

动态阈值的双门限协作感知方法^①

张海俊, 黄刘生, 徐宏力

(中国科学技术大学 计算机科学与技术学院, 合肥 230026)

摘要: 随着通信技术的提高和通信应用的增多, 无线频谱资源越来越匮乏. 许多分配到资源的主用户利用率很低, 认知无线电技术希望没有分配到资源的次用户合理使用主用户频谱来提高频谱的利用率. 频谱感知技术关系到认知无线电中次用户对空闲频谱的使用机会, 是认知无线电的关键技术之一. 就是在已有的感知技术的基础上, 提出了新的感知手段. 在认知无线网络中, 不同的次用户由于与主用户距离以及自身所处环境的噪声影响不同, 它们的信噪比一般是不一样的. 这里采用的动态阈值的双门限协作感知方法, 是对传统双门限能量感知方法的改进, 通过充分考虑次用户之间的差异性来提高感知的性能. 首先, 根据对检测和虚警概率的要求, 过滤掉一部分检测能力不满足条件的次用户. 同时, 每个次用户的用于能量感知的双门限会根据它们各自信噪比的不同而动态变化. 通过与单门限能量感知以及传统双门限能量感知方法进行比较, 可以看出本文提出的感知方法一定程度上提高了系统整体感知的性能.

关键词: 认知无线电; 能量感知; 动态阈值; 双门限

Dynamic Dual-Threshold Cooperative Spectrum Sensing Method

ZHANG Hai-Jun, HUANG Liu-Sheng, XU Hong-Li

(School of Computer Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: With the improving of the communication technology and the increasing of the applications, the wireless spectrum resource becomes more and more scarce. The resources utilization rate of the primary users who has been assigned resources is low. The cognitive radio technology hope to improve spectrum utilization in a way that the second users use the the primary users' resource. Spectrum sensing is a key technology of the cognitive radio. This article is based on the existing sensing technology, and put forward a new sensing mean. In cognitive radio network, the respective signal to noise of second users are not same because that their distance to the first user and their own signal environments are different. The dynamic dual-threshold cooperative spectrum sensing method is an improvement over the traditional two-threshold energy-aware approach. It improve the sensing performance by fully considering the difference between the secondary users. It has several steps. First of all, it need to filter out some second users that do not meet the conditions, such as, the probability of detection and false alarm. Then, each second user will dynamic change its dual-threshold which is used for energy detection according to its SNR. Through comparing with the single threshold energy-aware cooperative spectrum sensing method and the traditional dual-threshold cooperative spectrum sensing method, we can find that our method has a better performance on improving the overall performance of the system than both of other two methods.

Key words: cognitive radio; energy detect; dynamic threshold; dual-threshold

1 概述

近几年, 随着无线通信技术的不断提高以及无线

通信应用的不断发展, 尤其是现在 WiFi 和 NFC 技术的大量使用, 对无线频谱资源的需求越来越大. 但是

^① 基金项目: 国家重大专项(2012ZX03005009); 苏州市工业基础项目(SYG201302)

收稿时间: 2015-02-11; 收到修改稿时间: 2015-04-15

众所周知,无线频谱资源的数量是有限的,资源匮乏问题越来越突出.为了解决这个问题,如何有效的提高现有资源的利用率,降低频谱稀缺带来的各种问题成为了研究的一个重点方面,认知无线电技术^[1]就是在这样的背景下产生的.已经分配到频谱资源的法定使用者(主用户)对这些资源的利用率是不同的,有些用户的利用率非常的低下.认知无线电希望通过通过相关的技术手段使用这些利用率比较低的频谱资源,在这些频谱空闲的时间段提供给其他的非法定用户(次用户)使用.

频谱感知的技术是认知无线电最关键的技术之一,有效的感知技术可以让次用户得到更多的对空闲频谱的使用机会.比较典型的频谱感知的算法^[2,3]包括有匹配滤波检测算法,周期平稳特征检测算法以及能量检测算法等.能量检测算法由于算法简单及需要较少的先验信息,所以经常被使用.针对在复杂环境中使用时,可能出现的路径衰落、隐终端、噪声不确定等问题,文献[2-4]提到了多用户协作的感知方法,该方法利用多个用户所处环境的不同,使用它们之间的差异性可以十分明显降低衰落和隐终端等问题,并有效的提高感知性能.

在能量感知算法^[5,6]中,传统方式是通过次用户把多次感知的能量信息通过一系列处理融合后与既定阈值进行比较来判断当前检测的频谱是否有用户使用.对于单门限的感知方法,当用户的能量感知结果与门限很接近时,简单的阈值判断的感知性能一般.因此,文章^[7-10]提出了双门限的能量感知算法,通过设定两个门限值,将一部分处于两个门限之间的模糊区域的感知能量的判断延迟来提高感知的性能.双门限感知方法通过对模糊区域感知结果的进一步处理,感知性能比普通的单门限感知方法更好,成为了感知方法研究中的重点.但是,普通双门限能量感知方法并没有利用到感知次用户之间由于环境不同等因素造成的信噪比之间的差异性,在确定每个次用户的感知门限时也没有考虑到差异性,这样会导致部分次用户由于本身信噪比过低,在同样的感知门限下,感知性能不好.

本文在上述传统双门限感知方法的基础上,提出了一种动态阈值的双门限协作感知算法,通过使用过滤技术把检测精度不满足要求的次用户过滤掉以及把参与感知的次用户之间的差异性加入到感知的过程中,来提高感知的性能.本文主要贡献是将传统双门限能

量感知方法与用户的差异性结合起来研究对感知性能的影响;同时,通过设定次用户的检测概率和虚警概率,确定次用户需要满足的信噪比最小值,从而来过滤掉一部分不满足要求次用户.

2 能量检测算法

2.1 单用户单门限能量检测方法

传统的能量检测算法中,次用户单独根据采样得到的能量值与既定的阈值比较做出判断,通常用‘0’表示当前信道的检测结果是空闲,‘1’表示当前信道的检测结果是忙碌,二元假设如下^[12]:

$$x(t) = \begin{cases} n(t) & H_0 \\ n(t) + h \cdot s(t) & H_1 \end{cases} \quad (1)$$

其中, $x(t)$ 表示次用户检测到的信号大小, $n(t)$ 表示噪声信号的大小,这里使用 AWGN 的噪声信道, $s(t)$ 表示主用户的信号量大小, h 表示信道的增益. H_0 表示当前检测信道空闲, H_1 表示当前检测信道被主用户占用.

文献[3]指出,次用户用于判断的平均能量值为

$$X = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x(i)|^2 \quad (2)$$

其中, N 为采样数,其他同前面定义一样.

文献[11]指出,在采样数 N 满足一定条件($N > 100$)时,由中心极限定理可知, X 近似服从高斯分布.在 AWGN 信道下,可以得到次用户的检测概率 P_d , 虚警概率 P_f 和漏警概率 P_m 如下:

$$P_d = P(X > \lambda | H_0) = Q\left(\frac{\lambda}{\sigma_u^2} - \gamma - 1\right) \sqrt{\frac{N}{2\lambda + 1}} \quad (3)$$

$$P_f = P(X > \lambda | H_0) = Q\left(\frac{\lambda}{\sigma_u^2} - 1\right) \sqrt{N} \quad (4)$$

$$P_m = P(X < \lambda | H_1) = 1 - P_d \quad (5)$$

其中, N 为次用户的采样数, $Q(x)$ 为正态高斯补偿函数, σ_u^2 表示噪声的能量大小, γ 表示信噪比

($\gamma = 10 \log_{10} \frac{\sigma_s^2}{\sigma_u^2}$), λ 表示能量判决的门限;由式(4)

可知,在给定 P_f 的前提下,可以得到门限表示如下:

$$\lambda = \left(\sqrt{\frac{1}{N}} Q^{-1}(P_f) + 1 \right) \sigma_u^2 \quad (6)$$

2.2 多用户协作感知方法

在进行协作感知时,网络中有信息融合节点,该节点主要是来完成对各个次用户节点的感知信息的融合,做出最后的判决.一个典型的协作的感知网络模

型如图 1。信息的融合方式分为硬融合和软融合，软融合是指各次用户把感知的能量信息上报给融合中心进行融合判决，硬融合是指各次用户在单独做出一个结果的 0/1 判决后，通过控制通道报告给信息融合中心进行最终的判决。

在单门限的能量检测方法下，如果使用硬融合手段，首先，每个感知用户会根据感知信息得到相应的 0/1 判决结果，然后，各个用户会把得到的这些信息通过控制信道传送到融合中心。由融合中心进行结果的融合，融合中心常用的硬融合方法有 OR 准则，AND 准则和多数原则^[2,3]。

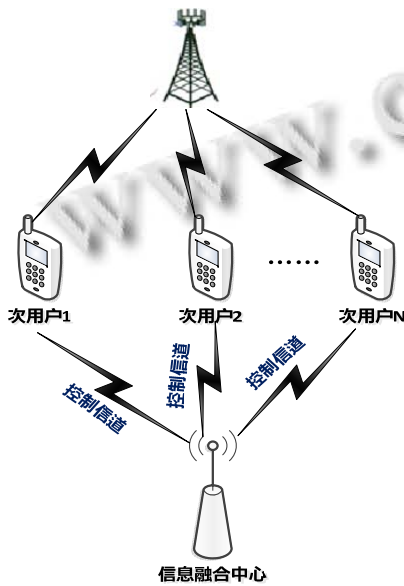


图 1 用户协作感知模型图

这里假设使用 OR 准则，在 OR 准则下，整体的感知性能如下^[11]：

$$P_d = 1 - \prod_{i=1}^M (1 - P_{d,i}) \tag{7}$$

$$P_f = 1 - \prod_{i=1}^M (1 - P_{f,i}) \tag{8}$$

其中， $P_{d,i}$ 和 $P_{f,i}$ 分别表示第 i 个用户的检测概率和虚警概率。

当有 M 个次用户无法单独做出感知判断，需要将感知得到的能量信息传递到融合中心后进行软融合判断，此时，由文献[12]可知检测概率 $P_{D,M}$ 和虚警概率 $P_{F,M}$ 表示如下：

$$P_{D,M} = Q\left(\frac{\lambda - \sum_{i=1}^M \omega_i \sigma_u^2 (\gamma_i + 1)}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^M \omega_i^2 \sigma_u^4 (2r_i + 1)}}\right) \tag{9}$$

$$P_{F,M} = Q\left(\frac{\lambda - \sum_{i=1}^M \omega_i \sigma_u^2}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^M \omega_i^2 \sigma_u^2}}\right) \tag{10}$$

3 动态阈值的双门限能量检测

3.1 精度不高的协作次用户过滤

在实际的应用环境中，用户所处的网络环境可能比较复杂，有些用户会因为多径效应和隐终端等问题导致它们的检测精度过低，这些用户如果被选择进行最后的协作感知，会导致整体的感知性能下降。所以，需要在选择用户进行协作感知时，先进行用户的过滤，由文献[11]可知，用户的 SNR 越大，感知的性能越好，因此，为了达到感知精度的要求，只需要设定一个最低的 SNR 值，当次用户的 SNR 不满足最低要求时，不允许它们参与协作感知。

由式(6)可知，给定一个虚警概率，可以得到的相应的判决门限，因此，可以通过设定一个最低的检测概率来计算 SNR 的阈值，即

$$P_d |_{r=r_{\min}} \geq P_{d\min} \tag{11}$$

其中， r_{\min} 就是 SNR 的阈值，信息融合中心将 r_{\min} 下发到各次用户，如果次用户的 SNR 大于该阈值，该用户参与协作过程，否则，该用户不参与协作。

3.2 普通双门限能量检测

双门限能量感知算法是在传统能量感知算法[7]的基础上提出的改进算法，双门限感知算法的感知模型如图 2。

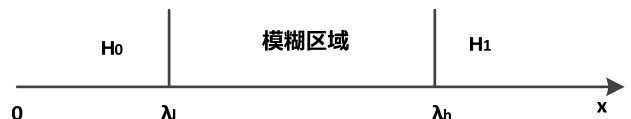


图 2 双门限能量感知模型

当次用户感知获得的能量在 λ_l 和 λ_h 之间时，表示当前次用户无法做出精确度符合条件的判断，需要上报到融合中心，通过软融合的方式来获得判断。次用户根据感知结果进行判决的结果如下：

$$Y_i = \begin{cases} 0 & X_i < \lambda_l \\ X_i & \lambda_l < X_i < \lambda_h \\ 1 & X_i > \lambda_h \end{cases} \tag{12}$$

为了计算的方便, 假设在 H_0 和 H_1 的情况下, 次用户感知结果落入不确定区域的概率分别为 $\Delta_{0,i}$ 和 $\Delta_{1,i}$, 表示如下^[7]:

$$\Delta_{0,i} = P_{f,i} - P_{d,i} \quad (13)$$

$$\Delta_{1,i} = P_{d,i} - P_{d,h} \quad (14)$$

可以得到在双门限检测情形下, 检测概率 P_d , 漏警概率 P_m 和虚警概率 P_f 表示如下:

$$P_{d,i} = P(X_i > \lambda_{i,h} | H_1) = Q\left(\frac{\lambda_{i,h}}{\sigma_u^2} - \gamma_i - 1\right) \sqrt{\frac{N}{2\lambda_{i,h} + 1}} \quad (15)$$

$$P_{f,i} = P(X_i > \lambda_{i,h} | H_0) = Q\left(\frac{\lambda_{i,h}}{\sigma_u^2} - 1\right) \sqrt{N} \quad (16)$$

$$P_{m,i} = 1 - P_{d,i} - \Delta_{1,i} \quad (17)$$

假设有 K 个用户做出判决, 它们参与到硬融合过程, 有 $M-K$ 个用户检测能量在模糊区域, 它们参与到软融合过程中.

K 个次用户参与硬融合的判决过程是:

$$F_1 = \begin{cases} 1 & \sum_{i=1}^K Y_i \geq 1 \\ 0 & \sum_{i=1}^K Y_i = 0 \end{cases} \quad (18)$$

$M-K$ 个次用户的软融合过程, 为

$$F_2 = \begin{cases} 0 & 0 < \sum_{i=1}^{M-K} X_i < \lambda \\ 1 & \sum_{i=1}^{M-K} X_i > \lambda \end{cases} \quad (19)$$

最终的感知结果为:

$$F = \begin{cases} 0 & F_1 + F_2 = 0 \\ 1 & F_1 + F_2 \geq 1 \end{cases} \quad (20)$$

这里使用 Q_d , Q_f , Q_m 表示所有节点协作的检测概率, 虚警概率以及漏警概率, 表示如下^[7]:

$$Q_d = 1 - \left(\sum_{K=0}^{M-1} \binom{M}{K} \prod_{i=1}^K P_{m,i} \cdot \prod_{i=K+1}^M \Delta_{1,i} (1 - P_{d,M-K}) + \prod_{i=1}^M P_{m,i}\right) \quad (21)$$

$$Q_f = 1 - \prod_{i=1}^M (1 - \Delta_{0,i} - P_{f,i}) - \sum_{K=0}^{M-1} \binom{M}{K} \prod_{i=1}^K (1 - \Delta_{0,i} - P_{f,i}) \cdot \prod_{i=K+1}^M \Delta_{0,i} \cdot (1 - P_{f,M-K}) \quad (22)$$

3.3 基于信噪比的动态阈值

由前面的分析可知, 整体的感知性能与次用户的 SNR 有很大的关系. 为了充分利用次用户 SNR 之间的差异性来提高感知性能, 这里提出一种动态阈值的方法来利用这种差异性. 式(6)表明认知次用户的判决门限只与虚警概率相关. 因此, 动态调整门限阈值可以通过考虑动态调整虚警概率来实现. 一种利用用户信噪比信息来动态调整虚警概率的方法如下^[13]:

$$P_{f,i} = \left(1 + \frac{r_i - \bar{r}}{r}\right) P_{f,i} \quad (23)$$

其中, \bar{r} 表示所有次用户平均接收 SNR, 其他变量和前面定义一致. 此时, 每个次用户可以根据不同的 $P_{f,i}$ 计算得到不同的 λ , 则使用双门限感知方法时, 次用户双门限的值可以设定为:

$$\begin{aligned} \lambda_l &= c_1 \cdot \lambda \\ \lambda_h &= c_2 \cdot \lambda \end{aligned} \quad (24)$$

其中, c_1 和 c_2 是常数, 可以通过调整它们调整获得落入模糊区域的概率.

4 仿真

本文通过在 Matlab 8.4 中仿真来观察不同能量感知方法的接收机工作特性曲线(ROC). 仿真中, 采样点 $N=200$, 过滤后的次用户数目 $M=10$, 次用户的接收 SNR 服从均值为 -6dB, 方差为 0.5 的正态分布, 为了保证协作感知结果的准确性, 单用户的检测概率最小值 $P_{d,\min}$ 设为 0.8, 模糊区域设定为单门限左右的 10% 到 20%. 因此, c_1 和 c_2 先设为 0.9 和 1.1, 然后调整为 0.8 和 1.2. 本文仿真结果与文献[7]中提出的传统双门限和文献[2]中提到的单门限 OR 准则感知方法的性能进行比较. 三种算法的 ROC 比较结果如图 3 和图 4 所示.

从图 3 中可以看出, 在相同的仿真环境下, 本文的方法和传统的双门限感知方法的性能都比单门限协作的方法更好, 这是由于这两种方法中都有部分次用户参与到了软融合的过程中; 同时可以看出本文方法相比没有考虑次用户差异性的传统双门限检测方法的感知性能有一定程度的提高. 例如, 当 $Q_f=0.005$ 时, 文献[2]中检测概率为 0.985, 文献[7]检测概率为 0.993, 本文检测概率为 0.995. 这是由于各个次用户充分利用自身信噪比的差异设定不同的感知门限造成的, 不同信噪比的次用户可以根据自身信噪比的大小动态调整门限, 从而改进感知的性能.

图 4 与图 3 相比, 仿真环境和参数设定除了调整 c_1 和 c_2 外, 其他相同. 调整 c_1 和 c_2 , 使次用户感知能量落入模糊区域的概率增大, 这对单门限 OR 准则协作感知方法没有影响, 实验结果也证明了这一点. 本文的方法和文献[7]提到的传统的双门限感知方法的结果都有不同程度的提高, 这是因为落入模糊区域的感知结果的增大, 参与软融合的次用户数目也增多的原因.

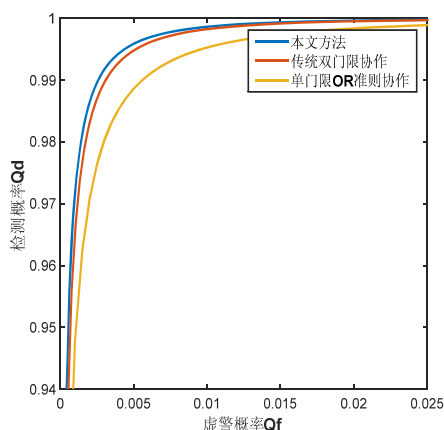


图 3 c_1 和 c_2 为 0.9 和 1.1 时, 三种算法的 ROC 比较

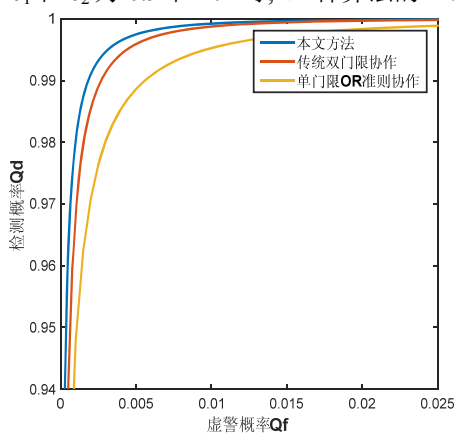


图 4 c_1 和 c_2 为 0.8 和 1.2 时, 三种算法 ROC 比较

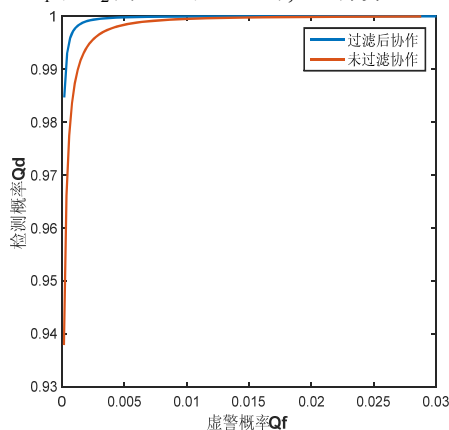


图 5 节点过滤性能比较

图 5 中, 讨论了过滤部分信噪比不满足要求的节点对整体性能的影响. 如果参与协作感知的节点不经过 SNR 的过滤, 由于个别节点的感知性能比较差, 在进行协作时, 会影响整体的感知结果. 由实验结果也可以看出, 没有过滤节点的话, 那些 SNR 比较低的节点对最终整个系统的感知性能有比较明显的不利影响, 这说明必要的节点过滤过程是有用的.

5 结语

本文提出了一种动态阈值的双门限能量检测算法, 在传统双门限能量检测算法的基础上, 添加了节点的过滤过程, 同时, 考虑到了感知次用户之间由于各种原因导致的 SNR 的差异性, 并利用这种差异性, 针对不同次用户设定不同的感知门限, 仿真的结果表明, 该方法在相同的通信环境下, 可以有效的提高整体的感知性能; 通过仿真比较节点过滤与不过滤过程的结果表明, 必要的节点过滤过程对提高感知性能有一定的贡献.

参考文献

- 1 Mitola J, Maguire GQ. Cognitive radio: making software radios more personal. *IEEE Personal Communications*, 1999, 6(4): 13–18.
- 2 Akyildiz IF, Lo BF, Balakrishnan R. Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks: A survey. *Physical Communication*, 2011, 4(1): 40–62.
- 3 Lu L, Zhou XW, Onunkwo U, et al. Ten years of research in spectrum sensing and sharing in cognitive radio. *EURASIP J. on Wireless Communications and Networking*, 2012: 28.
- 4 Mishra SM, Sahai A, Brodersen RW. Cooperative sensing among cognitive radios. *ICC, IEEE*, 2006.
- 5 Digham FF, Alouini MS, Simon MK. On the energy Detection of unknown signals over fading channels. *IEEE Trans. on Communications*, 2007, 55(1): 21–24.
- 6 Urkowitz H. Energy detection of unknown deterministic signals. *Proc. of the IEEE*, 1967, 55(4): 523–531.
- 7 朱江, 黄本雄, 王芙蓉, 等. 认知无线网络中的一种新型协作频谱感知方法. *小型微型计算机系统*, 2010, 31(2): 193–197.
- 8 Sun CH, Zhang W, Ben LK. Cooperative spectrum sensing for cognitive radios under bandwidth constraints. *WCNC, IEEE*, 2007.
- 9 吕守涛, 刘健, 陈红宇. 基于双门限和证据理论的合作频谱感知算法. *计算机工程与应用*, 2014, 50(12): 211–215.
- 10 周浩, 高远, 朱昌平. 基于双门限能量检测的选择式协作频谱感知. *计算机仿真*, 2014, 31(1): 199–203.
- 11 Peh E, Liang YC. Optimization for Cooperative Sensing in Cognitive Radio Networks. *WCNC, IEEE*, 2007.
- 12 丁汉青. 认知无线电频谱感知技术研究[博士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
- 13 郭加贝, 章坚武. 一种基于信噪比的动态门限协作感知方法. *计算机工程*, 2012, 38(3): 91–92, 96.