

## 基于 Simulink 的微弱 BPSK 信号混沌解调仿真研究

高清山,张天骐,黄 铤,虞路勤

(重庆邮电大学 信号与信息处理重庆市重点实验室,重庆 400065)

(gaoqingshan.126@163.com)

**摘 要:**针对微弱二进制相移键控(BPSK)信号的解调问题,对基于混沌系统的解调方法进行了研究。介绍了混沌系统微弱信号检测的原理,结合混沌系统产生相变的相位条件和 BPSK 信号的调制方式,给出了利用 Duffing 系统进行强噪声背景中 BPSK 信号解调的方法和步骤,并提出了利用功率谱熵对系统不同状态复杂度进行判别的新方法。在理论分析的基础上,建立了 Matlab/Simulink 仿真模型。仿真结果表明,利用混沌振子和功率谱熵解调微弱 BPSK 信号的性能优于传统的相干解调方法。

**关键词:**Duffing 振子;BPSK 信号;功率谱熵;解调;Simulink 模型

**中图分类号:**TN911.72 **文献标志码:**A

### Simulation studies on chaos demodulation of weak BPSK signal based on Simulink tools

GAO Qing-shan, ZHANG Tian-qi, HUANG Yao, YU Lu-qin

(Chongqing Key Laboratory of Signal and Information Processing,

Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** Concerning the problem of demodulating the weak Binary Phase Shift Keying (BPSK) signal, the demodulation method based on chaotic system was researched. The basic principle of the chaotic system weak signal detection was introduced. By combining with the phase condition of the phase change happening and the modulation method of BPSK signal, the methods and steps of using Duffing system to demodulate the BPSK signal in strong noisy background were given. And a new method was presented for power spectrum entropy to judge the complexity of the different system state. Based on theoretical analysis, the simulation model based on Matlab/Simulink was built. The digital simulation results show that the performance of demodulating the weak BPSK signal using chaotic oscillator and power spectrum entropy is better than that of traditional coherent demodulation method.

**Key words:** Duffing oscillator; BPSK signal; power spectrum entropy; demodulation; Simulink model

## 0 引言

随着信息技术的发展和应用领域的需要,微弱信号的检测已成为研究的热点和难点。从 20 世纪 90 年代起,研究者将混沌理论应用于微弱信号检测。自此以后,许多学者对该方法进行了研究,文献[1-2]初步的探讨了应用混沌理论进行微弱信号检测的方法;文献[3]基于混沌相变将信噪比为 -34 dB 的微弱正弦信号检测出来,并且分析了存在频差时,系统会出现间歇混沌运动;文献[4]从矢量合成的角度,形象地描述了间歇混沌现象;文献[5]估算了间歇混沌运动的周期,并且实现了对工频干扰故障特征信号的检测;文献[6]研究发现,系统大尺度周期状态时,输出周期解的平均面积是一个比较稳定的几何特征量,并利用该特点实现了微弱正弦信号的定量检测;文献[7]将混沌振子法应用于直接序列扩频信号载波检测,检测到信噪比为 -38.85 dB 的载波信号;文献[8]在 Simulink 仿真平台上对混沌检测系统进行了仿真研究。

数字信号的载波传输在现代数字通信中占有举足轻重的地位,相移键控由于其良好的抗干扰性能和较高的频带利用率而在现代通信系统中广泛应用。但是,对于强噪声背景中的数字调制信号,传统的解调方式显得无能为力,需要寻求新的解调方法。将混沌理论应用于数字调制信号解调的研究并不多,文献[9]利用混沌振子法实现了对低信噪比环境下频移键控信号解调。本文将混沌理论应用于微弱二进制相移键控(Binary Phase Shift Keying, BPSK)信号的解调,并引入功率谱熵对系统状态进行判别;在理论分析的基础上,利用 Simulink 仿真平台对其进行了仿真验证。

## 1 混沌振子检测微弱信号的原理

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周期信号检测的基础。在众多的混沌系统模型中,Duffing 系统是研究和应用得较为充分的模型之一,其动力学方程为:

$$\begin{cases} \dot{x} = \omega y \\ \dot{y} = \omega(-fy + x - x^3 + k\cos(\omega t)) \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期:2009-06-24;修回日期:2009-08-12。

**基金项目:**NSAF 联合基金资助项目(10776040);国家自然科学基金资助项目(60602057);重庆市科委信号与信息处理重庆市市级重点实验室建设项目(CSTC,2009CA2003);重庆市科委项目(CSTC,2009BB2287);重庆市教委基金(K1060509;KJ080517)。

**作者简介:**高清山(1983-),男,山西吕梁人,硕士研究生,主要研究方向:微弱通信信号处理;张天骐(1971-),男,四川乐山人,教授,博士,主要研究方向:宽带微弱无线电信号处理、无线通信智能信号处理、通信抗干扰;黄铤(1983-),男(土家族),湖北恩施人,硕士研究生,主要研究方向:信号估计、多传感器数据融合;虞路勤(1984-),男,江西上饶人,硕士研究生,主要研究方向:超宽带信号分析与处理。

其中:  $\omega$  为待检测周期信号的频率,  $f$  为阻尼比,  $-x + x^3$  为非线性恢复力,  $k\cos(\omega t)$  是系统周期策动力。

固定阻尼比  $f$ , 当周期策动力幅值  $k$  较小时, 系统的动力学行为表现为围绕某一焦点做周期振荡; 随着  $k$  的增加, 系统历经同宿轨道状态、周期分岔状态; 直到  $k$  超过一定阈值  $k_c$ , 系统产生 Smale 马蹄意义下的混沌运动<sup>[10]</sup>; 进一步增加  $k$  大于另一阈值  $k_d$ , 系统进入大尺度周期状态, 以外加周期力的频率进行大尺度的包围所有鞍点和焦点的周期振荡。

Duffing 振子检测微弱信号的过程如下: 调节周期策动力幅值  $k$ , 使  $k = k_d$ , 此时系统处于混沌临界状态(混沌状态, 但在混沌向周期转变的边沿, 当  $k$  继续增大时, 系统将进入周期状态), 将接收到的外界信号加入系统, 如果外界信号只有白噪声, 系统对白噪声具有较强的免疫力, 系统保持原先的混沌状态, 不会产生相变(图 1(a)); 如果外界信号含有与周期策动力同频的信号, 即使噪声比信号强很多, 系统也会发生相变, 进入周期状态(图 1(b))。

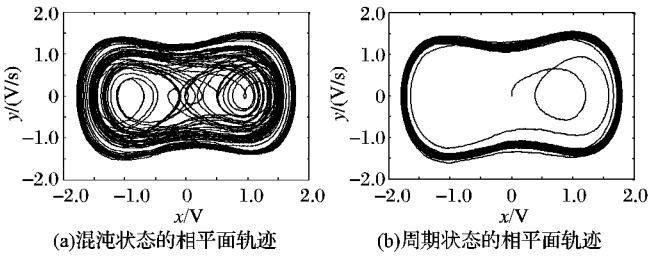


图 1 Duffing 振子相平面轨迹

系统要发生相变, 除了要满足待测信号与周期策动力同频, 还需要满足一定的相位关系。考虑下式:

$$\ddot{x}(t) = -f\dot{x}(t) + x(t) - x^3(t) + k_d \cos(\omega t) + a \cos(\omega t + \varphi) \quad (2)$$

其中:  $\varphi$  为待测微弱信号的相位, 也是待测信号与系统周期策动力的相位差。

方程(2) 的总的周期策动力变为:

$$K(t) = k_d \cos(\omega t) + a \cos(\omega t + \varphi) = k' \cos(\omega t + \theta) \quad (3)$$

其中:  $k' = \sqrt{k_d^2 + 2k_d a \cos \varphi + a^2}$  为总周期策动力的幅值,  $\theta = \arctan\left[\frac{a \sin \varphi}{(k_d + a \cos \varphi)}\right]$  为总周期策动力的相位(若  $a \ll k_d$ ,  $\theta$  的影响可以忽略)。

令  $k' \leq k_d$ , 可以推导得到系统产生相变的相位条件, 如下:

$$\pi - \arccos(a/(2k_d)) \leq \varphi \leq \pi + \arccos(a/(2k_d)) \quad (4)$$

当待测信号和周期策动力的相位差  $\varphi$  在式(4) 的范围时, 无论如何增大待测信号的幅值  $a$ , 系统都不会由混沌状态进入大尺度周期状态。

## 2 利用 Duffing 振子解调 BPSK 信号

### 2.1 Duffing 振子解调 BPSK 信号的基本思想

BPSK 方式是受键控的载波相位按基带脉冲而改变的一种数字调制方式, 是利用载波信号的不同相位来传递信息。BPSK 信号的数学表达式为:

$$\begin{cases} S_{\text{BPSK}}(t) = a \cos(\omega t + \Phi_i) \\ \Phi_i = \begin{cases} 0, & \text{调制信号 1} \\ \pi, & \text{调制信号 0} \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可知, 在 BPSK 调制方式下, 表征基带信号“0”和“1”的载波信号相位有明显的差距, 理想情况下差距为  $\pi$ 。

根据相位条件  $\pi - \arccos(a/(2k_d)) \leq \varphi \leq \pi + \arccos(a/(2k_d))$ , 由于  $k_d \geq a$ <sup>[11]</sup>, 此时相位差  $\varphi$  的取值范围接近于  $[\pi/2, 3\pi/2]$ 。设 BPSK 信号相位为 0 和  $\pi$  的载波与周期策动力的相位差分别为  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$ , 由于  $|\varphi_1 - \varphi_2| = \pi$ , 故  $\varphi_1, \varphi_2$  有且只有一个属于  $[\pi/2, 3\pi/2]$ , 即有且只有一种载波满足相变条件。当 BPSK 信号的相位在 0 和  $\pi$  之间跳变时, 即对应了混沌系统的大尺度周期状态和混沌状态之间的转换, 从而实现 BPSK 信号的解调。

利用 Duffing 振子解调 BPSK 信号的基本思想: 首先调节 Duffing 振子系统使之处于从混沌状态向大周期状态过渡的临界状态, 然后将混有噪声的 BPSK 信号作为待测信号加入 Duffing 系统:

$$\begin{cases} \dot{x} = \omega y \\ \dot{y} = \omega(-fy + x - x^3 + k \cos(\omega t) + S_{\text{BPSK}}(t) + n(t)) \end{cases} \quad (6)$$

1) 当基带传输码为“0”时,  $S_{\text{BPSK}}(t) = a \cos(\omega t + \pi)$  与系统周期策动力  $k \cos(\omega t)$  同频反相, 不满足相变条件, 系统处于混沌状态。

2) 当基带传输码为“1”时,  $S_{\text{BPSK}}(t) = a \cos(\omega t)$  与系统周期策动力  $k \cos(\omega t)$  同频同相, 系统处于周期状态。

最后, 根据判断 Duffing 系统所处的混沌状态或者周期状态, 可以解调出 BPSK 信号。

### 2.2 功率谱熵原理

鉴于观察混沌系统相平面或者时间序列判别系统状态的不足<sup>[12]</sup>, 引入功率谱熵。熵是表征系统复杂度的物理量, 熵越大表明系统运动越复杂。混沌状态是近于随机运动的一种复杂状态, 而周期状态运动却十分规则, 故可以通过功率谱熵区别这两种状态。功率谱熵定义如下:

设随机变量  $X$  是表征不确定系统状态特征的时间序列,  $X$  的取值为  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  ( $n \geq 1$ ), 对应的概率取值为  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ , 其中  $0 \leq p_i \leq 1$  ( $i = 0, 1, 2, \dots, n$ ), 且  $\sum_{i=1}^n p_i = 1$ 。则该系统的信息熵可以表示为:

$$H = - \sum_{i=1}^n p_i \lg(p_i) \quad (7)$$

对时间序列  $X$  进行离散傅里叶变换, 得到其变换结果为  $X(\omega_i)$ , 则其功率谱密度为:

$$\hat{p}(\omega_i) = \frac{1}{N} |X(\omega_i)|^2 \quad (8)$$

每个频率分量  $\omega_i$  的归一化谱概率密度函数定义为:

$$p(\omega_i) = \frac{\hat{p}(\omega_i)}{\sum_i \hat{p}(\omega_i)} \quad (9)$$

由式(9) 定义相应的功率谱信息熵, 简称功率谱熵:

$$H = - \sum_i p(\omega_i) \lg p(\omega_i) \quad (10)$$

其中:  $p(\omega_i)$  为在频率  $\omega_i$  处的功率谱密度概率分布函数值, 或者说是频率  $\omega_i$  处的功率谱在整个谱中所占的百分比。图 2 是系统处于混沌状态和周期状态时的功率谱熵仿真图, 图 2(a) 可以看出混沌状态时, 不同时刻的功率谱熵值波动很大, 可见混沌是一种很复杂的运动状态, 而图 2(b) 可以看出

周期状态时,功率谱熵值较小,而且波动也很小。

### 3 Simulink 仿真

#### 3.1 基于 Simulink 的仿真模型

按照 Matlab/Simulink 原理<sup>[13-14]</sup>构造仿真模型如图 3 所示。图 3(a)为 BPSK 调制信号模型,图 3(b)为 Duffing 振子模型,BPSK 信号模型为 Duffing 振子模型的子系统。

设基带数字信号的码片速率为 600 bps, BPSK 信号的载波频率  $\omega = 12\,000\pi \text{ rad/s}$ 、幅度  $A = 0.02 \text{ V}$ , Duffing 系统的临界值  $k_d = 0.81 \text{ V}$ 、 $k_1 = \omega^2$ 、 $k_2 = \omega/2$ , 加入方差为 0.05 ( $\text{SNR} = -24 \text{ dB}$ )的高斯噪声,采样频率为 24 MHz。在模型窗口的 Simulation 菜单下选择 simulation parameters 命令,打开 simulation parameters 对话框,stop time 为 10/600 s, type 选择 fixed-step、ode4 (Runge-Kutta), Fixed step size 为 1/24 000 000。

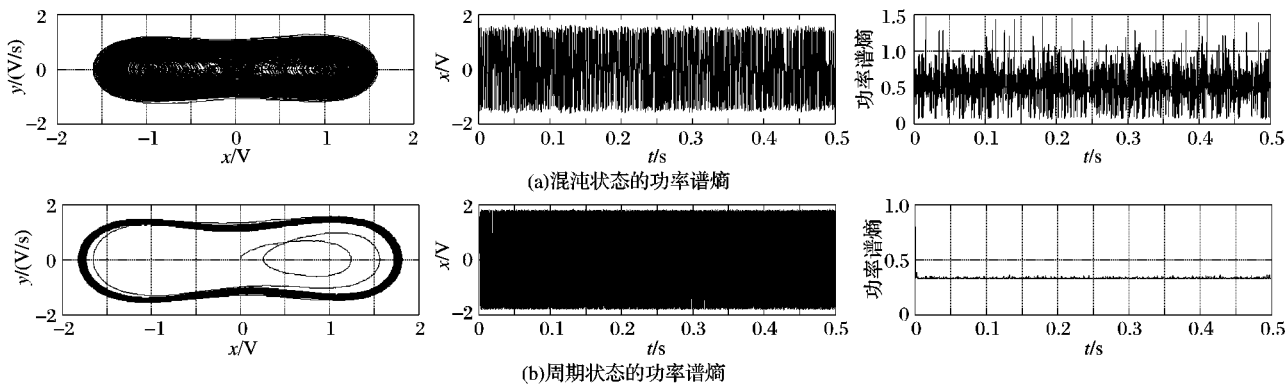


图 2 混沌状态和周期状态的功率谱熵

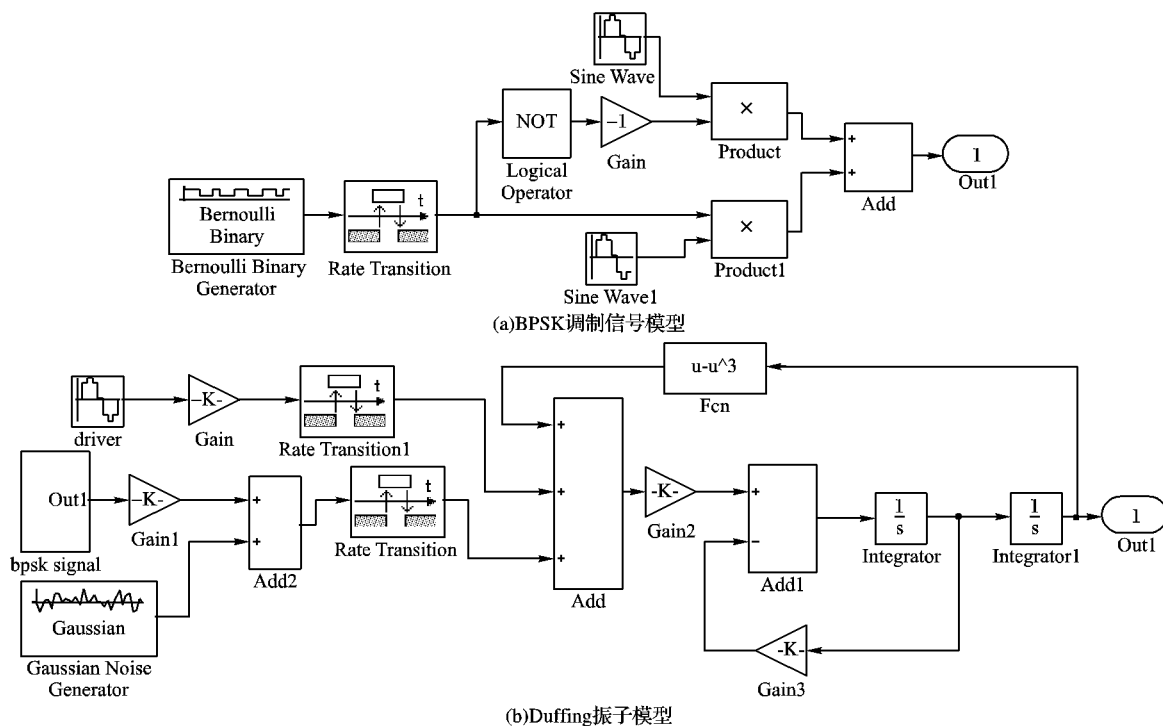


图 3 Duffing 振子解调 BPSK 信号仿真模型

#### 3.2 仿真结果

根据第 3.1 节参数设置,在 Matlab 命令窗口中编写模型的运行命令,得到如图所示仿真结果,图 4 表示 BPSK 调制信号,其中载波信号只是示意图,实际载波频率远大于图中所示,图 5 表示湮没于噪声中的 BPSK 信号和 Duffing 系统的输出序列。

由图 5 可以看出,系统在不同载波相位时的输出明显不同,系统的周期状态和混沌状态区别明显,例如图中第 1、3、6、10 个码片对应的 Duffing 系统输出是周期状态,其余码片对应的 Duffing 系统输出是混沌状态,可见不同的基带传输码对应的系统状态明显不同。

为了能够利用计算机快速地识别系统的状态,利用功率谱熵计算系统所处状态的熵值。功率谱熵数据窗选择 1 000 点,为了提高效率,每隔 100 个采样点计算一次功率谱熵,最

后采用中值滤波的方法对得到的谱熵序列再进行滤波处理,得到结果如图 6 所示。

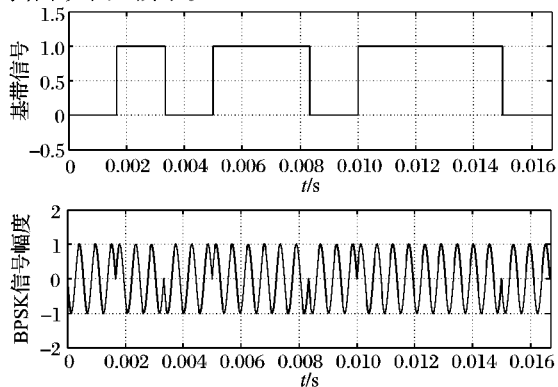


图 4 BPSK 调制信号

从图 6 可以看出,不同状态下的功率谱熵值明显不同,经过中值滤波处理之后,可以清晰地系统的混沌和周期状态区分开,混沌状态下的熵值在 0.7 到 0.8 之间,而周期状态时的熵值在 0.4 左右,通过熵值与设定的门限值比较,可以很好地恢复二进制基带信号。

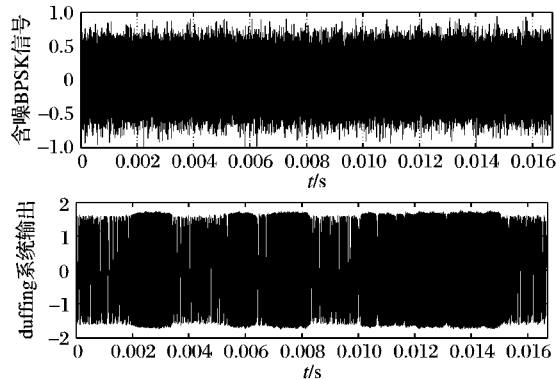


图 5 Duffing 系统输出

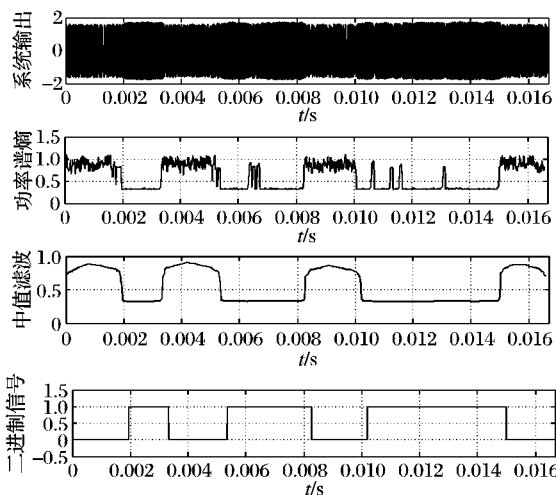


图 6 功率谱熵判别系统状态

### 3.3 性能分析

为了验证利用 Duffing 振子系统解调 BPSK 信号的抗噪性能,采集 10000 位的数据,将采集到的数据中加入高斯白噪声,分别利用传统的相干解调方法、混沌系统与功率谱熵判别法相结合的解调方法及混沌系统和包络判别法相结合的解调方法<sup>[9]</sup>进行解调,并计算不同信噪比时系统误码率。经过 6 次蒙特卡罗仿真实验,得到如图 7 所示的误码率性能曲线。从仿真结果可以看出,在低信噪比环境下,利用混沌振子解调 BPSK 信号的抗噪性能明显优于传统的相干解调方法,在低信噪比下仍能满足通信要求;同时,功率谱熵判别方法的性能略优于包络判别方法。

## 4 结语

利用传统的解调方法对强噪声背景中的 BPSK 信号进行解调,无法满足通信要求。本文从混沌系统优良的抗噪性能出发,结合 BPSK 信号的调制特点,给出了利用混沌振子和功率谱熵解调强噪声背景中 BPSK 信号的方法,并建立 Simulink 仿真模型进行了仿真研究。仿真实验表明:本文方法解调 BPSK 信号是可行的,而且具有良好的抗噪性能,相同信噪比下,误码率明显低于传统的相干解调方法,性能略优于混沌系

统和包络判别相结合的解调方法,但熵作为混沌不变量之一,用于混沌系统状态判别,理论依据更充分。

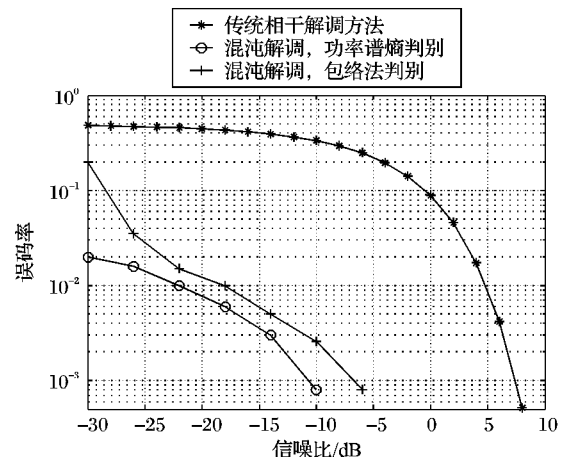


图 7 误码率性能曲线

### 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] // IEEE International Joint Conference on Neural Networks. New York: IEEE Neural Networks Council, 1992, 2: 881-888.
- [2] CHANCE M G, SCOTT H. Weak signal detection by small-perturbation control of chaotic orbits [C] // IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. Washington, DC: IEEE, 1996, 3: 1883-1886.
- [3] 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, 1999, 46(2): 440-444.
- [4] 张淑清, 姜万录, 李志全, 等. 小信号检测中间歇混沌运动的机理 [J]. 传感技术学报, 1998, 11(4): 37-41.
- [5] 戴冲, 姜向东. 基于混沌振子的微弱信号检测 [J]. 微计算机信息, 2008, 4(1): 122-123.
- [6] 李月, 徐凯, 杨宝骏, 等. 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.
- [7] 金虎, 王可人. 基于 Duffing 振子的直接扩频信号载波检测方法 [J]. 电路与系统学报, 2009, 14(1): 23-27.
- [8] 罗佑新, 陈卫国, 车晓毅. 基于 Simulink 的微弱信号混沌检测仿真研究 [J]. 浙江纺织服装职业技术学院学报, 2005, 4: 50-52.
- [9] HUANG Y R, YIN C Q, LIU L, et al. A method of 2FSK signal detection using Duffing oscillator [C] // CCCM: ISECS International Colloquium on Computing, Communication, Control, and Management. Washington, DC: IEEE, 2008, 2: 510-513.
- [10] 刘曾荣. 混沌的微扰判据 [M]. 上海: 上海科技教育出版社, 1989.
- [11] 姜万录, 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.
- [12] 刘丁, 任海鹏, 李虎明. 基于 Lyapunov 指数的弱周期信号检测 [J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(12): 1215-1218.
- [13] 薛定宇, 陈阳泉. 高等应用数学问题的 Matlab 求解 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [14] 李颖, 朱伯立, 张威. Simulink 动态系统建模与仿真基础 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004.