

基于 FHN 神经元模型的 UWB 信号检测方法

刘潇文, 蒋 磊

(空军工程大学信息与导航学院,西安,710077)

摘要 针对 FHN 模型检测 UWB 信号时需要已知 UWB 信号和调节噪声强度来产生随机共振的局限性,研究分析了 FHN 模型系统参数与发生随机共振现象的关系,推导了新的输入输出互相关函数,提出了基于新互相关函数的参数调节 FHN 模型检测新方法。采用新方法对强噪声中的 UWB 脉冲信号进行检测并对该方法的检测性能进行了仿真比较与分析。仿真结果表明,新方法可以较为准确地检测到淹没在强噪声中的未知 UWB 脉冲信号,是一种低信噪比非合作下检测 UWB 信号的方法。

关键词 超宽带;信号检测;FHN 神经元模型;互相关函数;非合作

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2015.04.014

中图分类号 TN911.23 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2015)04-0058-04

Ultra-wideband signal detection based on FHN model method

LIU Xiaowen,JIANG Lei

(Information and Navigation College,Air Force Engineering University,Xi'an 710077,China)

Abstract: Aimed at the problems of FHN model that the detection of UWB signals is restricted by the relationships between system parameters and aperiodic stochastic resonance (ASR), i.e. the known UWB signal and the adjusted intensity of noise, the cross-correlation function is derived, and a method of ASR FHN model with adjusting system parameters is proposed based on the new cross-correlation function. The proposed method is used to detect UWB-IR signal. The simulation results show that the unknown UWB-IR signal in high noise can be accurately detected by the proposed method applicable to detect UWB signal under condition of non-cooperation in low signal to noise ratio(SNR)

Key words: ultra-wideband; signal detection; FHN model; cross-correlation function; non-cooperative

超宽带脉冲信号具有较高的传输速率、较强的穿透特性以及较好的抗干扰传输特性^[1]。因此,超宽带通信系统已成为各国军事领域重点研究对象,在雷达系统、无人机的高速数据链以及短波电台等系统中已有广泛的应用,使非合作第三方获取信息更加困难,对超宽带冲激无线电(UWB-IR)信号检

测技术的研究具有非常重要的意义^[2]。

20 世纪 90 年代以来,人们将随机共振应用到小信号测量中,主要是研究如何调节噪声使系统产生随机共振现象,从而提取微弱周期信号^[3]。文献^[4]采用双稳态随机共振系统,利用 Langevin 方程及所对应的 Fokker-Planck 方程处理了周期信号与

收稿日期:2015-01-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61001111)

作者简介:刘潇文(1991—),男,陕西咸阳市人,硕士生,主要从事超宽带信号检测研究.E-mail:lxw5054@163.com

引用格式:刘潇文,蒋磊.基于 FHN 神经元模型的 UWB 信号检测方法[J].空军工程大学学报:自然科学版,2015,16(4):58-61. LIU Xiaowen,JIANG Lei.Ultra-wideband signal detection based on FHN model method[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition,2015,16(4):58-61.

噪声的混合信号。文献[5]研究了双稳态随机共振系统参数对微弱信号检测的影响,实现了参数调节随机共振系统检测微弱周期信号的方法。文献[6]以一定的学习规律,自动调节噪声到信噪比峰值对应的噪声强度,这种自适应随机共振检测方法较好地检测到了周期信号。

目前,随机共振检测微弱信号的研究大多是针对微弱周期信号,然而实际应用中往往需要研究非周期信号,随机共振检测非周期信号的研究却不多。FitzHugh-Nagumo (FHN) 神经元随机共振系统是美国科学家 Collins 在研究可激神经模型时提出的一种非周期随机共振系统, FHN 神经元模型已经被证实可以运用于弱信号复原^[7],模式识别^[8],和图像复原等领域^[9]。FHN 模型已有的评价方法已经被证实具有较好的评价效果,但在使用时都需要知道非周期信号波形后才能对随机共振系统进行评价分析,由此可见,它们都不适合非周期信号未知的情况下评价非周期随机共振系统。

针对非周期信号未知的情况,凭借 FHN 神经元随机共振系统的输入信号,提出了新的输入输出互相关函数的随机共振评价方法:

$$C_1 = \frac{\langle [\eta(t) - \overline{\eta(t)}] [R(t) - \overline{R(t)}] \rangle}{\sqrt{\langle [\eta(t) - \overline{\eta(t)}]^2 \rangle \langle [R(t) - \overline{R(t)}]^2 \rangle}} \quad (1)$$

式中: $\eta(t)$ 为 FHN 神经元随机共振系统输入的非周期信号与噪声的和; $R(t)$ 为随机共振系统的输出。与传统的互相关函数准则相比,虽然新的评价准则计算出的互相关值较小,但是其互相关值与系统参数之间的互相关曲线非常相似,曲线峰值对应的横坐标也相近。因此可以说,当非周期信号未知时,新输入输出互相关函数评价准则下的 FHN 神经元模型可以检测出淹没在强噪声中的未知非周期信号。

1 FHN 神经元模型的检测方法

在用 FHN 神经元模型检测非周期 UWB-IR 信号的仿真实验中发现,系统的部分参数,信号的幅度以及系统输入信号的采样率都会影响到 FHN 神经元模型检测信号的效果。针对不能通过调节输入的噪声强度来产生随机共振现象的情况,调节系统参数以实现随机共振是十分必要的。

1.1 超宽带脉冲信号模型

实验中选用的非周期 UWB-IR 信号为:

$$s(t) = A \sum_k \left(\left[1 - 0.4\pi \left(\frac{t - t_0 - kT}{t_n} \right)^2 \right] \cdot \exp \left[-0.2\pi \left(\frac{t - t_0 - kT}{t_n} \right)^2 \right] \right), k \in \{0, 1, 3, 5, 6, 8\} \quad (2)$$

式中: $t = 1 : 1 : 1\,000$ ns, 高斯类冲激函数的时间参数 $t_n = 3.112$ ns, $t_0 = 8.51$ ns, $T = 9.8$ ns。式(2)是由高斯类脉冲信号构成的非线性非稳定信号,当信号幅度 A 取 0.141 V 时,信号波形见图 1(a)。图 1(b)是此 UWB-IR 信号淹没在噪声中的波形,此时信噪比为 -20 dB。

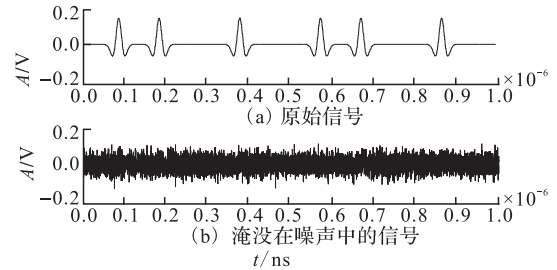


图 1 超宽带脉冲信号及其信噪比为 -20 dB 波形

Fig.1 UWB-IR signal and SNR reach -20 dB

1.2 不同输入信噪比下的检测性能分析

图 2、图 3、图 4 仿真实验发现,当输入信噪比不同时,为取得较好的随机共振效果必须取不同的 ϵ 值,选定超宽带信号 $A = 0.141$ V, FHN 神经元模型参数 $a = 0.9$, 系统输入的信噪比 -20 dB、-15 dB、-10 dB、-5 dB 进行实验。

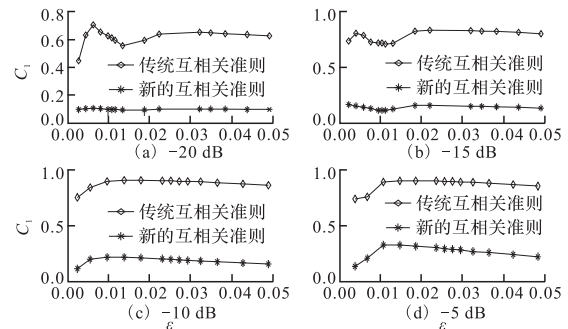


图 2 不同信噪比时随 ϵ 变化的互相关曲线

Fig.2 Cross-correlation curve in different ϵ

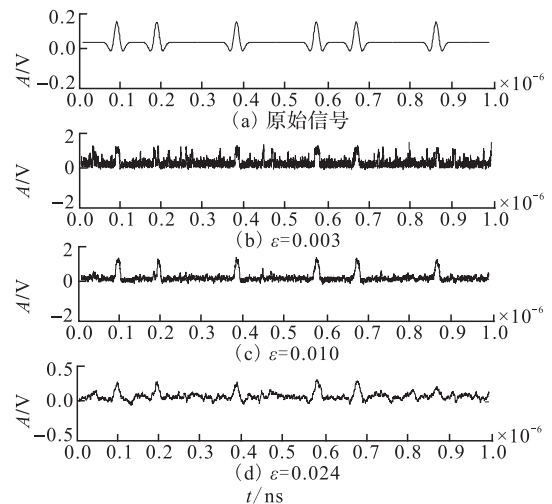


图 3 信噪比 -20 dB 不同 ϵ 时检测到的波形

Fig.3 Detection wave in different ϵ when SNR reach -20dB

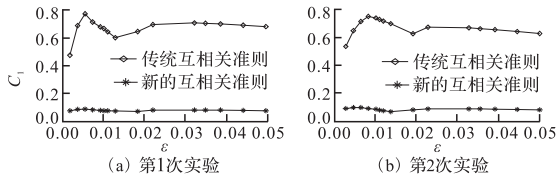


图4 信噪比-20 dB时随ε变化的互相关曲线

Fig.4 Cross-correlation curve in different ε when SNR reach -20dB

图2可以看出,4条曲线都是非单调近似的单峰曲线,最大峰值处对应的ε值可以使FHN神经元模型非周期随机共振效果最好,系统达到最好的检测状态。由图2(b)、(c)、(d)可以看出,在这3种信噪比下曲线峰值对应的ε大致为0.024,当信噪比进一步降低到-20 dB时,ε=0.005时关系曲线达到峰值,若仍然取ε=0.024,则不能得到最好的检测效果。图3是信噪比为-20 dB,ε分别取0.003,0.010和0.024时FHN神经元模型检测到的波形,可以看出,ε=0.010时检测效果最好,ε=0.003时检测波形受到较多噪声的影响,而当ε=0.024时检测波形能量下降,个别脉冲没能检测到。实验中发现,即使相同信噪比下,最优ε的取值也可能会有细微差别见图4。可见,在运用FHN神经元模型检测超宽带信脉冲号检测时,通过输入输出互相关系数来选取最优ε是十分必要的。

1.3 不同信号幅度下的检测性能分析

图5是针对不同的信号幅度进行了仿真实验,由图可见不仅系统参数ε会影响到超宽带信号的检测效果,系统参数a也是检测信号的关键因素。实验在信噪比-20dB。

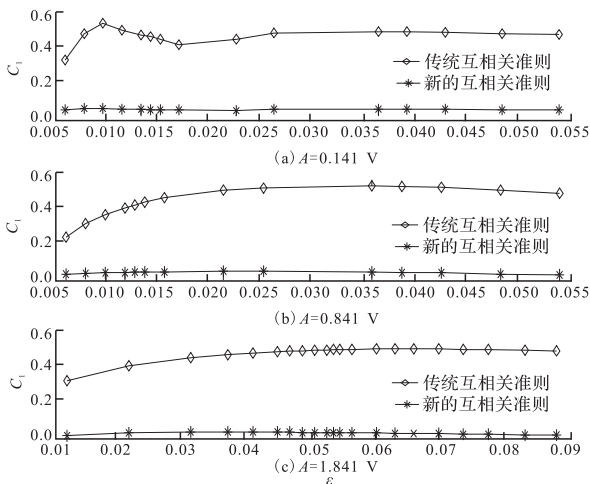


图5 不同信号幅度时随ε变化的互相关曲线

Fig.5 Cross-correlation curve in different amplitude

图5为a=0.9时ε与C1的关系曲线。由关系曲线可以看出当信号幅度变大,曲线峰值对应的ε值也变大,即随着信号幅度的增长,为使FHN神经

元模型发生非周期随机共振,ε值也要随之增长,因此,固定ε值不能满足检测的需要。

图6为ε=0.01时的a与C1的关系曲线。由关系曲线可以看出当信号幅度变大。

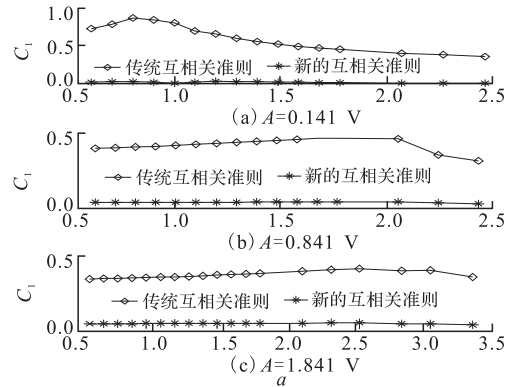


图6 不同信号幅度时随a变化的互相关曲线

Fig.6 Cross-correlation curve in different A mplitude

通过分析在不同信噪比和不同信号幅度情况下互相关值与系统参数的关系曲线可以得出结论,为了使得FHN神经元模式适合UWB-IR信号波形未知情况下的信号检测,必须为FHN神经元模型设定参数动态调节机制来满足信号检测的需求。

1.4 FHN神经元模型检测超宽带信号的方法

1)将带噪声的UWB-IR信号输入到FHN神经元模型中,选取采样点数为10⁴,系统参数b=0.15, A=0.000 11。

2)取a=0.9,运用四阶龙格-库塔方法求解含有输入信号的FHN模型,从而得到系统输出。

3)根据系统输出与系统输入求ε与C1的关系曲线,得到最优ε取值。

4)在ε取最优值时,再次求解系统模型得到系统输出,并根据系统输出与系统输入求a与C1的关系曲线,得到最优a。

5)将求得的最优参数ε和a带到FHN神经元模型中,该模型便可准确地检测到淹没在强噪声中的UWB-IR信号。

2 超宽带脉冲信号检测

2.1 超宽带脉冲信号检测

根据提出的检测流程,对信噪比为-20 dB,幅度分别为0.141 V、0.841 V和1.841 V的UWB-IR信号进行FHN神经元模型检测。由图5可以看出,3种幅度情况下,系统参数ε的最优取值分别为0.010,0.035和0.071。将ε带入FHN神经元模型系统中,进而得a与C1的关系曲线见图7。

由峰值对应的参数a可得,幅度为0.141 V时

最优的 a 为 0.8,幅度为 0.841V 时最优的 a 为 1.6,幅度为 1.841V 时最优的 a 为 1.4。根据所求到的系统参数得到的检测波形见图 8~10。

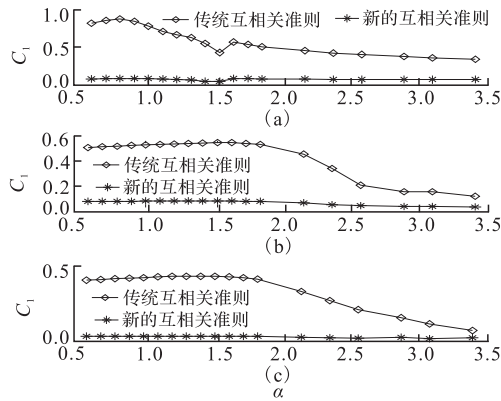


图 7 ϵ 固定时随 a 变化的互相关曲线

Fig.7 Cross-correlation curve changed with different amplitude

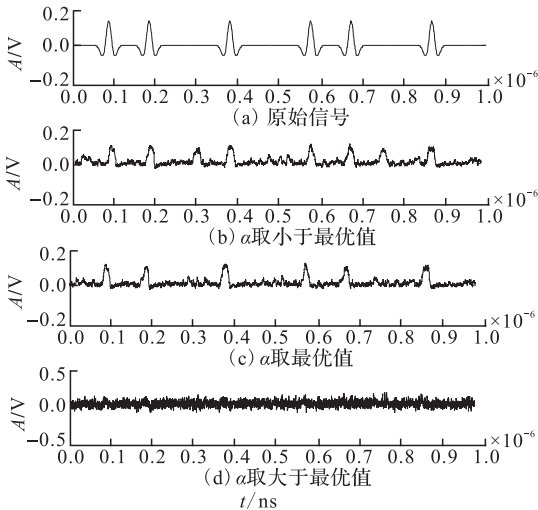


图 8 幅度为 0.141 V 时检测的波形

Fig.8 Detection wave when amplitude is 0.141

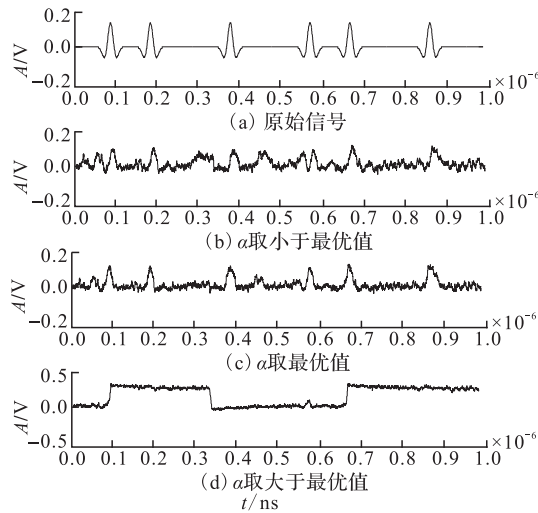


图 9 幅度为 0.841 V 时检测的波形

Fig.9 Detection wave when amplitude is 0.841

通过仿真图可以看出,系统参数取最佳值时,FHN 神经元模型发生了非周期随机共振,此时系统

检测 UWB-IR 信号的效果最好。

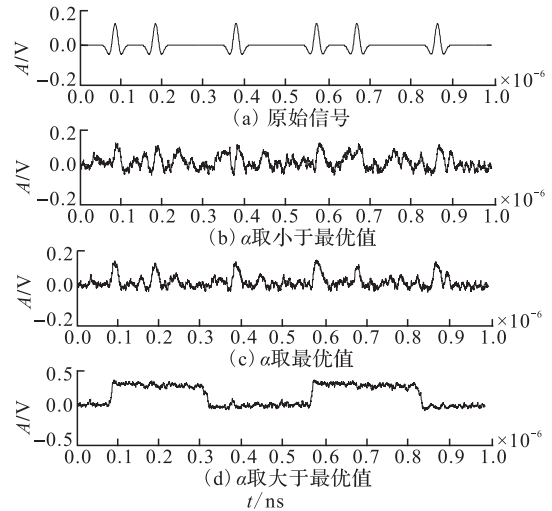


图 10 幅度为 1.841 V 时检测的波形

Fig.10 Detection wave when amplitude is 1.841 V

2.2 检测方法的对比分析

通过确定信号检测指标公式,可以定量的描绘出信号检测方法在检测 UWB-IR 信号时的性能。检测到的信号与原始脉冲信号的均方根误差是从信号整体角度来衡量检测方法性能的方法,可以作为评价检测性能的依据,均方根误差越小表示检测方法的检测性能越好。均方根误差的表达式为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [s(i) - \hat{s}(i)]^2} \quad (3)$$

式中: $s(i)$ 表示原始脉冲信号; $\hat{s}(i)$ 表示检测到的信号; n 为信号长度。

图 11 是 $A = 0.141 V$ 检测方法的对比。在选定的信噪比区间上,FHN 神经元模型检测 UWB-IR 信号时,具有最小的均方根误差。信噪比小于 -15 dB 时,曲线的增长速度比较慢,检测性能非常好。-15 dB 以后,曲线的增长速度明显加快,-20 dB 时,误差为 0.269 1,结合前文检测到的脉冲波形可以看出,-20 dB 时 FHN 神经元模型依旧可以检测出淹没在噪声中的超宽带脉冲信号。FHN 神经元模型对于非周期信号具有较强的去噪声能力,是一种适合检测低信噪比下超宽带信号的方法。

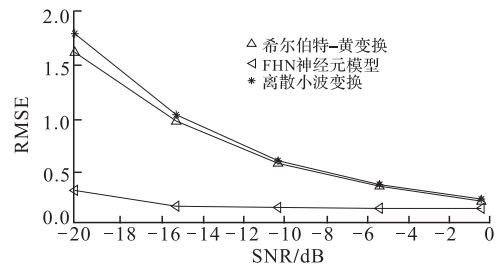


图 11 不同检测方法的对比分析

Fig.11 The comparison between difference detection method

(下转第 78 页)

- [2] 詹亚峰,无线数字通信的盲信噪比估计[J]. 清华大学学报:自然科学版,2003,43(7):957-960.
ZHAN Yafeng. Blind SNR Estimates in Wireless Digital Communication [J]. Journal of Tsinghua University Science and Technology,2003, 43(7): 957-960.(in Chinese)
- [3] 廖红舒.基于有限长样本数据的信噪比估计[J]. 电子科技大学学报, 2012,41(3): 364-367.
LIAO Hongshu, SNR Estimation Based on Finite Sample Data[J]. J Uni of Electronic Science & Technology of China, 2012,41(3): 364-367.(in Chinese)
- [4] 张金成.一种鲁棒的基于子空间分解的盲信噪比估计方法[J]. 数据采集与处理,2011,26(5):609-614.
ZHANG Jincheng, Robust Blind SNR Estimation Method Based on Subspace Decomposition [J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2011, 26(5):609-614.(in Chinese)
- [5] Rahmani.Robust and Rapid Converging Adaptive Beam-forming Via A Subspace Method for the Signal - plus - interferences Covariance Matrix Estimation [J]. IET Signal Processing,2014, 8(5): 507-520.
- [6] 李鹏,一种基于 Otsu 准则的盲信噪比估计算法[J]. 重庆邮电大学学报:自然科学版,2013,25(5):611-615.
LI Peng, A Blind SNR Estimation Algorithm Based on Otsu Criterion [J]. Journal of Chongqing University of Post and Telecommunications; Natural Science Edition, 2013, 25(5): 611-615.(in Chinese)
- [7] Chew A.Hybrid Coherence Model for Noise Reduction [J]. IEEE Trans on Geoscience & Remote Sensing, 2014,53(5):158-162.
- [8] 唱亮.非协作通信中的盲信噪比估计[J].通信学报,2008,29(3):76-81.
CHANG Liang, Blind SNR Estimation in Non-cooperative Communications [J]. Journal on Communications, 2008, 29(3):76-81.(in Chinese)
- [9] Wei Li. Subspace-based SNR Estimator for OFDM System Under Different Channel Conditions[C]//Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB) IEEE International Symposium on. 5-7 June 2013.
- [10] STEPHENNE A, BELLILI F, AFFES S. Moment - Based SNR Estimation Over Linearly - modulated Wireless SIMO Channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(2): 714-722

(编辑:姚树峰)

(上接第 61 页)

3 结语

本文通过调节模型系统参数而不是噪声强度使 FHN 神经元模型出现随机共振现象的检测方法,提出了通过调节 FHN 神经元模型系统参数来达到随机共振的 UWB-IR 信号检测方法流程,提出了新的输入输出互相关系数的评价方法,将 FHN 神经元模型检测 UWB-IR 信号的方法推广到原始脉冲信号未知的情况。仿真实验说明本文提出的调节 FHN 神经元模型系统参数的检测方法是可行的。

参考文献(References):

- [1] KANG X F, YANG J W, MEN S. Blind Adaptive Receiver Based on RLS-CMA for TH-UWB System[J]. The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, 2011, 18(6): 38-43.
- [2] DENG H W, ZHAO Y J, FU F, et al. Compact and High Isolation Microstrip Diplexer for GPS and UWB Application [J]. Electronics Letters, 2013, 49(10):659-666.
- [3] NISHIGUCHI K, FUJIWARA A. Detecting Signals Buried in Noise Via Nanowire Transistors Using Stochastic Resonance[J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(19): 193108.
- [4] SHI S, YIN W, YANG M, et al. A High-resolution Weak Signal Detection Method Based on Stochastic Resonance and Superhet Technology[C]//2013 8th International Conference on Communications and Networking in China. IEEE, 2012: 329-333.
- [5] YU M, CHEN J. Blind Adaptive Stochastic Resonance in Base Band Binary Signal Processing[C]//2010 6th International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing.IEEE, 2010: 1-4.
- [6] FU Z K, XING J C, ZHU R D, et al. A New Method of Detecting line-spectrum Based on Auto-correlation with Stochastic Resonance Theory[C]//Control and Decision Conference, IEEE, 2013: 1104-1107.
- [7] CHEN K, FAN Y L, GENG L S, et al. The Research on the Stochastic Resonance Based of Feedback FitzHugh-Nagumo Neural Network[C]//2010 8th World Congress on Intelligent Control and Automation, IEEE, 2010: 6729-6734.
- [8] 吴莉莉, 惠国华, 林爱英, 等. 基于非周期随机共振的粮食早期霉变识别研究[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(4): 742-747.
WU Lili, HUI Guohua, LIN Aiyong, et al. Study on Early Moldy Grain Identification Based on Aperiodic Stochastic Resonance [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(4): 742-747.
- [9] NOMURA A, ICHIKAWA M, OKADA K, et al. Image Edge Detection with Discretely Spaced FitzHugh-Nagumo Type Excitable Elements [C]// Nonlinear Dynamics and Synchronization & 16th International Symposium on Theoretical Electrical Engineering, 2011 Joint 3rd International Workshop on IEEE, 2011: 1-8.

(编辑:姚树峰)