

基于证据理论的特征值之比协作频谱感知算法*

石新,刘顺兰,张无际

(杭州电子科技大学 电子信息学院,浙江 杭州 310018)

摘要:针对单节点频谱感知容易受到多径效应、隐蔽终端、路径损耗等因素影响,提出了一种基于证据理论的特征值之比协作频谱感知算法。该算法以特征值之比检测法作为本地感知结果,通过基础概率分配(BPA)函数计算出可信度发送给融合中心,融合中心根据D-S证据理论融合规则进行数据融合与判决。仿真结果表明,该算法对比于相关算法,在一定程度上抵抗恶意攻击性能,具有较高的安全性,在低信噪比的环境下或者虚警概率高于0.6的环境下时,该算法的检测概率更加突出,并且该算法还具有较高能效。

关键词: D-S证据理论;随机矩阵;协作频谱感知;认知无线电;特征值

中图分类号: TN925

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.201131

中文引用格式: 石新,刘顺兰,张无际. 基于证据理论的特征值之比协作频谱感知算法[J]. 电子技术应用, 2021, 47(9): 46-50.

英文引用格式: Shi Xin, Liu Shunlan, Zhang Wuji. The ratio of eigenvalues in evidence theory to cooperative spectral sensing algorithm[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(9): 46-50.

The ratio of eigenvalues in evidence theory to cooperative spectral sensing algorithm

Shi Xin, Liu Shunlan, Zhang Wuji

(School of Electronic Information, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In view of the susceptibility of single-node spectrum perception to multipath effect, hidden terminal, path loss and other factors, this paper proposes an eigenvalue ratio cooperative spectrum perception algorithm based on evidence theory. The algorithm takes the ratio of eigenvalues as the local perception result, calculates the reliability by the basic probability distribution(BPA) function and sends it to the fusion center, which conducts data fusion and judgment according to the fusion rules of D-S evidence theory. The simulation results show that compared with the relative algorithm, the algorithm has a higher security against malicious attacks to a certain extent. The detection probability of the algorithm is more prominent in the environment with low SNR or when the false alarm probability is higher than 0.6, and this algorithm also has high energy efficiency.

Key words: Dempster-Shafer evidence theory; random matrix; cooperative spectrum sensing; cognitive radio; eigenvalues

0 引言

在实际的无线通信环境中,单节点的频谱感知技术容易受到多径效应、隐蔽终端、路径损等因素的影响^[1],无法得出正确的感知结果。传统的单节点频谱感知方法有能量检测^[2]、匹配滤波器检测^[3]以及循环平稳特征检测^[4]等。传统的数据融合方式有“OR”准则、“AND”准则等硬判决,但这些数据融合方式都忽视了单个节点所处感知环境的差异。文献[5]第一次将D-S证据理论应用于频谱感知中,其结果优于传统的硬判决规则。文献[6]提出了一种基于证据理论的噪声不确定性检测,通过把噪声信号建模成具有已知分布的随机变量,利用D-S证据理论规则,对前后置信值进行组合,得到全局决策。但他们所采用的本地检测都是能量检测,其感知性能容易

受到噪声干扰。近年来,一些学者提出了两种新型的频谱感知算法:最大最小特征值之比算法(MME)^[7]以及最大最小特征值之差算法(DMM)^[8],具有良好的频谱感知性能,受噪声影响较小,但该算法服从Tracy-Wisdom分布,没有固定的分布函数。针对上述问题,本文提出了一种基于D-S证据理论的特征值之比协作频谱感知算法(TROIET),该算法避免了噪声的干扰,具有较高安全性。TROIET算法以改进的特征值之比算法作为本地检测,然后通过D-S证据理论,结合路径损耗,计算出合适的加权系数,对数据进行融合。仿真结果表明,该算法具有较高的检测性能和安全性。

1 TROIET 频谱感知系统模型

TROIET 频谱感知系统模型由 N 次级用户(SU_i)和一个主用户(PU)组成。

根据统计学中的二元假设模型, SU_i 对PU进行检测

* 基金项目:浙江省自然科学基金(LY18F010013);国家自然科学基金(U1809201)

的情况可以表示为:

$$y_i(k) = \begin{cases} w_i(k), & H_0 \\ h_i(k)x_i(k) + w_i(k), & H_1 \end{cases} \quad (1)$$

其中, $i=1, 2, 3, 4, \dots, N$, $y_i(k)$ 表示 SU_i 接收到信号, $x_i(k)$ 表示待测的 PU 信号, $h_i(k)$ 表示 SU_i 接收信号的路径损耗因子; $w_i(k)$ 表示为一个加性高斯白噪声, 其均值为 0, 方差为 σ^2 。判决为 H_1 , 表示频谱繁忙, 主用户使用该频谱; 判决为 H_0 , 表示频谱空闲, 主用户未使用该频谱。

本文中次级用户 SU_i 采用的是改进特征值之比频谱感知算法进行本地频谱感知。根据式(1), L 个连续抽样信号向量可表示为:

$$\mathbf{Y}_k = [y_k, y_{k-1}, y_{k-2}, \dots, y_{k-L}, y_{k-L+1}]^T \quad (2)$$

$$\mathbf{X}_k = [h_k x_k, \dots, h_{k-L+1} x_{k-L+1}]^T \quad (3)$$

其中, L 为平滑指数, y_k 为 SU 接收的样本信号, x_k 为 PU 发送的样本信号。对 SU_i 按照采样数 N 进行采样, 则得到矩阵 \mathbf{Y}_k 的维度为 $L \times N$:

$$\mathbf{Y}_k = \begin{bmatrix} y_k(1) & \dots & y_k(N) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{k-L+1}(1) & \dots & y_{k-L+1}(N) \end{bmatrix} \quad (4)$$

接收信号的采样协方差矩阵 $\mathbf{R}_Y(N)$ 的维度为 $L \times L$:

$$\mathbf{R}_Y(N) = \frac{1}{N} \mathbf{Y}_k \mathbf{Y}_k^T \approx \mathbf{R}_X + \sigma^2 \mathbf{I}_L \quad (5)$$

其中, $\mathbf{R}_X = E[\mathbf{X}_k \mathbf{X}_k^T]$, σ^2 为加性高斯白噪声的方差, \mathbf{I}_L 是维度 $L \times L$ 的单位矩阵。

利用 SU_i 的采样协方差矩阵, 分别计算出各自协方差矩阵的平均特征值 $\bar{\lambda}_i$ 和最大特征值 $\lambda_{i\max}$ 。每个 SU_i 检测接收信号的特征值之比 ψ :

$$\psi = \frac{\bar{\lambda}_i}{\lambda_{i\max}} \quad (6)$$

由文献[9]可知平均特征值 $\bar{\lambda}_i$ 可以近似服从高斯分布, 即:

$$\bar{\lambda}_i \sim N(\sigma^2, \frac{2\sigma^4}{LN}) \quad (7)$$

由 M-P 定理可知, 对于一个 $L \times N$ 的矩阵 \mathbf{B} 且其中元素满足独立同分^[10]。当 $L \rightarrow \infty, N \rightarrow \infty$ 时, $\frac{L}{N} \rightarrow \alpha (0 < \alpha < 1)$, 则矩阵 \mathbf{B} 的最大特征值可以表示为:

$$\lambda_{\max} = \sigma^2 (1 + \sqrt{\alpha})^2 \quad (8)$$

由式(6)~式(8)可得, 每个 SU_i 检测接收信号的特征值之比 ψ 服从正态分布, 即:

$$\psi \sim N\left(\frac{1}{(1 + \sqrt{\alpha})^2}, \frac{2}{LN(1 + \sqrt{\alpha})^4}\right) \quad (9)$$

2 D-S 证据理论

D-S 证据理论^[11-12]于 1967 年被 Dempster 提出, 并于 1976 年由 Shafer 进行完善, 是一种能够有效处理不确定信息的数学理论。假设 Θ 是一个识别框架, 它是由有限个相互互斥的基本假设组成的。如果集合函数 $m: 2^\Theta \rightarrow$

$[0, 1]$ 满足式(10), 则称集合函数 m 是识别框架 Θ 上的基础概率分配(BPA)函数, 又称 mass 函数。

$$\begin{cases} m(\phi) = 0 \\ \sum_{A \subseteq \Theta} m(A) = 1 \end{cases} \quad (10)$$

其中, 使得 $m(A) > 0$ 的 A 称为焦点。 ϕ 代表空集; $m(A)$ 代表假设 A 的基本概率赋值函数或者基本可信任度。

在识别框架 Θ 上基于 BPA, m 的信任函数为:

$$\text{Bel}(A) = \sum_{B \subseteq A} m(B) \quad (11)$$

在识别框架 Θ 上基于 BPA, m 的似然函数为:

$$\text{Pl}(A) = \sum_{B \cap A = \phi} m(B) \quad (12)$$

所以信任函数 $\text{Bel}(A)$ 和似然函数 $\text{Pl}(A)$ 组成的信任区间 $[\text{Bel}(A), \text{Pl}(A)]$, 用以表示对某个假设的确认程度, 如图 1 所示。

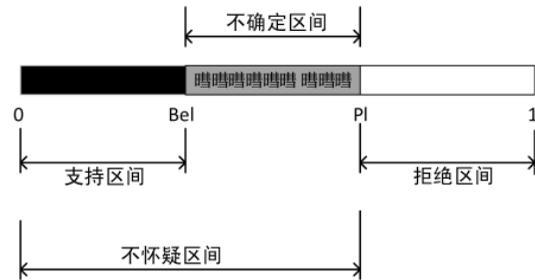


图 1 信息的不确定表示

D-S 证据理论合成规则也称证据合成公式, 其定义如下:

对于 $\forall A \subseteq \Theta$, Θ 上的两个 mass 函数为 m_1 和 m_2 的 D-S 证据理论合成规则为:

$$m_1 \oplus m_2(A) = \frac{1}{K} \sum_{B \cap C = A} m_1(B) \cdot m_2(C) \quad (13)$$

其中, K 为归一化常数:

$$K = \sum_{B \cap C = A} m_1(B) \cdot m_2(C) = 1 - \sum_{B \cap C = \phi} m_1(B) \cdot m_2(C) \quad (14)$$

按照上述规则, 可以将有限个独立的证据组合在一起。

3 TROIET 频谱感知算法

为了在融合中未知先验信息的情况下提高协作频谱感知性能, 本文基于 D-S 理论, 以改进的特征值比检测作为本地检测, 提出了一种新的频谱感知算法——TROIET。该算法的具体实现流程如下:

- (1) 次级用户 SU_i 以改进的特征值比检测作为本地检测, 得出基本可信任度 $m_i(H_0)$ 和 $m_i(H_1)$;
- (2) 计算出各自加权系数 w_i ;
- (3) 根据加权系数 w_i , 重新计算基本可信任度;
- (4) 次级用户 SU_i 发送基本可信任度给融合中心 FC;

(5)融合中心根据证据理论合成规则,进行数据融合;
 (6)融合中心 FC 根据判决策略进行判决,得出最终判决结果。

算法流程图如图 2 所示。

根据 D-S 证据理论,TROIET 频谱感知模型下识别框架可定义为 $\Phi=\{H_1, H_0, \Omega\}$,其中 Ω 表示次级用户检测结果对 H_1 或 H_0 假设为的不确定度。根据式(9),可得次级用户 SU_i 的基本概率赋值函数为:

$$H_1: m_i'(H_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{2}{LN(1+\sqrt{\alpha})^4}}} \int_{\psi}^{\infty} e^{-\frac{(x - (\frac{1}{(1+\sqrt{\alpha})^2}))^2}{LN(1+\sqrt{\alpha})^4}} dx \quad (15)$$

$$H_0: m_i'(H_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{2}{LN(1+\sqrt{\alpha})^4}}} \int_{-\infty}^{\psi} e^{-\frac{(x - (\frac{1}{(1+\sqrt{\alpha})^2}))^2}{LN(1+\sqrt{\alpha})^4}} dx \quad (16)$$

由于 SU_i 用户到主用户的距离位置不一样,在传输过程会受到不同程度的干扰,定义基本可信任度的加权系数 w_i 为:

$$w_i = \frac{d_i^{-4} \sigma^{-2}}{\sum_{i=1}^N d_i^{-4} \sigma^{-2}} \quad (17)$$

其中, d_i 为 SU_i 到 PU 的距离。

则:

$$m_i(H_1) = w_i m_i'(H_1) \quad (18)$$

$$m_i(H_0) = w_i m_i'(H_0) \quad (19)$$

$$m_i(\Omega) = 1 - m_i(H_1) - m_i(H_0) \quad (20)$$

在融合中心 FC,根据 D-S 证据理论合成规则可得:

$$m(H_1) = m_1(H_1) \oplus m_2(H_1) \oplus m_3(H_1) \oplus \dots \oplus m_N(H_1) \quad (21)$$

$$m(H_0) = m_1(H_0) \oplus m_2(H_0) \oplus m_3(H_0) \oplus \dots \oplus m_N(H_0) \quad (22)$$

融合中心根据最大概率分配函数法作为判决准则,将 $m(H_1)$ 、 $m(H_0)$ 与判决因子 γ 进行对比,得出最终结果,判决规则如下:

$$\begin{cases} H_0: m(H_1) < \gamma m(H_0) \\ H_1: m(H_1) \geq \gamma m(H_0) \end{cases} \quad (23)$$

在实际的应用中,判决因子 γ 根据实际的认知无线电系统的 P_f 和 P_d 的要求,设定合适值。

4 能效分析

TROIET 算法的能量消耗用能效性^[13] μ 表示。能效有效性定义为系统的平均吞吐量(信号传输的比特数)与平均能耗(感知过程和本地数据传输中消耗的平均能量)的比值,单位为 bit/J。由文献[14]中的能耗和吞吐量计算公式,可得 TROIET 算法的能效为:

$$\mu = \frac{P_0(1-P_f)RT}{2e_s + e_t(1-P_0P_f - P_1P_d)} \quad (24)$$

其中, P_0 为 PU 未占用频谱的概率, P_f 为虚警概率, P_d 为 PU 占用频谱的概率, R 和 T 分别是数据传输速率和时间, e_s 和 e_t 分别是 SU 在感知过程中和本地数据传输过程中的能耗。

5 仿真结果与分析

本节将从信噪比、虚警概率两个方面,将 TROIET 算法与以“AND”准则的特征值之比算法、以“OR”准则的特征值之比算法、文献[6]算法进行对比,同时将 4 种算法的仿真环境进行对比,进行 1 000 次 Monte Carlo 仿真。仿真环境由两个次级用户和一个主用户组成,采样点数为 512,信号采用 BPSK 调制。设 SU_1 到 PU 的距离为 0.5, SU_2 到 PU 的距离为 0.9。

图 3 是在采样点数为 2 048,虚警概率为 $P_f=0.01$,判决因子 $\gamma=2.5$,信噪比为 $-15 \text{ dB} \sim 0 \text{ dB}$ 情况下,TROIET 算法与以“AND”准则的特征值之比算法、以“OR”准则的特征值之比算法、文献[6]算法的对比。从图 3 可知,TROIET 算法的感知性能远远优于文献[6]的算法,并且

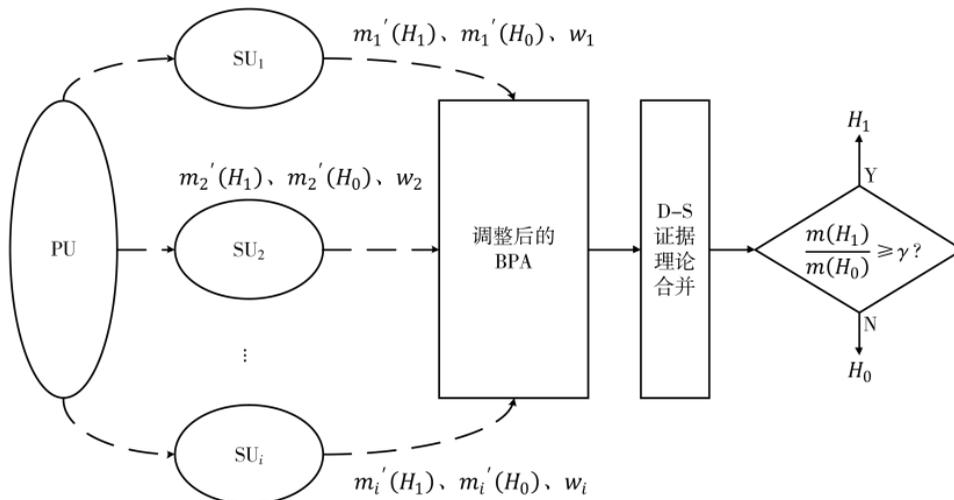


图 2 TROIET 频谱感知算法流程图

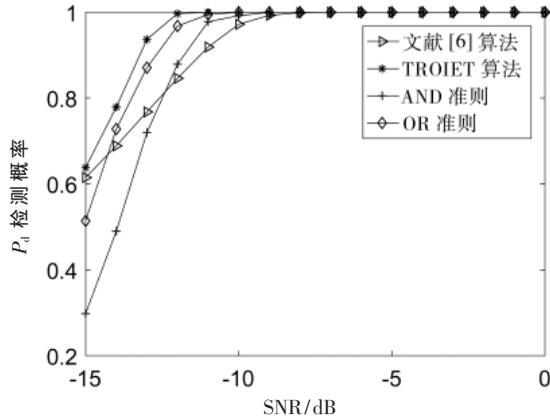


图3 不同信噪比下,4种算法的检测概率

随着信噪比的增大,感知性能效果越明显;TROIET算法整体上优于以“AND”准则的特征值之比算法和以“OR”准则的特征值之比算法,在低信噪比的情况下,感知性能更好。

图4是在信噪比为-15 dB时,不同虚警概率在0.01~1之间以0.1的速率变化,TROIET算法设置对应的判决因子 $\gamma=\{2.5 \ 1 \ 0.6 \ 0.3 \ 0.2 \ 0.16 \ 0.09 \ 0.04 \ 0.03 \ 0.03\}$ 情况下,TROIET算法与以“AND”准则的特征值之比算法、“OR”准则的特征值之比算法、文献[6]算法的对比。从图4可知,TROIET算法的感知性能远远优于以“AND”准则的特征值之比算法。TROIET算法整体上优于以“OR”准则的特征值之比算法、文献[6]算法,在虚警概率低于0.6时,TROIET算法相比于两种算法的感知性能大约提升了5%左右,当虚警概率大于0.6时,相对其他两种算法,TROIET算法的感知性能越来越好。

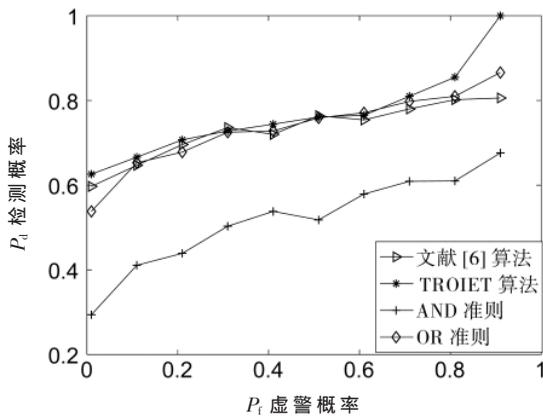


图4 不同虚警概率下,4种算法的检测概率

图5是在信噪比为-15 dB、不同虚警概率在0.01~1之间以0.1的速率变化时,次级用户 SU_i 将以30%的概率,遭受攻击强度为2的恶意攻击^[15]的情况下,TROIET算法与以“AND”准则的特征值之比算法、“OR”准则的特征值之比算法、文献[6]算法的对比。从图可知,TROIET算法的检测概率高于其他3种算法,并且随着虚警概率

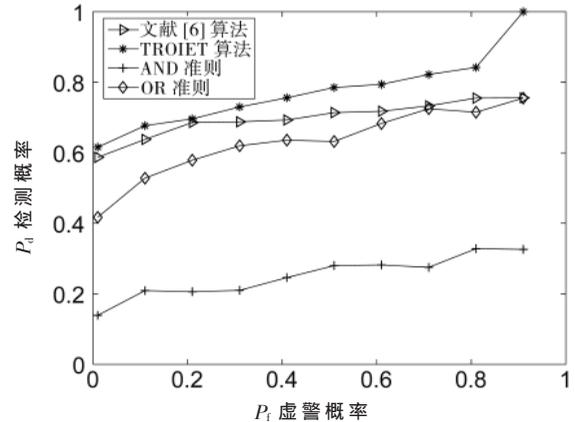


图5 不同虚警概率下,4种算法的受到恶意攻击的检测概率

的增加,对比于其他算法,TROIET算法的感知性能越来越好。由此可知,TROIET算法具有较高的安全性能。

图6给出了不同虚警概率和信噪比下,采样点数为2048时,TROIET算法能效比较。由图6可知,能效随着信噪比的增大而增大,达到最大值后不变,随着虚警概率 P_f 增大而减小。当虚警概率 P_f 为0.01时,TROIET算法能效可得到最大能效,为 8.584×10^4 bit/J。

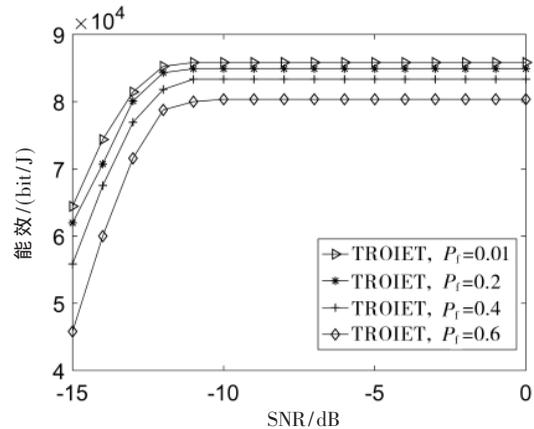


图6 不同虚警概率和信噪比下,TROIET算法能效比较

6 结论

本文提出了基于证据理论的特征值之比协作频谱感知算法。经过仿真分析,该算法与以传统的数据融合AND、OR准则频谱感知算法、文献[6]相比,具有良好的感知性能。在低信噪比、高虚警概率的环境下,有着明显的优势。该算法的融合中心是未知先验信息,进行数据融合,在一定程度上避免了用户恶意攻击,具有较高的安全性,同时具有较好的感知性能和较高能效,更加适合未来复杂无线的通信环境。

参考文献

- [1] HUSSAIN S, FERNANDO X. Spectrum sensing in cognitive radio networks: up-to-date techniques and future challenges[C]// Science and Technology for Humanity (TIC-STH), 2009 IEEE Toronto International Conference. IEEE, 2009.

- [2] SMRITI, CHHAGAN C. Double threshold-based energy detection spectrum sensing scheme by considering the sensing history in confusion region[C]//2018 5th International Conference on SPIN, 2018: 518-521.
- [3] DHANANJAYA S, YUVARAJU B N. A novel method in matched filter spectrum sensing to minimize interference from compromised secondary users of cognitive radio networks[C]//2018 International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer, and Optimization Techniques(ICEECCOT). IEEE, 2020.
- [4] GHOSH D, BAGCHI S. Cyclostationary feature detection based spectrum sensing technique of cognitive radio in nakagami-m fading environment[C]//Computational Intelligence in Data Mining-Volume 2, 2015.
- [5] Peng Qihang, Zeng Kun, Wang Jun, et al. A distributed spectrum sensing scheme based on credibility and evidence theory in cognitive radio context[C]//IEEE International Symposium on Personal. IEEE, 2006.
- [6] GOHAIN P B, CHAUDHARI S, KOIVUNEN V. Evidence theory based cooperative energy detection under noise uncertainty[C]//GLOBECOM 2017-2017 IEEE Global Communications Conference. IEEE, 2017.
- [7] ZENG Y, LIANG Y C. Maximum-minimum eigenvalue detection for cognitive radio[C]//IEEE International Symposium on Personal. IEEE, 2007.
- [8] 王颖喜, 卢光跃. 基于最大最小特征值之差的频谱感知技术研究[J]. 电子与信息学报, 2010(11): 2571-2575.
- [9] 徐家品, 杨智. 基于随机矩阵特征值比的频谱感知改进算法[J]. 电波科学学报, 2015, 30(2): 282-288.
- [10] TULINO A M, VERDÚ S. Random matrix theory and wireless communications[J]. Communications and Information Theory, 2004, 1(1): 1-182.
- [11] DEMPSTER A P. Upper and lower probabilities induced by a multivalued mapping[J]. Annals of Mathematical Stats, 1967, 38(2): 325-339.
- [12] SHAFER G. A mathematical theory of evidence[J]. Technometrics, 1976, 20(1): 106.
- [13] ERYIGIT S, GUR G, BAYHAN S, et al. Energy efficiency is a subtle concept: fundamental trade-offs for cognitive radio networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(7): 30-36.
- [14] 王云川, 许晓荣, 姚英彪, 等. 一种能效优先的认知无线电模仿主用户攻击防御策略设计与性能分析[J]. 电信科学, 2017, 33(8): 100-106.
- [15] 张平, 李建武, 冯志勇, 等. 认知无线网络基础理论与关键技术研究[J]. 电信科学, 2014(2): 1-13.

(收稿日期: 2020-11-19)

作者简介:

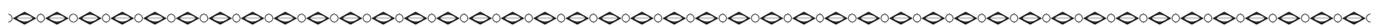
石新(1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 信息与信号处理、无线通信等。

刘顺兰(1965-), 女, 教授, 主要研究方向: 信息与信号处理、无线通信等。

张无际(1995-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 信息与信号处理、无线通信等。



扫码下载电子文档



(上接第 45 页)

- 2018, 5(2): 167-169.
- [7] 张静. LTE 核心加密算法 SNOW 3G 的安全分析[J]. 信息通信, 2016(1): 208-209.
- [8] 高家奇, 李斌勇, 廖怀凯, 等. 高级加密 AES 算法研究及性能分析[J]. 网络安全技术与应用, 2019, 226(10): 31-33.
- [9] 姚思, 陈杰. SM4 算法的一种新型白盒实现[J]. 密码学报, 2020, 7(3): 358-374.
- [10] 谢端强, 李恒, 李瑞林, 等. 对 Sosemanuk 算法改进的猜测决定攻击[J]. 国防科技大学学报, 2012, 34(6): 79-83.
- [11] 刘鹏焜, 陈恭亮, 李建华. Trivium 算法在随机访问条件下的应用研究[J]. 通信技术, 2017, 50(1): 133-139.
- [12] 王超, 温涛, 段冉阳. NIST 随机性检测方法研究[J]. 信息技术与网络安全, 2018, 37(11): 5-8, 15.
- [13] 邹祎. SPSS 软件单因素方差分析的应用[J]. 价值工程, 2016, 35(34): 219-222.
- [14] 王超, 范国浩, 付宝仁. ZUC 算法随机性检测研究[J]. 信息技术与网络安全, 2018, 37(11): 9-11, 15.
- [15] Fan Yutao, Su Guiping. A new testing method of randomness for true random sequences[C]//2014 IEEE 5th International Conference on Software Engineering and Service Science, Beijing, 2014: 537-540.

(收稿日期: 2021-01-25)

作者简介:

朱玉倩(1994-), 通信作者, 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 信息安全, E-mail: zhuyuan18@mails.ucas.ac.cn.

王超(1982-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向: 密码学、统计学。

张艳(1990-), 女, 本科, 助理工程师, 主要研究方向: 信息安全。



扫码下载电子文档

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所