}}{2f_r}\right) + 2k\pi \end{cases} \quad (8)$$

那么, $F(t) > f_r$, 系统处于周期态。

②如果

$$\pi - \arccos\left(\frac{\sqrt{2P}}{2f_r}\right) + 2k\pi \leq \varphi \leq \pi + \arccos\left(\frac{\sqrt{2P}}{2f_r}\right) + 2k\pi \quad (9)$$

当 $m(t)=1$, 系统维持在混沌态; 当 $m(t)=-1$, 系统处于周期态。

③如果

$$-\arccos\left(\frac{\sqrt{2P}}{2f_r}\right) + 2k\pi \leq \varphi \leq \arccos\left(\frac{\sqrt{2P}}{2f_r}\right) + 2k\pi \quad (10)$$

当 $m(t)=1$, 系统处于周期态; 当 $m(t)=-1$, 系统跃变到混沌态。

对于DSSS信号, $m(t)$ 随机在 -1 和 1 之间跳变。因此, Duffing系统的演化将随着 $m(t)$ 的变化在周期态和混沌态之间跳变, 即间歇性混沌行为将会发生。根据系统输出的时序图, 可以对 $m(t)$ 进行估计。

3) 如果 $\Delta\omega \neq 0$, 那么 $F(t) = \sqrt{f_r^2 + 2f_r\sqrt{2P}m(t)\cos(\Delta\omega t + \varphi) + 2P}$ 。

当 $m(t)=1$, 有:

$$F(t) = \sqrt{f_r^2 + 2f_r\sqrt{2P}\cos(\Delta\omega t + \varphi) + 2P} \quad (11)$$

根据平行四边形原理, $F(t)$ 将会以周期 $T = 2\pi/\Delta\omega$ 小于和大于临界值, 初相为 φ 。因此, 不规则的间歇性混沌行为将会发生。

当 $m(t)=-1$, 有:

$$F(t) = \sqrt{f_r^2 - 2f_r\sqrt{2P}\cos(\Delta\omega t + \varphi) + 2P} = \sqrt{f_r^2 + 2f_r\sqrt{2P}\cos(\Delta\omega t + \varphi - \pi) + 2P} \quad (12)$$

因此, 系统将会以周期 $T = 2\pi/\Delta\omega$ 发生间歇性混沌, 初相为 $\varphi - \pi$ 。

因此, 如果 $\Delta\omega \neq 0$, 系统的演化将以不同的初相发生间歇性混沌, 间歇的周期为 $2\pi/\Delta\omega$ 。系统的驱动力图示如图2所示 ($a = \sqrt{2P}$)。

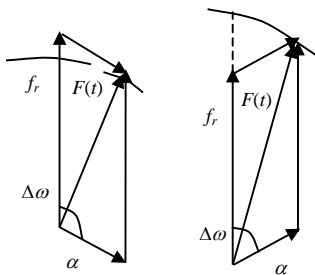


图2 驱动力的矢量图

但在实践中, DSSS信号脉冲持续时间很短, 且有噪声存在, 这使得系统演化行为跃变的周期产生不确定性。但是, 仍然可以观测到明显的间歇性混沌行为。

3 仿真分析

3.1 没有频差

首先, 检测系统被调整到临界状态。此时临界值为 $f_r = 0.7184$, 系统初始值设定为 $x_0 = y_0 = 1$ 。

待检信号为没有噪声的DSSS信号, 其中 $\Delta\omega = 0$, $A = 0.06$ 。伪随机序列为31位 m 序列。仿真结果如图3和图4所示。

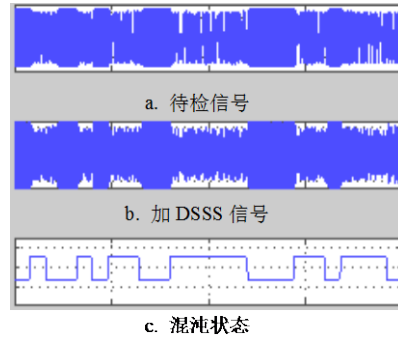


图3 Duffing系统演化轨线的时域输出, $\varphi = \pi$

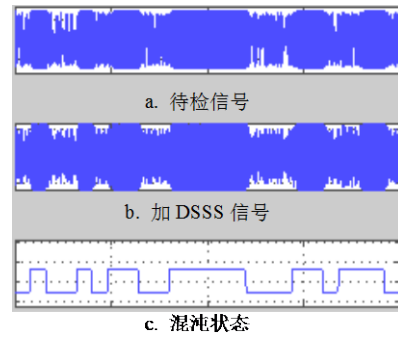


图4 Duffing系统演化轨线的时域输出, $\varphi = 0$

图3a和图4的a、b两个波形是系统和仅仅加上DSSS信号后的系统输出。在DSSS信号的影响下, 随着基带信号 $m(t)$ 的变化, 系统状态将周期态和混沌态间歇性地发生。图c是 $m(t)$ 。图3是当 $\varphi = \pi$ 时的结果。当 $m(t)=1$, 系统维持在混沌状态; 当 $m(t)=-1$, 系统处于周期态。图4是当 $\varphi = 0$ 时的结果。当 $m(t)=1$, 系统处于周期态; 当 $m(t)=-1$, 系统维持在混沌状态, 实验结果与前面的分析是一致的。

3.2 存在频差

待检信号为淹没在强噪声环境中的DSSS信号, 其与振子驱动力的频差 $\Delta\omega = 0.001$, 噪声方差 $\sigma = 0.5$, $SNR \approx -21$ dB, 其他仿真条件与3.1节仿真相同, 仿真结果如图5所示。

图5a中的两个波形分别是Duffing系统本身以及仅仅加上高斯噪声时的系统输出。系统仍然处于混沌态。图5b所示的两个波形分别是Duffing系统本身以及加上弱DSSS信号时的系统输出, 信噪比为 -21 dB。此时系统表现出间歇性混沌行为。因此,

可以利用该显著的特征进行微弱DSSS信号检测。

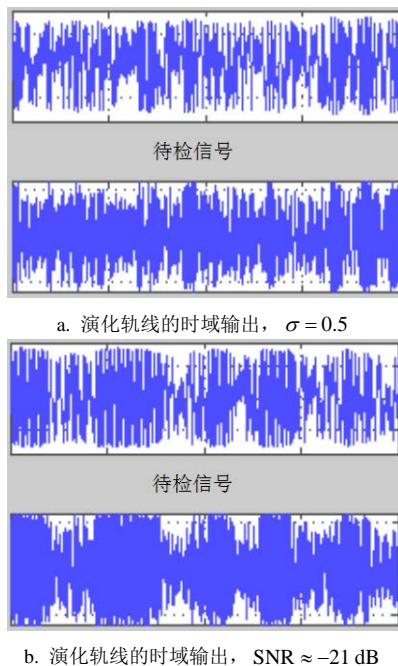


图5 基于Duffing振子的弱DSSS信号检测

4 结论

本文分析了Duffing系统的混沌动力学行为，并且将它应用到弱信号检测。在微弱DSSS信号检测中，系统所表现的间歇性混沌行为具有十分重要的作用。从理论和仿真分析中可以看出DSSS微弱信号可以用Duffing振子进行有效地检测。与其他检测方法相比，本文的方法在最少的先验条件下具有更简单和在更低信噪比下实现检测的优点。另外，作为一种时域信号处理方法，不需要对噪声的分布作先验假设，并且很容易在硬件上实现。

参 考 文 献

- [1] JAMSHIDI A. Direct sequence spread spectrum point-to-point communication scheme in underwater acoustic sparse channels[J]. IET Communications, 2011, 5(4): 456-466.
- [2] PEREIRA M, POSTOLACHE O, GIRA O P. Spread spectrum techniques in wireless communication[J]. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 2009, 12(6): 21-24.
- [3] URKOWITZ H. Energy detection of unknown deterministic signal[J]. Proceedings of the IEEE, 1967, 55(4): 523-531.
- [4] HILL D A, BODIE J B. Experimental carrier detection of BPSK and QPSK direct sequence spread spectrum signals [C]//Military Com-Munications Conference. Washington: IEEE Press, 1995: 362-367.
- [5] KUEHLS J F, GERANIOTIS E. Presence detection of binary-shift-keyed and direct-sequence spread spectrum signals using a prefilter-and-multiply device[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1990, 8(5): 915-933.
- [6] CHANG Liang, WAN Fu-ping, WANG Zan-ji. Low complexity method for spreading sequence estimation of DSSS signal in non-cooperative communication systems[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2009, 20(1): 41-49.
- [7] GARDNER W A. Signal interception: A unifying theoretical framework for feature detection[J]. IEEE Trans Communication, 1988, 36(8): 897-906.
- [8] CIBLAT P, LOUBATON P, SERPEDIN E, et al. Asymptotic analysis of blind cyclic correlation-based symbol-rate estimators[J]. IEEE Trans Inf Theory, 2002, 48(7): 1922-2934.
- [9] BUREL G, BOUDER C, BERDER O. Detection of direct sequence spread spectrum transmissions without prior knowledge[C]//IEEE Global Telecommunications. San Antonio: IEEE Press, 2001: 236-239.
- [10] ZHANG Xiao-ming, ZHANG Zhong-zhao. Parameter estimation of DSSS signals in non-cooperative communication system[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2007, 18(1): 14-21.
- [11] LIU Z. Perturbation criteria for chaos[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technology Education Press, 1994, 36-44.
- [12] JIMENEZ-TRIANA A, TANG W K-S, CHEN Guan-rong, et al. Chaos control in duffing system using impulsive parametric perturbations[J]. IEEE Trans Circuits and Systems II: Express Briefs, 2010, 57(4): 305-309.
- [13] SUN Yu-sheng, ZHAN Xiao-xia, SHI Jun, et al. Based on wavelt denoising and duffing oscillator to detect weak signal[C]//2011 International Conference on Electronics, Communications and Control. Ningbo: IEEE Press, 2011: 1917-1920.
- [14] MA Xian-min, ZHANG Bing-tao. Weak signal detecting of gas concentration based on Duffing chaotic oscillator[C]//2010 International Conference on Computer Application and System Modeling. [S.l.]: IEEE Press, 2010: 183-186.
- [15] LI Ning, LI Le, YANG Dong-sheng, et al. The research of weak fault signal detection based on the duffing oscillator coupled synchronization[C]//2011 Fourth International Workshop on Chaos-Fractals Theories and Applications. Hangzhou: IEEE Press, 2011: 319-323.

编辑 张俊