

一种认知无线电的联合频谱检测算法

叶中付, 贾红江, 胡南, 李春辉

(中国科学技术大学 电子信息工程系, 安徽 合肥 230027)

摘要: 为了改善信噪比不同的认知无线电(cognitive radio)用户的联合频谱检测性能,提出了一种基于能量检测的两个用户合作频谱检测算法。在联合虚警概率一定的条件下,根据接收信号能量对各个用户的判决门限进行调整,增大高信噪比用户对联合检测的影响,同时减小低信噪比用户的影响,来提高联合检测概率;判决结果只占用少量比特的信息,减少了通信开销。实验结果表明,所提算法很好地逼近了搜索解,提高了联合检测性能。

关键词: 认知无线电; 联合频谱检测; 能量检测; 融合规则

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

A collaborative spectrum sensing method for cognitive radio

YE Zhong Fu, JIA Hong Jiang, HU Nan, LI Chun Hui

(Department of Electronic Engineering and Information Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: In order to improve the performance of collaborative spectrum sensing in cognitive radios, we propose a spectrum sensing method based on energy detection. With a constant joint probability of false alarm, cognitive radio users change their threshold according to SNRs to increase the high-SNR users' contributions to the performance of collaborative spectrum sensing and constrain the bad effects caused by low-SNR users. The judgment results can be transmitted with one bit which can decrease the communication costs. The simulation results illustrate that proposed method has a good performance approximating to the searching one.

Key words: cognitive radio; collaborative spectrum sensing; energy detection; fusion rule

随着无线通信的发展,人们对频谱的需求越来越大。然而 FCC(Federal Communication Commission)的实际测试表明,已分配的频谱的利用率只有 15%~85%,这说明现在的频谱匮乏在一定程度上是由频谱的利用率过低造成的。因此让未授权用户来利用这些没有使用的频段可以减轻频谱需求压力。为了提高频谱利用率,FCC 已经共享了 5 GHz 的频段,并考虑是否允许未授权用户使用电视广播频段的“频谱空洞”(Spectrum Hole),同时 WRAN 工作组(Wireless Region Area Network Group)提出了认知无线电技术来提高动态频谱接入的利用率^[1]。

认知用户可以使用没有被占用的频段,而当授权用户重新接入时,认知用户又必须能迅速让出该频段,改接到其他没有被使用的频段。因此,频谱检测技术是认知无线电中的关键技术。认知用户时刻对频段进行检测,以保证不会对授权用户造成干扰。在实际情况中,单个用户的检测性能常常因为信道的衰落、阴影等因素而降低,因此有人提出了认知用户联合检测的算法^[2],通过不同位置用户间的合作提高整体检测性能。这种算

法假定每个用户的平均信噪比都相同,而实际中由于信道衰落和干扰等其他因素的影响,这一条件是不可能满足的。为了更好地改善联合检测性能,研究人员提出了新的算法:参考文献[3]提出了一种两个用户合作的检测算法;参考文献[4]提出了多用户加权合作算法。然而这两种算法都属于软判决机制,需要用户之间传递所有的观测信息,增加了通信系统开销。

本文提出了一种两个认知用户合作的频谱检测算法,在联合虚警概率恒定的条件下,用户根据信噪比调整各自的判决门限,减少了用户间平均信噪比的不同对检测结果的影响,提高了联合检测概率。同时用户之间只需传递各自的判决结果,降低了通信开销。

1 信号建模

认知无线电的频谱检测可以归结为下面二元假设检验问题:

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

其中,假设 H_0 表示认知用户可以使用该频段, H_1 表示

认知用户不能使用该频段, $x(t)$ 为认知用户接收到的信号, $n(t)$ 为均值为 0、方差为 σ_n^2 的高斯白噪声, $s(t)$ 为授权用户的发射机发射信号, h 为信道增益, 同时假设信道相干时间远大于频谱检测时间, 因此在每次的检测过程中 h 是恒定的。

信号的先验知识未知, 每个认知用户都采用能量检测算法。 N 表示采样数, 用户的观测量表示为: $Y = \sum_{i=0}^{N-1} |x(i)|^2$,

则在 H_0 假设下, 检验统计量 $\frac{Y}{\sigma_n^2}$ 服从自由度为 N 的卡方分布; 在 H_1 假设下, 检验统计量服从自由度为 N 、非中心参量为 $N\gamma$ 的非中心卡方分布^[5], 即:

$$\frac{Y}{\sigma_n^2} : \begin{cases} \chi_N^2(N\gamma) & H_1 \\ \chi_N^2 & H_0 \end{cases} \quad (2)$$

其中 $\gamma = \frac{1}{N\sigma_n^2} \sum_{i=0}^{N-1} |h|^2 |s(t)|^2$, 表示认知用户接收信号的信噪比。当采样数 N 较大时^[5], 根据中心极限定理, 观测量 Y 近似为高斯分布, 即有:

$$Y : \begin{cases} N((N+N\gamma)\sigma_n^2, 2(N+2N\gamma)\sigma_n^4) & H_1 \\ N(N\sigma_n^2, 2N\sigma_n^4) & H_0 \end{cases} \quad (3)$$

假设门限为 λ , 则检测概率和虚警概率为:

$$P_d = \Pr(Y > \lambda | H_1) = Q\left(\frac{\lambda - N\sigma_n^2(1+\gamma)}{\sigma_n^2 \sqrt{2N(1+2\gamma)}}\right) \quad (4)$$

$$P_{fa} = \Pr(Y > \lambda | H_0) = Q\left(\frac{\lambda - N\sigma_n^2}{\sigma_n^2 \sqrt{2N}}\right) \quad (5)$$

其中 $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$ 。

假设 M 个认知用户联合进行频谱检测, 每个用户相互独立。当认知用户采用软判决方式合作时, 每个用户向融合节点传递的是各自的观测量 $Y_i (i=1, 2, \dots, M)$, 融合中心根据所有的观测量做出判决; 当采用硬判决时, 每个认知用户先分别对授权用户是否出现做出判决, 然后向中心点发送 1bit 的判决信息(1 为有授权用户, 0 为没有授权用户), 融合节点根据这些判决信息作最终的判决。在“或”融合规则下可得联合检测概率和联合虚警概率为^[3]:

$$Q_d = 1 - (1 - P_d)^M \quad (6)$$

$$Q_{fa} = 1 - (1 - P_{fa})^M \quad (7)$$

2 算法分析

在二元假设检验中, 检测概率 P_d 和虚警概率 P_{fa} 是相互制约的。在同一次判决中, 降低虚警概率的同时, 检测概率也会随之降低。虚警概率一定时每个用户的判决门限与用户的信噪比无关, 但是用户的检测概率会随着信噪比增大而升高, 如图 1 所示。联合检测算法^[2]是假设所有用户的平均信噪比都相同, 因此假定所有用户的判决门限初始值相同是合理的, 但实际上由于衰落等因素的影响使得用户的信噪比不相等, 若认知用户的判决

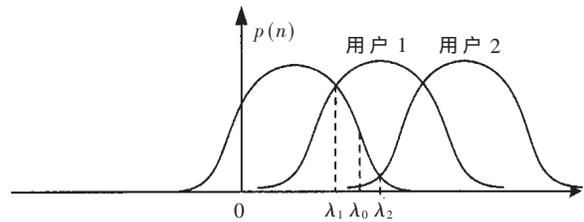


图 1 同门限下检测概率与信噪比的关系

门限仍保持相等, 则使得联合检测的性能不理想。因此在保证联合虚警概率一定的条件下, 需要对每个用户的判决门限进行调整, 增大高信噪比用户对联合检测的影响, 同时减少低信噪比用户的影响, 以达到提高联合检测概率的目的。

增大高信噪比用户对联合检测的影响, 可以通过增加用户的检测概率来实现。假设第 i 个认知用户调整后的虚警概率为 $P_{fa_i} (i=1, 2, \dots, M)$, 对各自的判决结果用“或”规则进行融合, 可以得到多用户的联合虚警概率为:

$$Q_{fa} = 1 - \prod_{i=1}^M (1 - P_{fa_i}) \quad (8)$$

每个用户的检测概率 P_{di} 将由虚警概率 P_{fa_i} 确定, 由此对于每个用户不同的虚警概率将确定不同的检测概率 P_{di} , 最后联合检测概率可以表示为:

$$Q_d = 1 - \prod_{i=1}^M (1 - P_{di}) \quad (9)$$

若把每个用户的虚警概率看成是一组需要确定的未知参数, 这样就构成了一个求最优的问题, 其形式如(10)式所示:

$$\begin{aligned} \max_{P_{fa_i}} \quad & Q_d = 1 - \prod_{i=1}^M (1 - P_{di}) \\ \text{subject to} \quad & Q_{fa} = 1 - \prod_{i=1}^M (1 - P_{fa_i}) \end{aligned} \quad (10)$$

这个求最优的问题很难直接求解, 甚至会出现无解的情况。通过对变量 P_{fa_i} 进行多维搜索可以找到(10)式的最优解, 但这种方法的计算量非常大, 特别是对合作用户比较多的情况, 计算量随合作用户数指数增加, 这在实时性要求很高的认知无线电频谱检测中是不可行的, 因此需要改进算法以减少计算量。本文针对两个用户的情况给出了改进算法, 该算法的基本思想是在保证联合虚警概率一定的条件下, 依据信噪比对每个用户的判决门限做出适当的调整, 从而提高联合检测的性能, 如图 2 所示, $x_1(t)$ 、 $x_2(t)$ 分别是两个认知用户接收到的信号。虽然这种算法并不是问题的最优解, 但算法的计算量较搜索算法大大降低, 可以应用于实时的认知无线电频谱检测。

在“K_OUT_N”系列融合规则中, “或”规则的融合结果是最好的^[6]。这种情况下两个认知用户的联合检测概

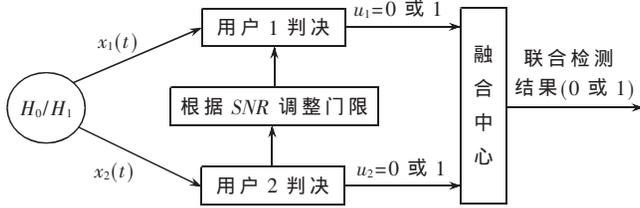


图2 两用户合作检测基本原理图示

率和联合虚警概率表示为：

$$Q_d = 1 - \prod_{i=1}^2 (1 - P_{d_i}) \quad (11)$$

$$Q_{fa} = 1 - \prod_{i=1}^2 (1 - P_{fa_i}) \quad (12)$$

需要解决的问题是：如何在联合虚警概率 Q_{fa} 不变的条件下，调整两个用户的判决门限，使得联合检测概率 Q_d 增大。

假设每个用户的虚警概率都相同的条件下，通过(12)式可以得到认知用户的虚警概率为：

$$P_{fa} = 1 - (1 - Q_{fa})^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

在给定虚警概率的条件下，判决门限与用户接收到的信号的信噪比无关，由(5)式求出判决门限为：

$$\lambda_0 = N\sigma_n^2 + 2\sigma_n^2\sqrt{N} Q^{-1}(P_{fa}) \quad (14)$$

认知用户的判决门限的调整与信噪比有关，要增大高信噪比用户的检测概率，就需要降低判决门限，相应地增加虚警概率。根据(13)式，设定用户的虚警概率的调整范围为 $0 < P_{fa} < Q_{fa}$ （这样可以保证用户调整后虚警概率有意义）。按照下式调整高信噪比用户的虚警概率（为方便，不妨令用户1的信噪比大于用户2的信噪比）：

$$P_{fa1} = P_{fa} + \Delta_1 = P_{fa} + \alpha(Q_{fa} - P_{fa}) \quad (15)$$

其中 α 为调整因子，用来调整虚警概率的变化大小， Δ_1 表示虚警概率的调整量。整个过程必须保持总的虚警概率不变，因此改变用户1的虚警概率的同时，用户2的虚警概率也会发生改变。设用户2虚警概率的调整量为 Δ_2 ，则有：

$$P_{fa2} = P_{fa} + \Delta_2 \quad (16)$$

由式(12)联合虚警概率表示为：

$$Q_{fa}' = 1 - (1 - P_{fa1})(1 - P_{fa2}) \quad (17)$$

将(15)式、(16)式代入(17)式可得：

$$Q_{fa}' = 1 - (1 - P_{fa} - \Delta_1)(1 - P_{fa} - \Delta_2) = 1 - (1 - P_{fa})^2 + (1 - P_{fa})\Delta_1 - (1 - P_{fa})\Delta_2 - \Delta_1\Delta_2 \quad (18)$$

当 $\Delta_1 = -\Delta_2$ 时，联合虚警概率误差为：

$$\Delta Q_{fa} = \Delta_1^2 = [\alpha(Q_{fa} - P_{fa})]^2 \quad (19)$$

在实际的环境中，认知用户能正常工作时的虚警概率总是取一个很小的值，即(19)式中的误差非常小以至可以忽略。因此用户2调整后的虚警概率近似为：

$$P_{fa2} \approx P_{fa} - \alpha(Q_{fa} - P_{fa}) \quad (20)$$

通过上面的分析，已经得到了每个认知用户的虚警

概率，利用(14)式，可以分别确定认知用户的判决门限：

$$\lambda_1 = N\sigma_n^2 + 2\sigma_n^2\sqrt{N} Q^{-1}(P_{fa1}) \quad (21)$$

$$\lambda_2 = N\sigma_n^2 + 2\sigma_n^2\sqrt{N} Q^{-1}(P_{fa2}) \quad (22)$$

进一步根据前面的分析，由(4)式，可以求出在(21)式与(22)式的判决门限下两个认知用户的检测概率：

$$P_{d1} = Q\left(\frac{\lambda_1 - N\sigma_n^2(1 + \gamma_1)}{\sigma_n^2\sqrt{2N(1 + 2\gamma_1)}}\right) \quad (23)$$

$$P_{d2} = Q\left(\frac{\lambda_2 - N\sigma_n^2(1 + \gamma_2)}{\sigma_n^2\sqrt{2N(1 + 2\gamma_2)}}\right) \quad (24)$$

γ_1, γ_2 分别为两个用户的信噪比，最后，联合检测概率由(11)式确定。

再来讨论调整因子 α 的确定，如果按照最优化理论求解调整因子，这又会变成类似于(10)式求解问题。由上面的分析可知，门限的调整与两个用户的信噪比有关，并且信噪比相差的越大对应的调整因子越大，所以 α 是信噪比 γ_1, γ_2 的函数。这样设定调整因子对噪声方差变化的情况也具有一定的适应性。同时要保证门限的调整有意义，必须限定 $0 \leq \alpha < 1$ 。根据对调整因子的限定，可以用下式来近似 α ：

$$\alpha = \frac{\gamma_1}{\gamma_1 + \gamma_2} \quad (25)$$

这里限定 $\gamma_1 \geq \gamma_2$ ，这样 α 的取值范围变为 $0.5 \leq \alpha < 1$ 。虽然它并不是最优的调整因子，但是从算法的基本思想上对它进行了限制和近似。

以上分析是在联合虚警概率不变的情况下，通过对信噪比不同的用户设置不同的门限来提高联合检测概率。这里只限于两个用户的情况，这对各个用户的虚警概率之间有一种简单的近似线性关系，因此虚警概率的变化比较简单。

3 实验仿真

本节通过不同条件下的虚警概率和检测概率曲线 (ROC Curve) 来说明所提算法对检测性能的提高。设信号采样数为 $N=25$ （如参考文献[5]所提，实际情况中，当采样数 $N \geq 10$ 时，满足中心极限定理的条件），授权用户发射的信号为确定信号，噪声为均值为0、方差为 $\sigma_n^2=1$ 的高斯白噪声。虚警概率的调整因子由(25)式确定。文中所提算法与参考文献[2]中假设相同判决门限条件下的联合检测作比较。独立进行200次实验。

实验1：设用户的信噪比分别为 $\gamma_1 = -15$ dB、 $\gamma_2 = -5$ dB，采用“或”融合规则。在认知用户的判决门限相同条件下，先独立求出认知用户的发现概率，然后进行融合判决，这种方法记为算法1；假设两个用户信噪比均取 $\bar{\gamma} = (\gamma_1 + \gamma_2)/2$ ，应用参考文献[3]中的算法求得联合检测概率，该方法记为算法2；通过对 P_{fa_i} 多维搜索进行求解的算法记为搜索算法。本文所提算法与上述算法进行比较，检测概率与虚警概率曲线如图3所示，由图中可知，所提算法较算法1的检测性能有提高，在低虚警概率条

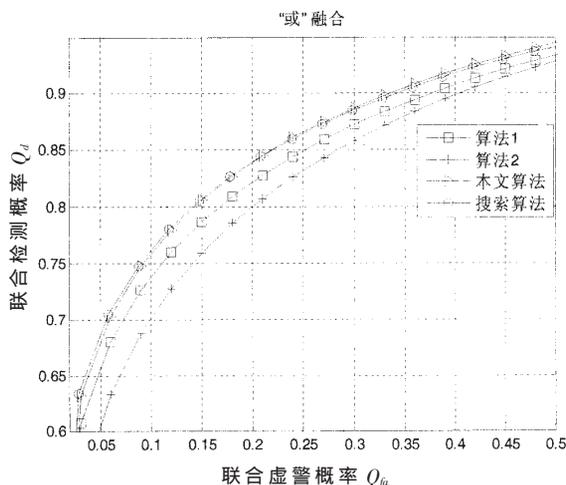


图3 “或”规则下几种算法的比较(ROC曲线)

件下,检测概率已经达到很高的值。在联合虚警概率 $Q_{fa}=0.1$ 时,联合检测概率 $Q_d \approx 0.76$,并且所提算法与搜索算法很接近,试验结果与文中分析所得结果一致。图3在虚警概率较大时,发生了文中所提算法比搜索算法的检测概率高、与理论相悖的情况,其原因是:先前用线性关系对用户的虚警概率近似时存在误差,使得实际的虚警概率变高,检测概率变大。不过由于实际工作时虚警概率很小,故虚警误差很小,不会出现这种情况。

实验2:考虑信噪比对检测结果的影响,在联合虚警概率 $Q_{fa}=0.1$ 的情况下。假设用户1的信噪比 $\gamma_1=-15$ dB 固定,而用户2的信噪比 γ_2 从 -10 dB 变化到 4 dB 时,三种算法的联合检测概率的变化曲线如图4所示。由图可知,检测概率随着用户2的信噪比的增加而提高,本文算法性能优于算法1和算法2。

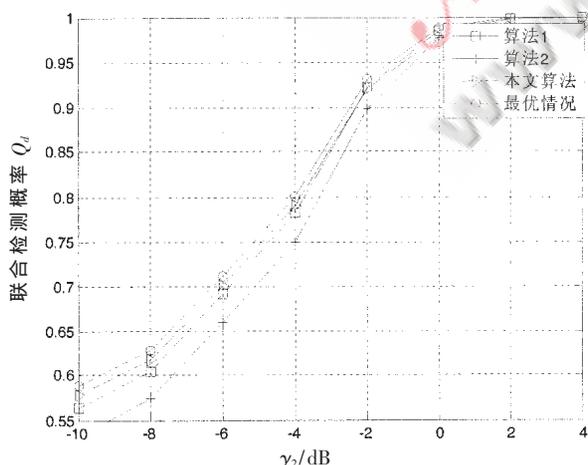


图4 联合检测概率随用户2信噪比变化曲线

实验3:在实验1的条件下,说明用(15)式和(20)式来近似用户调整后的虚警概率与实际的虚警概率产生的误差。图5给出了这个误差随着联合虚警概率 Q_{fa} 的变化而变化的曲线。由图可知,在联合虚警概率小于

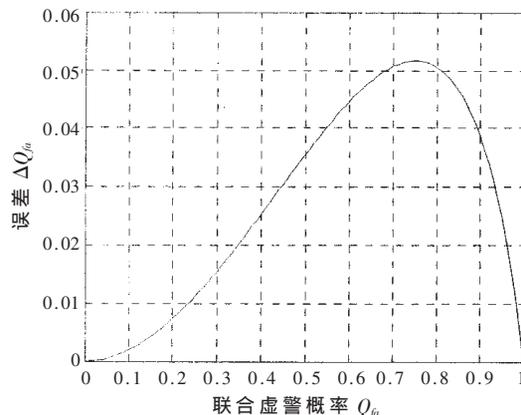


图5 联合虚警概率误差随虚警概率变化曲线

0.2 时(实际中虚警概率总是限制为很小的值),近似误差不到 0.007。同时,在实验1和实验3中,本文算法与搜索算法得到的检测概率很接近,结果表明用(15)式和(20)式来近似用户的虚警概率是合理的。

本文详细分析了一种两个认知用户的合作谱检测算法,在保证联合虚警概率一定的条件下,通过对各个用户的判决门限进行调整,达到增大高信噪比用户对最终判决的影响和减小低信噪比用户的影响的目的,并与其他算法进行比较。实验结果表明所提算法有效地提高了联合检测的性能,与理论分析一致。所提算法给出的虚警概率的调整已经很接近搜索得到的最优解。

参考文献

- [1] HAYKIN S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications[J]. IEEE JSAC, 2005,23(2):201-220.
- [2] GHASEMI A, SOUSA E S. Collaborative spectrum sensing for opportunistic access in fading environments[J]. In Proc. IEEE Int. Symp. on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005:131-136.
- [3] GANESAN G, LI Y. Cooperative spectrum sensing in cognitive radio, Part I: two user networks[J]. IEEE Trans. Commun, 2007,6(6):2204-2213.
- [4] MA J, LI Y. Soft combination and detection for cooperative spectrum sensing in cognitive radio[J]. Networks Global Telecommunications Conference, 2007:3139-3143.
- [5] QUAN Zhi, CUI Shu Guang, SAYED A H. Optimal linear cooperation for spectrum sensing in cognitive radio networks[J]. IEEE J. Select. Areas Commun, 2008,2(1): 28-40.
- [6] GHASEMI A, SOUSA E S. Sousa. Spectrum sensing in cognitive radio networks: the Cooperation-processing trade-off[J]. Wirel. Commun. Mob. Comput. 2007,7(9):1049-1060.

(收稿日期:2008-10-28)