

改进自适应双门限协作频谱感知算法

王京 于山山 刘 璐

(山东大学信息科学与工程学院, 青岛, 266237)

摘 要: 频谱感知是认知无线电领域的关键技术之一, 得到了众多学者广泛深入的研究。在低信噪比情况下, 传统双门限算法阈值门限固定不变导致检测效果较差, 针对该问题, 提出一种自适应双门限协作频谱感知算法, 通过计算各节点信噪比得到权值, 调整判决门限, 将当前判决结果与前后时刻充分联系, 融合各节点判决信息得到最终判决结果, 理论分析和仿真结果表明, 相较于传统双门限和加权双门限检测算法, 本文提出的算法具有更好的检测效果。

关键词: 频谱感知; 能量检测; 自适应双门限

中图分类号: TN911 **文献标志码:** A

Improved Adaptive Double-Threshold Cooperative Spectrum Sensing Algorithm

Wang Jing, Yu Shanshan, Liu Jü

(School of Information Science and Engineering, Shandong University, Qingdao, 266237, China)

Abstract: As one of the key technologies of cognitive radio, spectrum sensing is extensively and deeply studied. In the case of low SNR environment, the threshold of traditional double threshold method is fixed, which leads to poor perception effect. To solve the problem, an adaptive double-threshold cooperative spectrum sensing algorithm is proposed. The weight is obtained by calculating the SNR of each node. The weights are obtained. The decision threshold is adjusted, and the current judgment result is fully correlated with the time before and after, and the final decision result is obtained by fusing the decision information of each node. The results of theoretical analysis and Monte-Carlo simulation show that the algorithm can effectively improve the spectrum sensing performance compared with the traditional double threshold detection algorithm and the weighted double threshold detection algorithm.

Key words: spectrum sensing; energy detection; adaptive double threshold

引 言

随着无线通信技术的快速发展, 频谱资源需求急剧增加, 相关研究表明, 授权频段的频谱利用率仅为 15%~85%^[1-4]。基于此背景, 认知无线电(Cognitive radio, CR)应运而生^[5-6], 频谱感知是认知无线电的核心技术, 能量检测^[7-9]是频谱感知中一种可靠的非相关信号检测技术, 具有无需先验信息和感知速度快等特点。其不足是在低信噪比情况下, 易受到噪声不确定性的影响。

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0803400)资助项目。

收稿日期: 2019-06-20; **修订日期:** 2019-09-24

目前,国内外对于能量检测算法已有较多研究。文献[10]提出一种基于快速傅里叶变换的能量检测算法,通过采用窗函数,保留有用频谱信息,提高检测概率。文献[11]提出了一种协作式频谱感知方法,利用极短时间内信号不变的性质,各节点将当前检测结果与前一时刻检测结果进行联系,提高检测概率。文献[12]提出了一种基于噪声不确定度的自适应单门限能量检测算法,根据噪声不确定度计算自适应阈值,提高检测概率。文献[13]提出一种双门限信噪比加权检测方法,根据各检测节点信噪比,计算权重,由中心节点根据一定融合规则和权重大小进行判决。

综上所述,在低信噪比情况下,传统双门限及加权双门限检测方法门限值固定不变,缺乏灵活性,且感知结果未考虑与下一次的联系,基于以上两点不足,本文提出了一种自适应双门限协作频谱感知算法,创新点有两个方面:(1)在原有双门限检测的基础上,加入信噪比加权系数,判决门限依据加权系数进行自适应调整;(2)利用信号在较短判决时间内前后无较大变化的特性,将当前判决结果与前后时刻充分联系,提高检测概率。

1 系统模型

能量检测算法原理可表示为一个二元假设过程,输入时域信号 $y(t)$,经滤波、A/D转换后,对采样值求模、取平方,再进行求和得到检测统计量,最后与门限值进行比较,得到当前频谱是否被用户占用,如图1所示。



图1 能量检测原理图

Fig.1 Schematic diagram of energy detection

能量检测算法根据认知用户收到的信号能量统计值建立模型,可表示为

$$Y(n) = \begin{cases} \omega(n) & H_0 \\ s(n) + \omega(n) & H_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $s(n)$ 为授权用户信号, $\omega(n)$ 为信道噪声, $Y(n)$ 为认知节点接收的信号, H_0 表示信道空闲, H_1 表示信道被用户占用, N 为检测采样点数,则能量统计值 E 可表示为

$$E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n [Y(n)]^2 \quad (2)$$

双门限能量检测算法的基本思想是通过检测采样信号统计能量值与判决门限值比较作出判决,假设 λ_H 和 λ_L 分别为高低判决门限,其判决规则为

$$Y = \begin{cases} H_0 & E \leq \lambda_L \\ H_1 & E \geq \lambda_H \\ \text{暂不判决} & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

假设信道环境为 AWGN,当采样点数较大时,能量统计值可近似服从式(4)所示的高斯分布^[14],即

$$\begin{cases} H_0: E \sim N\left(\sigma_\omega^2, \frac{2}{N} \sigma_\omega^4\right) \\ H_1: E \sim N\left(\sigma_s^2 + \sigma_\omega^2, \frac{2}{N} (\sigma_s^2 + \sigma_\omega^2)^2\right) \end{cases} \quad (4)$$

式中: σ_ω^2 为噪声方差, σ_s^2 为主用户信号平均功率,由式(4)可以得到对应的虚警概率 P_f 和检测概率 P_d 分别为

$$P_f = P\{Y_{ed} > \lambda_H | H_0\} = Q\left(\frac{\lambda_H - N\sigma_\omega^2}{\sqrt{2N\sigma_\omega^4}}\right) \quad (5)$$

$$P_d = P\{Y_{ed} > \lambda_H | H_1\} = Q\left(\frac{\lambda_H - N(\sigma_\omega^2 + \sigma_s^2)}{\sqrt{2N(\sigma_\omega^2 + \sigma_s^2)^2}}\right) \quad (6)$$

式中: Q 为标准高斯互补累积分布函数, 虚警概率 P_f 为信道空闲时, 判定为有用户存在即状态为 H_1 的概率, 检测概率 P_d 为有用户存在时, 判定为有用户存在状态为 H_1 的概率。

基于文献[15], 信号在实际传输过程中, 噪声不是理想的高斯白噪声, 而是在一定范围内持续波动, 假设噪声的不确定度为 α , 取值范围为 $1 < \alpha < \infty$, 估计噪声功率为 $\hat{\sigma}_\omega^2$, 变化幅度可由不确定度来表示, 即 $\hat{\sigma}_\omega^2 \in (\frac{\sigma_\omega^2}{\alpha}, \alpha\sigma_\omega^2)$, 设参数 $\rho = \frac{\hat{\sigma}_\omega^2}{\sigma_\omega^2}$, 则检测的双门限为

$$\lambda_L = [\sqrt{2N} Q^{-1}(P_f) + N] \frac{\sigma_\omega^2}{\rho} \quad (7)$$

$$\lambda_H = [\sqrt{2N} Q^{-1}(P_f) + N] \rho\sigma_\omega^2 \quad (8)$$

2 检测算法

传统的双门限协作频谱检测方法是将能量值与两个固定判决门限进行比较, 若能量大于较高的判决门限, 则判决用户存在, 小于较低的判决门限, 则判定用户不存在, 若处于中间阈值内, 则暂不判决。本文提出的算法有效解决了判决门限固定不变和能量统计值处于中间阈值时检测效果较差的问题。

为体现本文算法的有效性, 排除各认知节点之间的差异, 假设每个认知节点的工作参数在一定时间内不变且相同, 在单节点单次检测的情况下, 算法流程如图2所示。

(1) 根据式(8,9), 通过单用户的虚警概率及噪声不确定度求出单用户判决门限 λ_L 和 λ_H , 此时每个用户的判决门限都相同。

(2) 各认知节点将接收信号信噪比发至融合中心, 由融合中心根据各用户的信噪比计算出权重因子

$$\omega_i = \frac{\text{SNR}_i}{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \text{SNR}_i} \quad (9)$$

式中 ω_i 为第 i 个认知用户的权重因子, M 为认知用户数, SNR_i 为各个认知用户接收信号的信噪比。

(3) 根据式(10)计算的权重因子, 各认知用户通过权重因子自适应调整自身判决门限, 提高可信度, 即

$$\lambda_{L,i} = \frac{\lambda_L}{\omega_i} \quad (10)$$

$$\lambda_{H,i} = \frac{\lambda_H}{\omega_i} \quad (11)$$

(4) 各认知用户通过式(2)得到能量统计值 E , 并将收集到的能量与自身判决门限进行比较, 若高于

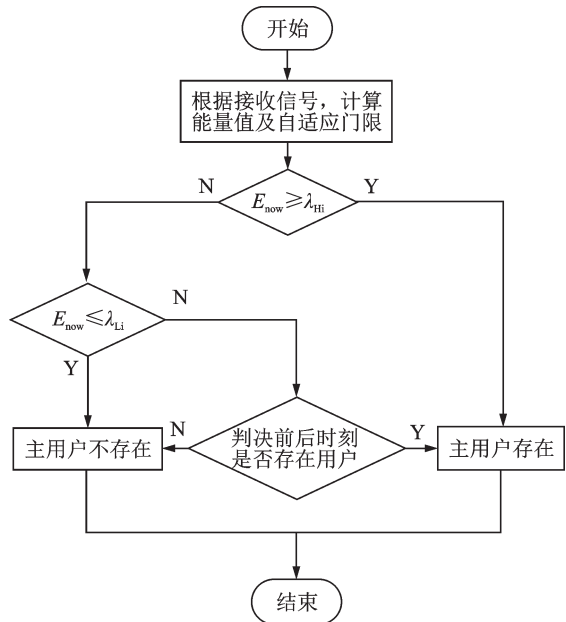


图2 单节点单次检测流程图
Fig.2 Single node single detection flow chart

λ_{Hi} , 则判定为有主用户存在, 若低于 λ_{Li} , 则判定为信道空闲, 若处于两个门限值之间, 则将上一次的判决结果作为当前的判决结果, 若上一次也处于两个门限值之间, 则将下一次的判决结果作为当前的判决结果。单认知用户检测情况下, 在一次判决期内, 给定初始虚警概率, 可得

$$P_{di} = P\{E_{\text{now}} > \lambda_{Hi} | H_1\} + P\{\lambda_{Li} < E_{\text{now}} < \lambda_{Hi} | H_1\} * \left(P\{E_{\text{pre}} > \lambda_{Hi} | H_1\} + P\{\lambda_{Li} < E_{\text{now}} < \lambda_{Hi} | H_1\} * P\{E_{\text{aft}} > \lambda_{Hi} | H_1\} \right) \quad (12)$$

式中: $E_{\text{now}}, E_{\text{pre}}, E_{\text{aft}}$ 分别为当前、上一次和下一次的能量统计值, P_{di} 为各认知节点的检测概率, 结合式(6)可得

$$P_{di} = Q\left(\frac{\lambda_{Hi} - N(\sigma_w^2 + \sigma_s^2)}{\sqrt{2N(\sigma_w^2 + \sigma_s^2)^2}}\right) * \left\{ \left[1 + Q\left(\frac{\lambda_{Li} - N(\sigma_w^2 + \sigma_s^2)}{\sqrt{2N(\sigma_w^2 + \sigma_s^2)^2}}\right) - Q\left(\frac{\lambda_{Hi} - N(\sigma_w^2 + \sigma_s^2)}{\sqrt{2N(\sigma_w^2 + \sigma_s^2)^2}}\right) \right] + \left[Q\left(\frac{\lambda_{Li} - N(\sigma_w^2 + \sigma_s^2)}{\sqrt{2N(\sigma_w^2 + \sigma_s^2)^2}}\right) - Q\left(\frac{\lambda_{Hi} - N(\sigma_w^2 + \sigma_s^2)}{\sqrt{2N(\sigma_w^2 + \sigma_s^2)^2}}\right) \right]^2 \right\} \quad (13)$$

同理, 结合式(5), 可得每个认知节点的虚警概率为

$$P_{fi} = Q\left(\frac{\lambda_{fi} - N\sigma_w^2}{\sqrt{2N\sigma_w^4}}\right) * \left\{ \left[1 + Q\left(\frac{\lambda_{Li} - N\sigma_w^2}{\sqrt{2N\sigma_w^4}}\right) - Q\left(\frac{\lambda_{Hi} - N\sigma_w^2}{\sqrt{2N\sigma_w^4}}\right) \right] + \left[Q\left(\frac{\lambda_{Li} - N\sigma_w^2}{\sqrt{2N\sigma_w^4}}\right) - Q\left(\frac{\lambda_{Hi} - N\sigma_w^2}{\sqrt{2N\sigma_w^4}}\right) \right]^2 \right\} \quad (14)$$

(5)各认知节点将判决结果发往中心节点, 采用“或”准则判决, 即当有一个节点检测到信号时就判决为有用户存在, 检测概率为

$$P_d = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_{di}) \quad (15)$$

3 仿真及性能分析

为验证算法的有效性, 采用蒙特卡洛方法在 MATLAB 上进行仿真分析, 仿真次数为 1000, 在 AWGN 信道模型下, 信噪比 SNR 取值范围 $-20 \sim 10$ dB, 噪声方差 σ_w^2 为 1, 噪声不确定度 α 设置为 2, 虚警概率 P_f 设置为 0.05, 检测用户数 M 设置为 5, 在不同信噪比情况下, 将本文算法与传统双门限和加权双门限检测算法进行比较, 正确检测概率分布情况如图 3 所示。从图 3 中可以看出, 当信噪比为 -6 dB 时, 本文所提算法检测概率接近 1, 而传统双门限算法和加权双门限算法需要信噪比达到 2 dB 时, 检测概率才能接近 1, 当信噪比在 -11 dB 时, 本文所提算法相较于另外两种算法具有最大的差值, 算法优势最明显。加权双门限算法根据信噪比为每个各认知用户分配了不同的权重因子, 该算法仅根据权重因子来提高检测结果的信任度, 并没有对判决门限进行处理, 本文所提算法使每个认知用户根据其信噪比大小, 自适应调整其判决门限, 进而对算法进行了改进。

图 4 为相较于图 3, 在相同虚警概率条件下, 检测用户数改变为 10 的各算法检测性能比较, 由于信号在实际传输过程中受多径效应和阴影衰落的影响, 使得各认知节点接收信号信噪比差异较大, 采用更多认知节点可有效克服环境影响, 提高系统检测性能。

图 5 和图 6 分别为在信噪比 SNR = -13 dB 和 SNR = -10 dB 条件下, 多用户协作检测概率随虚警概率变化的曲线。从图中可得信噪比越高, 检测概率越高, 在信噪比一定的条件下, 检测概率随虚警概

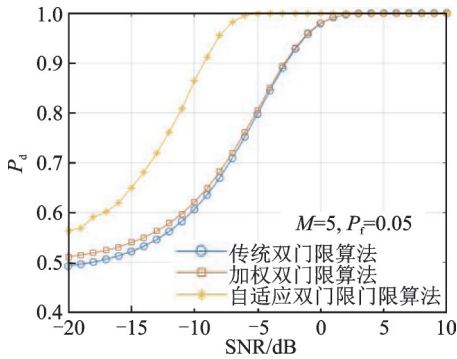


图3 检测算法性能比较($M=5, P_f=0.05$)

Fig.3 Performance comparison of detection algorithms

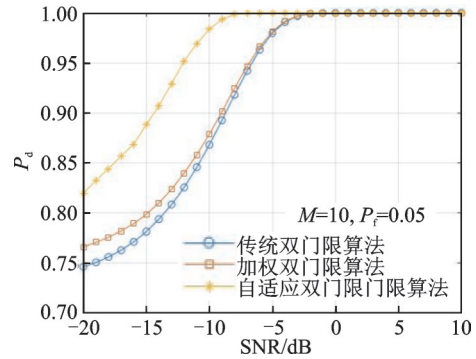


图4 检测算法性能比较($M=10, P_f=0.05$)

Fig.4 Performance comparison of detection algorithms

率的增加而增加,在同一虚警概率条件下,本文所提算法优于传统双门限和加权双门限检测算法,可保证在较低虚警概率条件下得到更高的检测概率。

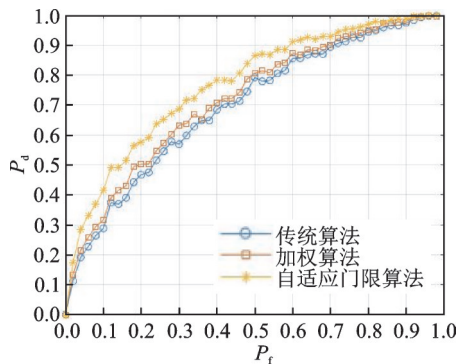


图5 检测算法性能比较($SNR=-13\text{ dB}$)

Fig.5 Performance comparison of detection algorithms ($SNR=-13\text{ dB}$)

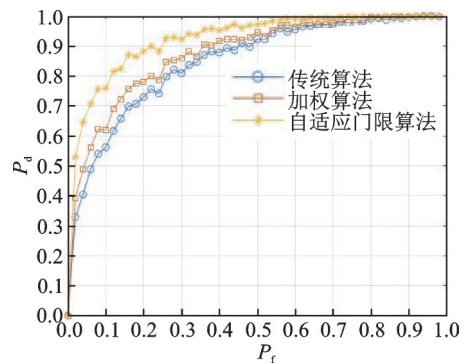


图6 检测算法性能比较($SNR=-10\text{ dB}$)

Fig.6 Performance comparison of detection algorithms ($SNR=-10\text{ dB}$)

4 结束语

本文提出一种自适应双门限能量检测协作频谱感知算法,双门限的判决门限可根据信噪比加权系数改变,利用信号在短时间内的不变性,将当前感知结果与前后时刻紧密联系起来,将各认知节点的判决结果发至中心节点得到最终判决,通过MATLAB仿真得到不同虚警概率和不同数量认知节点的情况下,检测概率和信噪比的关系。结果表明该算法相较于传统双门限和加权双门限检测算法,在较低信噪比的情况下具有更高的检测概率,可显著提高频谱感知性能。

参考文献:

- [1] Kolodzy P. Spectrum policy task force report[J]. FCC ET Docket, 2002, 40(4): 147-158.
- [2] Yang Jing. Spatial channel characterization for cognitive radios[D]. Berkeley: University of California, 2004: 3-9.
- [3] Zhao Qing, Sadler B M. A survey on dynamic spectrum access: Signal processing, networking, and regulatory policy[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2007, 24(3): 79-89.
- [4] Liu Xin, Jia Min, Na Zhenyu, et al. Muti-modal cooperative spectrum sensing based on dempster-shafer fusion in 5G-based

- cognitive radio[J]. IEEE Access, 2018, 6(99): 199-208.
- [5] Mitola J, Maguire G Q. Cognitive radio: Making software radios more personal [J]. IEEE Personal Communications, 1999, 6(4): 13-18.
- [6] Zhou Xiaofei, Zhang Honggang. Application and principle of cognitive radio[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2007: 1-13.
- [7] Nnikrishnan J, Veeravalli V V. Cooperative sensing for primary detection in cognitive radio[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2008, 2(1): 18-27.
- [8] Fadel F. D, Mohamed-Slim A, Marvin K S. On the energy detection of unknown signals over fading channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 2007, 55(1): 21-24.
- [9] Yu Guicai, Long Chengzhi, Xiang Mantian. A novel energy detection scheme based on dynamic threshold in cognitive radio Systems[J]. Journal of Computational Information Systems, 2012, 8(6): 2245-2252.
- [10] Ohta M, Takyu O, Fujii T, et al. Novel two-stage spectrum sensing for energy detection with FFT[C]// 2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops. Doha, Qatar: IEEE, 2016: 346-350.
- [11] Smriti C C. Double threshold based cooperative spectrum sensing with consideration of history of sensing nodes in cognitive radio networks[C]// 2nd International Conference on Power, Energy and Environment: Towards Smart Technology. Providence. Shillong, India: IEEE, 2018: 1-9.
- [12] Abdelhak N, Abdelkrim H, Toufik B. Energy detection with adaptive threshold for cognitive radio[C]// 2018 International Conference on Communications and Electrical Engineering. El Oued, Algeria: IEEE, 2018: 1-5.
- [13] Animesh K S, Anupama S, Nandakumar S. Improved adaptive cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks[C]// 2nd International Conference on Electronics. Kolkata, India: Materials Engineering & Nano-Technology, 2018: 1-5.
- [14] Zhang Lingling, Huang Jianguo, Tang Chengkai. Novel energy detection scheme in cognitive radio[C]// 2011 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing. Xi'an, China: IEEE, 2011: 1-4.
- [15] Sun Mengwei, Zhao Chenglin, Su Yan, et al. A novel spectrum for cognitive radio networks with noise uncertainty[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(5): 4424-4429.

作者简介:



王京(1991-),男,硕士研究生,研究方向:认知无线电,频谱感知,E-mail: 641599608@qq.com。



于山山(1981-),男,博士研究生,研究方向:D2D通信,物理层安全及协作通信。



刘琚(1965-),男,博士,教授,研究方向:无线通信中空时信号处理技术,盲信号处理理论与应用,多媒体通信与网络传输技术。

(编辑:陈璐)