

文章编号: 2095-4980(2019)05-0788-06

无线通信中周期性脉冲的干扰检测方法及其性能

逢天洋¹, 李永贵², 牛英滔², 韩晨¹, 夏志¹

(1.陆军工程大学 通信工程学院, 江苏 南京 210000; 2.南京电讯技术研究所, 江苏 南京 210000)

摘要: 在分析无线通信环境中脉冲干扰特征及其对无线通信影响的基础上, 提出利用修正周期图功率谱密度和NP定理对周期性脉冲干扰进行干扰检测的策略与脉冲周期及占空比等参数测量的方法。在给定虚警率指标下, 推导并计算了周期性脉冲干扰检测的概率, 并通过实验仿真验证了采用本文所提策略检测周期性脉冲干扰的有效性和准确性。

关键词: 周期性脉冲干扰; NP定理; 干扰检测; 虚警率

中图分类号: TN975

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201905.0788

Periodic pulsed jamming detection method and its performance in wireless communication

PANG Tianyang¹, LI Yonggui², NIU Yingtao², HAN Chen¹, XIA Zhi¹

(1.School of Communication Engineering, Army Engineering University, Nanjing Jiangsu 210000, China;
2.Nanjing Telecommunications Technology Institute, Nanjing Jiangsu 210000, China)

Abstract: Based on the analysis of the characteristics of pulsed jamming in wireless communication and its impact on wireless communication, a strategy for detecting the periodic pulsed jamming by using the power spectral density of the modified periodic pattern and Non-deterministic Polynomial(NP) theorem is proposed, and the method for measuring the parameters of pulse period and duty cycle is also presented. The probability of periodic pulsed jamming detection is deduced and calculated under the given false alarm rate index. The effectiveness and accuracy of the proposed strategy for detecting periodic pulsed jamming are verified through experimental simulation.

Keywords: periodic pulsed jamming; Non-deterministic Polynomial theorem; jamming detection; false alarm

动态干扰是针对现代无线通信系统实施高效干扰的主要特征^[1]。典型的动态干扰包括周期脉冲干扰、线性扫频干扰和跟踪干扰等多种具体样式。其中, 周期性脉冲干扰具有持续时间短、瞬时功率高、实施简便以及难以被通信方捕获等优点, 被通信干扰方热衷使用。特别是近年来, 干扰方为了追求更低的干扰成本和更好的干扰效果, 结合对干扰目标的认知能力, 推出了多种变种的脉冲干扰(如基于认知干扰的灵巧干扰^[2]、高速脉冲碰撞干扰等), 导致干扰效率更高、干扰效果更好、干扰行为更隐蔽^[3], 已构成对军用无线通信系统特别是对战术无线通信、数据链系统的新威胁。因此, 无线通信系统对脉冲干扰的感知、检测和参数测量, 是对抗脉冲干扰能力的基本要求, 也是对抗动态干扰能力的基础。然而常规检测方法难以可靠检测脉冲干扰的存在, 检测时间、概率和准确性等性能也有待提高。因此, 创新检测方法, 提高检测性能是亟待解决的问题。因为多数脉冲干扰具有周期性, 或通过干扰解析^[4]可以转换为周期脉冲干扰、或周期脉冲干扰的合成, 因此对周期性脉冲干扰的检测技术具有代表性。本文将主要讨论周期脉冲干扰的检测, 重点研究周期脉冲干扰的检测策略和性能。

已有文献对周期性脉冲干扰开展了一定研究。文献[5]采用最大熵概率密度谱估计算法估计接收通信信号的概率密度谱, 进而用估计的概率密度谱设计滤波函数对信号滤波来抑制窄带脉冲干扰, 但并未提出有效的脉冲干扰检测方法。文献[6]从传统的幅度处理、接收机自动增益控制电路以及系统编码等方面出发, 进行了理论研究, 重点分析了“前向纠错+交织编码”技术, 并提出一种综合前向纠错编码、交织编码和接收机自动增益控制电路

收稿日期: 2018-01-04; 修回日期: 2018-05-10

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目(BK20151450)

的脉冲干扰抑制方案，这本质上是一种通过纠错、交织等编码技术，主动抵消脉冲干扰影响的方法，未提出具体的脉冲干扰检测方法。文献[7]基于多次观测二元检测理论，提出一种新的脉冲检测算法，有效提高了短时脉冲干扰信号的检测概率，但未对具有周期性的干扰进行研究。文献[8-14]均是利用能量检测法或循环平稳特性进行干扰信号或可用频谱检测，但文献所涉及的干扰信号均为噪声干扰，并没有关于周期性脉冲干扰的检测方法。可见，已有算法对脉冲干扰的检测研究较少，难以解决在恶意电磁环境下脉冲干扰信号的检测问题。

本文主要讨论在给定的干扰检测要求指标(虚警率等)下，如何有效检测周期性脉冲干扰信号的问题，并对检测性能进行理论推导和分析。

1 干扰检测系统模型

周期性脉冲干扰是一种在固定频段上周期性发送持续时间短的脉冲信号，从而有效降低目标频段内无线通信可靠性或有效性的干扰样式。本文考虑的干扰信号 $J(n)$ 为周期脉冲高斯噪声干扰，有干扰时，干扰信号均值为 0，方差为 σ_j^2 ， $E[J^2(n)] = \sigma_j^2$ ，其中 $E[\bullet]$ 为均值。

当存在周期性脉冲干扰时，无线通信系统接收到的信号为：

$$x(n) = J(n) + s(n) \tag{1}$$

式中： $x(n)$ 为接收机端接收到的信号； $s(n)$ 为零均值、方差为 σ^2 的加性高斯白噪声(Additive White Gaussian Noise, AWGN)。

本文需要解决的问题是在经过 M 次检测后，能可靠检测到周期性脉冲干扰的存在。为便于研究，对算法条件作如下假设：

- 1) 假设无线通信系统具备宽带检测能力，可一次检测 N 个连续的频域信道。
- 2) 假定观察间隔是脉冲干扰持续时间和中断时间的整数倍。
- 3) 信道中存在的噪声是均值为 0，方差为 σ^2 的 AWGN。
- 4) 通信所用频段由 N 个在频域上互不重叠的信道组成，每个信道带宽为 W_{ch} ，目标频谱带宽为 $W = NW_{ch}$ 。

2 脉冲干扰检测算法

干扰检测系统如图 1 所示。利用 NP 定理对检测判决门限进行计算，利用接收数据进行周期图法计算功率谱密度，将计算出的能量值与门限值进行比较，以判决检测周期性脉冲干扰。具体步骤如下：

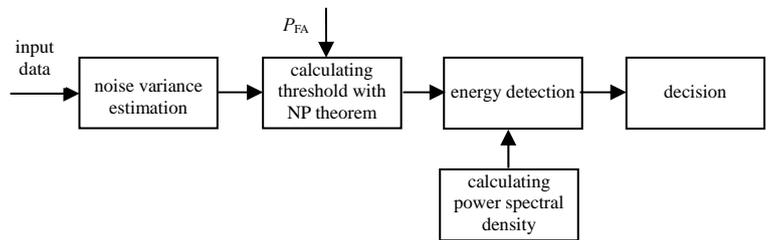


Fig.1 Jamming detection system
图 1 干扰检测系统

1) 计算目标频段的功率谱。在第

$m(m=1,2,\dots)$ 个检测时刻，NP 能量检测器对目标频段进行功率谱计算。每段功率谱点数为 L ，每次计算采用 $2NL$ 个数据点。按修正周期图法计算功率谱，第 m 次检测得到的功率谱为：

$$P(f_k) = \frac{\frac{1}{N} \left| \sum_{l=0}^{2L-1} w(l)x(l)e^{-j2\pi f_k l} \right|^2}{\frac{1}{2L} \sum_{l=0}^{2L-1} |w(l)|^2}, k = 1, 2, 3, \dots, NL \tag{2}$$

式中： $w(l)$ 为窗函数； NL 为功率谱点数； $x(l)$ 为待检测的信号序列。本文选用汉明窗。

2) 计算各信道中的能量。式(2)中得到的功率谱点数为 NL 点(实信号)，将功率谱按顺序等分为 N 段，每段功率谱点数为 L ，对应于一个信道。第 m 次检测第 i 个信道中的能量为：

$$E_{m,i} = \frac{W_{ch}}{L} \sum_{k=1}^L P_m(f_{[(i-1)L+k]}) = \frac{W}{NL} \sum_{k=1}^L P_m(f_{[(i-1)L+k]}) \tag{3}$$

3) 判断是否有信道在第 m 次检测中受扰。将第 i 个信道的能量值 $E_{m,i}$ 与检测门限 γ 比较，若 $E_{m,i} > \gamma$ ，则判定第 m 次检测时第 i 个信道受到干扰，记为 $I_{i,m} > 0$ ；反之，则判为第 m 次检测第 i 个信道未受到干扰，记为 $I_{i,m} = 0$ 。按该方法判断所有 N 个信道是否受扰。

4) 若多次检测后发现，干扰总是出现在同一个信道，即 $I_m = I_i(0 < m < M_1; i = const) > 0$ ，在此信道连续检测 N_1 次都存在干扰，又检测 N_2 次不存在干扰，则可判断存在周期性脉冲干扰。

3 脉冲干扰检测算法性能分析

假设通信信道中无信号传输, 则接收到的信号为 $x(n)$, 做二元假设检验^[9]:

$$\begin{cases} H_0: x(n) = s(n) & n = 0, 1, \dots, L-1 \\ H_1: x(n) = s(n) + J(n) & n = 0, 1, \dots, L-1 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $s(n) \sim N(0, \sigma^2)$ 是均值为 0, 方差为 σ^2 的 AWGN; $J(n)$ 为干扰信号, 是方差为 σ_j^2 的 WGN 信号, 且干扰信号与噪声不相关。由以上假设可得到条件概率密度函数为:

$$p(x; H_1) = \frac{1}{[2\pi(\sigma^2 + \sigma_j^2)]^{\frac{L}{2}}} \exp\left[-\frac{1}{2(\sigma^2 + \sigma_j^2)} \sum_{n=0}^{L-1} x^2(n)\right] \quad (5)$$

$$p(x; H_0) = \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{\frac{L}{2}}} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{n=0}^{L-1} x(n)^2\right] \quad (6)$$

式中 $p(x; H_1)$ 表示在假设 H_1 的条件下接收到信号 $x(n)$ 的概率密度。

根据最大似然准则:

$$L(x) = \frac{p(x; H_1)}{p(x; H_0)} > \gamma \quad (7)$$

将式(5)~(6)代入式(7), 并在不等式两端同时取对数, 得

$$l(x) = \ln L(x) = \frac{L}{2} \ln\left(\frac{\sigma^2}{\sigma^2 + \sigma_j^2}\right) - \frac{\sigma_j^2}{2\sigma^2(\sigma^2 + \sigma_j^2)} \left(\sum_{n=0}^{L-1} x^2(n)\right) > \ln \gamma \quad (8)$$

将与接收信号无关的因子移到不等式右边, 得

$$T(x) = \sum_{n=0}^{L-1} x^2(n) > \gamma' \quad (9)$$

注意:

$$\begin{cases} \frac{T(x)}{\sigma^2} \sim \chi_L^2 & \text{在 } H_0 \text{ 条件下} \\ \frac{T(x)}{\sigma_j^2 + \sigma^2} \sim \chi_L^2 & \text{在 } H_1 \text{ 条件下} \end{cases} \quad (10)$$

因此, 虚警概率 P_{FA} 为:

$$P_{FA} = P_r\{T(x) > \gamma' | H_0\} = P_r\left\{\frac{T(x)}{\sigma^2} > \frac{\gamma'}{\sigma^2} | H_0\right\} = Q_{\chi_L^2}\left(\frac{\gamma'}{\sigma^2}\right) \quad (11)$$

式中: $Q_{\chi_L^2}(x)$ 为卡方分布互补累积分布函数; P_r 为求概率符号; P_{d1} 为实际存在干扰并正确检测出存在干扰的概率。

$$P_{d1} = P_r\{T(x) > \gamma' | H_1\} = Q_{\chi_L^2}\left(\frac{\gamma'}{\sigma^2 + \sigma_j^2}\right) \quad (12)$$

P_{d2} 为实际不存在干扰并正确检测到不存在干扰的概率:

$$P_{d2} = P_r\{T(x) < \gamma' | H_0\} = 1 - Q_{\chi_L^2}\left(\frac{\gamma'}{\sigma^2}\right) \quad (13)$$

假设观察 N_1 次信道中都有干扰, 又观察 N_2 次都没有干扰, 可假设受到了周期为 $(N_1 + N_2)T_d$ 、占空比为 $N_1 / (N_1 + N_2)$ 的脉冲干扰。假设有无干扰之间是相对独立的, 如此循环 M_1 轮检测, 直至达到规定的漏检概率, 每轮检测都检测 $(N_1 + N_2)$ 次。假定脉冲的发射时间和中断时间都是观察间隔的整数倍, 则有:

$$P_d = (P_{d1})^{N_1} (P_{d2})^{N_2} \quad (14)$$

式中 P_d 为连续检测 N_1 次信道中都有干扰, 又观察 N_2 次都没有干扰的概率, 即检测到一个周期的脉冲干扰的概率。重复进行 M_1 轮检测, 每轮检测都是独立的, 则重复 M_1 轮检测后有 m 轮成功检测到脉冲干扰信号的检测概率为:

$$P_D = C_{M_1}^m (P_d)^m (1 - P_d)^{M_1 - m} \quad (15)$$

式中 P_D 与 P_M 的关系为:

$$P_D = 1 - P_M \tag{16}$$

式中 P_M 为误检率。由 m 与 M_1 的比值确定是否有干扰信号存在。

4 仿真及结果

对本文提出的检测策略进行仿真验证。仿真环境和仿真参数为：采样频率 $f_s=20$ MHz，检测时间 $T_d=5 \times 10^{-6}$ s，周期脉冲干扰的周期为 5×10^{-4} s，占空比为 0.1，中心频率为 $f=5$ MHz，干扰信号带宽 $W_{ch}=5$ MHz。能量检测器检测门限值 γ 由给定虚警概率及式(11)给出。仿真中干扰噪声比(Jamming to Signal Ratio, JNR)均为平均干扰噪声比，即一个完整脉冲干扰周期内的干扰功率与噪声功率之比。图 2 为门限值与脉冲干扰虚警概率的关系。

从图 2 可以看出，脉冲干扰检测门限值随虚警率单调递减，较小的虚警率会要求较高的门限值作为判决依据，且门限值的大小与干扰噪声比有着密切关系。干扰噪声比越大，门限越低，与前文理论推导中的式(11)一致，说明在噪声功率更低的信道中，所提方法更容易检测到干扰存在。

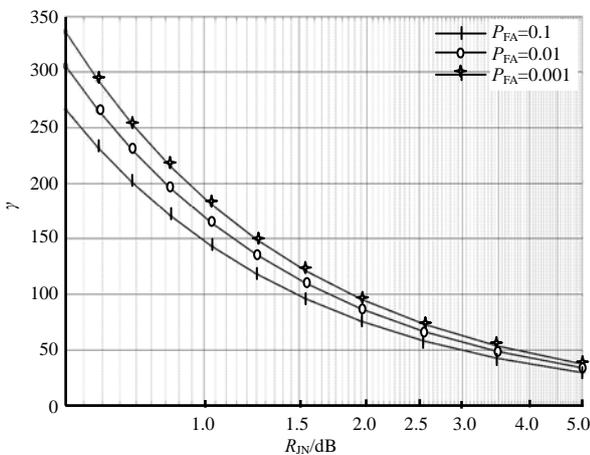


Fig.2 Relationship between false alarm rate and threshold
图 2 虚警率与门限值关系

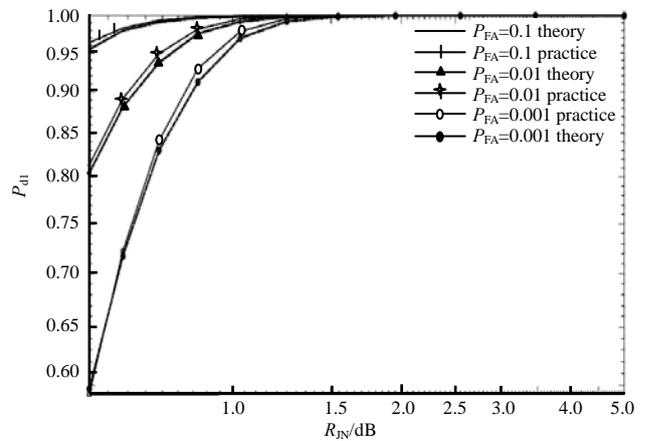


Fig.3 Single detection probability
图 3 单次检测概率

4.1 单次干扰信号检测概率

对不同虚警概率条件下的干扰信号进行检测，选取 20 000 个有干扰信号存在的数据点进行仿真，仿真结果如图 3 所示。

由图 3 可见，单次检测概率随干扰噪声比的增加呈单调递增变化，即干扰信号与背景噪声的区分度越高，越容易检测到干扰的存在。在低干噪比条件下，虚警率的变化对检测概率的影响要高于高干噪比条件下。

同样，对不同虚警率下信道中不存在干扰的情况进行检测，查看是否能正确检测出无干扰。选取 180 000 个无干扰信号存在的数据点，进行仿真，仿真结果如图 4 所示。由仿真结果可以看出，无干扰时的检测概率随干噪比基本保持恒定，这是因为无干扰时的检测概率只与虚警率 P_{FA} 有关，虚警率是设定的恒定值，因此无干扰时的检测概率为恒定的。

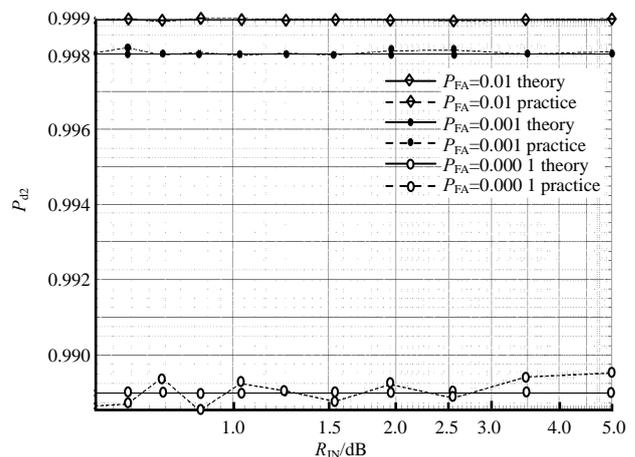


Fig.4 Detection probability without jamming
图 4 无干扰检测概率

4.2 周期性脉冲干扰检测概率

对构建的周期性脉冲干扰进行检测仿真，仿真中判决存在周期性脉冲干扰的依据是：观察 N_1 次信道中都有干扰，又观察 N_2 次都没有干扰，连续 M (本文取 $M=3$) 次这样的检测(实际仿真中，允许不一定是连续的 N_1 都检测到干扰，可以有 2% 的断点)，则判断存在周期性脉冲干扰。

图 5 为此检测策略的检测概率曲线。可以看出,与单次检测概率相同,周期性脉冲检测的检测概率随干噪比呈递增变化。不同的是,在低虚警率且干噪比较低的情况下($P_{FA}=0.0001$),检测概率会急剧下降,此时可认为无法检测出脉冲干扰。这是因为干噪比较低时,干扰信号会淹没在噪声中,此时较高的虚警率导致门限较高,从而难以检测到干扰的存在。图 6 为 $P_{FA}=0.001$ 时不同占空比条件下的周期脉冲检测概率曲线。可以看出,在干噪比较低时,对于给定的干噪比,检测概率随占空比的增加而递减。这是因为占空比越大,干扰功率在时域内越分散,从而导致干扰易被淹没在噪声中,从而降低了检测概率。

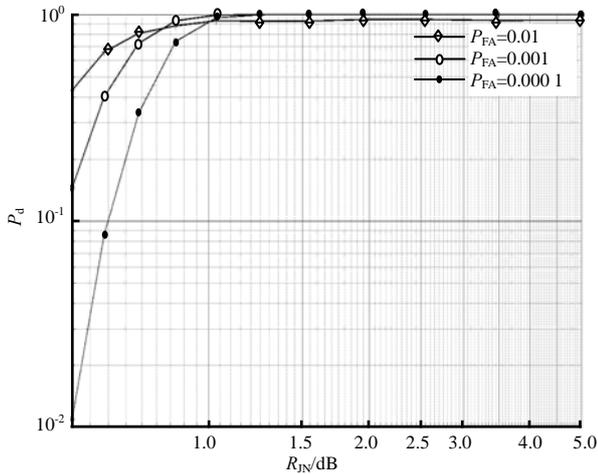


Fig.5 Detection probability of periodic pulsed jamming
图 5 周期性脉冲干扰检测概率

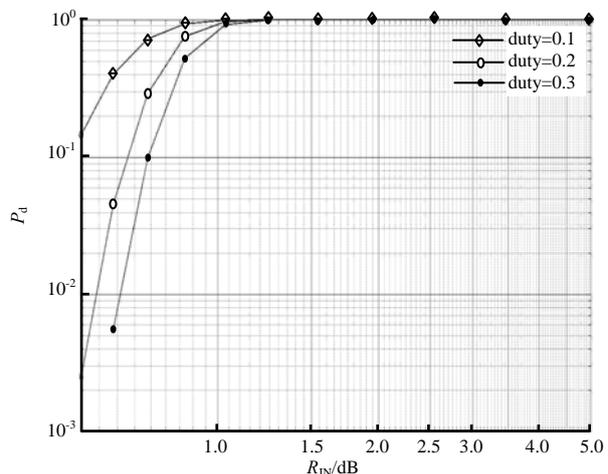


Fig.6 Periodic pulsed jamming detection probability with different duty cycles
图 6 不同占空比周期性脉冲干扰检测概率

5 结论

本文利用经典的 NP 定理和修正周期图计算功率谱密度的方法对周期脉冲干扰进行检测,理论分析并提出一种具体的周期性脉冲干扰检测算法。由仿真结果可知,单次干扰检测的检测概率与干噪比呈递减变化,且在高干噪比时,虚警率对检测概率的影响要小于低干噪比。对于周期性脉冲干扰检测,在低干噪比条件下,检测概率随虚警率呈递增变化,随周期性脉冲干扰的占空比呈递减变化。值得一提的是,在低虚警率和低干噪比条件下,本文提出的检测策略很难检测到周期性脉冲干扰的存在。未来的工作重点主要在于优化周期性脉冲干扰的检测策略,使其在低虚警率条件下依然能够检测到干扰,并考虑如何在保证低虚警率的条件下也能使干扰检测概率达到最佳。

参考文献:

- [1] 姚富强. 通信抗干扰工程与实践[M]. 2 版. 南京:电子工业出版社, 2012. (YAO Fuqiang. Communication anti-jamming engineering and practice[M]. 2nd ed. Nanjing, China: Publishing House of Electronics Industry, 2012.)
- [2] 张春磊, 杨小牛. 认知电子战初探[J]. 通信对抗, 2013, 32(2): 1-4. (ZHANG Chunlei, YANG Xiaoni. Elementary study on cognitive electronic warfare[J]. Communication Countermeasures, 2013, 32(2): 1-4.)
- [3] KONSTANTINOS P, MARIOS I, SRIKANTH V. Denial of service attacks in wireless networks: the case of jammers[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2011, 13(2): 245-255.
- [4] 张敬义, 李永贵. 基于时频关系的复合人为干扰自适应预测[J]. 高技术通讯, 2015, 25(2): 196-204. (ZHANG Jingyi, LI Yonggui. Adaptive prediction of multiplicate jamming based on time-frequency relation[J]. Chinese High Technology Letters, 2015, 25(2): 196-204.)
- [5] 王绍威, 高勇. 窄带脉冲干扰环境下直扩信号伪码周期及序列的盲估计[J]. 电子对抗信息技术, 2015, 30(4): 8-14. (WANG Shaowei, GAO Yong. Blind estimation for the pseudo-code sequence and its period of DSSS signals under narrowband impulse interference environment[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2015, 30(4): 8-14.)
- [6] 姚军勇. 基于突发直扩通信的抗干扰技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2006. (YAO Junyong. Research on interference suppression algorithm in burst-mode DSSS communication systems[D]. Changsha, China: National University of Defense Technology, 2006.)

- [7] 曾祥华,周益. 卫星导航接收机中短时脉冲干扰抑制方法[J]. 数据采集与处理, 2013,28(1):78–80. (ZENG Xianghua, ZHOU Yi. Method for short-time pulse interference blanking in satellite navigation receiver[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2013,28(1):78–80.)
- [8] 张剑,周兴建,卢建川. 基于 Takagi–Sugeno–Kang 模糊集合的噪声干扰检测方法[J]. 电讯技术, 2016,56(2):151–155. (ZHANG Jian,ZHOU Xingjian,LU Jianchuan. A Takagi–Sugeno–Kang fuzzy approach to noise jamming detection[J]. Telecommunication Engineering, 2016,56(2):151–155.)
- [9] ORLANDO D. A novel noise jamming detection algorithm for radar applications[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2017, 24(2):206–210.
- [10] KONONOV A,KIM J H,SHIN Y C. Noise jamming detection algorithm[C]// 2013 IEEE Radar Conference. Ottawa,ON,Canada: IEEE, 2013:1–5.
- [11] 潘建国,翟旭平. 基于能量检测的频谱感知方法[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2009,55(1):54–59. (PAN Jianguo, ZHAI Xuping. Spectrum sensing in cognitive radio based on energy detection[J]. Journal of Shanghai University(Natural Science Edition), 2009,55(1):54–59.)
- [12] FAREDUDDIN–AHMED J S,UJJINIMATAD R. Energy detection with different digital modulation techniques over Rayleigh fading channels in cognitive radio networks[C]// 2017 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies. Vellore, India:IEEE, 2017:1–5.
- [13] 江晓林. 认知无线网络中频谱感知算法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学. 2015. (JIANG Xiaolin. Study of spectrum sensing algorithms in the cognitive radio network[D]. Harbin,China:Harbin Institute of Technology, 2015.)
- [14] 陈婷,张博,牛德智,等. 能量检测中的 BPSK 信号最优检测门限[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2016,17(4):75–80. (CHEN Ting,ZHANG Bo,NIU Dezhi,et al. The best detection threshold for BPSK signals based on energy detection method[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2016,17(4):75–80.)

作者简介:



逢天洋(1993–), 男, 哈尔滨市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为通信抗干扰.email: terry_tianyang@sina.com.

李永贵(1964–), 男, 安徽省黄山市人, 高级工程师, 主要研究方向为通信抗干扰.

牛英滔(1978–), 男, 济南市人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为通信抗干扰.

韩晨(1993–), 男, 山东省滨州市人, 硕士, 主要研究方向为通信抗干扰.

夏志(1993–), 男, 江苏省涟水县人, 硕士, 主要研究方向为通信抗干扰.