

认知无线网络中频谱感知性能分析

丁汉清^{1,2} 杨家玮¹ 赵志远¹

(西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室信息科学研究所 西安 710071)¹

(郑州轻工业学院计算机与通信工程学院 郑州 450002)²

摘要 分析了认知无线网络中使用能量检测器进行频谱检测的性能。仿真结果表明,衰落会使认知无线电用户检测性能下降,采用硬合并协作方案的合作频谱检测可以提高认知无线电系统的检测概率,但认知无线电系统的虚警概率也会随着参与协作的用户数的增多而上升,特别是控制信道不理想时,协作检测会导致虚警概率下限的出现,造成频谱利用率达不到预期的目标。

关键词 认知无线电,频谱空穴,频谱感知

中图分类号 TN911.23 **文献标识码** A

Performance Analysis of Spectrum Sensing in Cognitive Radio Network

DING Han-qing^{1,2} YANG Jia-wei¹ ZHAO Zhi-yuan¹

(The State Key Lab. of ISN, Information Science Institute, Xidian University, Xi'an 710071, China)¹

(School of Computer and Communication Engineering, Zhengzhou Institute of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)²

Abstract We analyzed the performance of spectrum sensing with energy detector in cognitive radio network. The results of simulation indicate that fading decreases the detection performance of an individual cognitive radio user, and hard combination cooperative spectrum sensing can improve the cognitive radio system's detection probability, but the cognitive radio system's false alarm probability increases as the number of cooperative users increasing. Especially, when control channels are not reliable, low bound of false alarm probability will appear and result in decrease of spectrum utilization.

Keywords Cognitive radio, Spectrum hole, Spectrum sensing

1 引言

传统的无线网络采用固定频谱分配政策,频谱通过政府机构调节并分配给特定的运营商和服务供应商,其中只有少部分频谱使用效率较高。以美国为例,根据美国联邦通信委员会的研究报告^[1],频谱使用率随时间、地区和频带的不同而不同,其范围在 15%~85%之间。此外,工业、科学及医药频段也开始推行开放式频谱利用策略,带来了多种重要的新兴技术与技术革新。然而,由于多种异构网络之间的干扰,使得该频段的频谱效率也不是太高。

为了解决频谱利用率低下的问题,近年来,被业界称为认知无线电(cognitive radio,简称 CR)的新频谱使用模式正逐渐受到人们的关注。认知无线电技术的基本思想是:在不对拥有频谱的授权用户或非授权用户产生有害干扰的前提下,认知无线电用户通过择机的方式接入授权用户频段或非授权频段,以提高频谱利用率^[2,3]。

要实现动态频谱接入,首先要解决的问题就是如何检测频谱空穴,以辨识当前可用于传输数据的信道,即频谱感知技

术。衰落和阴影效应会使频谱感知的性能下降。此时,各认知无线电用户有必要进行信息共享,以提高频谱检测的可靠性,称为合作频谱感知^[4]。

本文首先论述了认知无线网络中,瑞利衰落信道下,单个认知无线电用户使用能量检测器的检测性能。在此基础上,分别分析了控制信道无误码和存在误码的情况下采用硬合并协作方案的合作频谱检测性能。

2 单用户检测性能

单用户感知有众多的检测算法,这些算法大多基于匹配滤波、能量检测和周期平稳特征检测^[4]。由于这些算法本身的局限性,如何在检测性能和算法复杂度之间取得较好的折中,是单用户感知算法努力解决的问题。如果认知无线电用户无法获得主用户信号足够的信息,能量检测就是最佳的频谱感知手段。

2.1 能量检测器模型

能量检测器通过检测接收信号能量来判断一定频率范围内有无主信号,其实现框图如图 1 所示^[5]。

收稿日期:2009-04-20 返修日期:2009-07-02 本文受国家重点实验室专项基金(ISN02080001),国家重点基础研究发展计划(973计划)课题(2009CB320404)资助。

丁汉清(1970-),男,博士生,副教授,主要研究方向为移动通信、认知无线电,E-mail:ding_hanqing@163.com;杨家玮(1946-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为无线通信;赵志远(1977-),男,博士生,主要研究方向为无线通信。

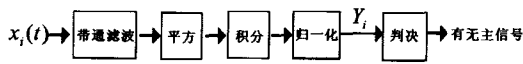


图1 能量检测器实现框图

将接收到的信号 $x_i(t)$ 通过一个中心频率为 f_c 、带宽为 W 的带通滤波器后,再进行平方,并在观察时间间隔 T 内进行积分,将积分值归一化后的输出 Y_i 作为统计量与门限 λ 进行比较,判为 H_0 (信道空闲) 或 H_1 (信道被首要用户占用),即

$$\begin{cases} H_1, & Y_i \geq \lambda \\ H_0, & Y_i < \lambda \end{cases} \quad (1)$$

2.2 能量检测法的性能分析

在加性高斯白噪声 (AWGN) 信道下,统计量 Y_i 在两种假设下的分布为^[5]

$$Y_i \sim \begin{cases} \chi_{2u}^2, & H_0 \\ \chi_{2u}^2(2\gamma), & H_1 \end{cases} \quad (2)$$

当信道空闲时, Y_i 服从自由度为 $2u$ 的中心 χ^2 分布;当信道被占用时, Y_i 服从自由度为 $2u$ 的非中心 χ^2 分布,非中心参数为 2γ , $\gamma = \frac{E_s}{N_0}$ 为接收信号能量与噪声单边带功率谱密度之比,即 $E_s = \int_0^T x_i^2(t) dt$, $u = TW$ 为时间带宽的乘积。

统计量 Y_i 的概率密度分布函数^[6] 可表示为

$$f_{Y_i}(y) = \begin{cases} \frac{1}{2^u \Gamma(u)} y^{u-1} e^{-\frac{y}{2}}, & H_0 \\ \frac{1}{2} \left(\frac{y}{2\gamma}\right)^{\frac{u-1}{2}} e^{-\frac{2\gamma+y}{2}} I_{u-1}(\sqrt{2\gamma y}), & H_1 \end{cases} \quad (3)$$

其中, $\Gamma(\cdot)$ 是 Gamma 函数, $I_{u-1}(\cdot)$ 是第一类 $u-1$ 阶 Bessel 函数。

当能量检测器用于无衰落环境中,信道增益在检测时间间隔内保持恒定,则相应的虚警概率 $P_{f,i}$ 、检测概率 $P_{d,i}$ 和漏检概率 $P_{m,i}$ 分别为^[6]

$$P_{f,i} = P(Y_i > \lambda | H_0) = \frac{\Gamma(u, \frac{\lambda}{2})}{\Gamma(u)} \quad (4)$$

$$P_{d,i} = P(Y_i > \lambda | H_1) = Q_u(\sqrt{2\gamma}, \sqrt{\lambda}) \quad (5)$$

$$P_{m,i} = P(Y_i < \lambda | H_1) = 1 - P_{d,i} \quad (6)$$

其中, $\Gamma(\cdot, \cdot)$ 是非完全 Gamma 函数, $Q_u(\cdot, \cdot)$ 是广义 Marcum Q 函数。

考虑有阴影和多径衰落的情况。由式(4)可知, $P_{f,i}$ 与 γ 无关, $P_{f,i}$ 表达式不变,而 $P_{d,i}$ 则会随信噪比 γ 而变化。如果信号幅度服从瑞利分布,则信噪比服从指数概率分布,表示如下

$$f(\gamma) = \frac{1}{\bar{\gamma}} \exp\left(-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}\right), \gamma \geq 0 \quad (7)$$

其中, $\bar{\gamma}$ 为信道平均信噪比。

此时,单个认知无线电用户平均检测概率 $\bar{P}_{d,i,Ray}$ 为^[7]

$$\begin{aligned} \bar{P}_{d,i,Ray} &= \int_0^{\infty} Q_u(\sqrt{2\gamma}, \sqrt{\lambda}) f(\gamma) d\gamma \\ &= e^{-\frac{\lambda}{2}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda}{2}\right)^n + \left(\frac{1+\bar{\gamma}}{\bar{\gamma}}\right)^{u-1} \times \left[e^{-\frac{\lambda}{2(1+\bar{\gamma})}} - e^{-\frac{\lambda}{2}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda \bar{\gamma}}{2(1+\bar{\gamma})}\right)^n \right] \end{aligned} \quad (8)$$

单个认知无线电用户平均漏检概率 $\bar{P}_{m,i,Ray}$ 为

$$\bar{P}_{m,i,Ray} = 1 - \bar{P}_{d,i,Ray} \quad (9)$$

图2给出了瑞利衰落信道下平均信噪比为 10dB 和 15dB

时的虚警概率和漏检概率关系曲线,加性高斯白噪声情况作为参考(信噪比取 15dB)。从图中可以看出,在相同的虚警概率下,瑞利衰落导致能量检测器的漏检概率大大增加,即检测性能大幅度降低。例如,从图2中可以看出,为使平均漏检概率小于 0.01,虚警概率要大于 0.9,检测概率要小于 0.1,这会导致频谱利用率大幅下降。因此,在衰落信道下,有必要采取合作频谱检测来提高检测性能。

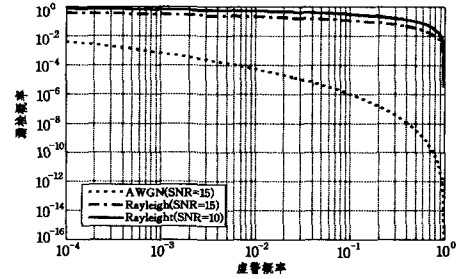


图2 瑞利衰落信道下虚警概率-漏检概率曲线

3 合作频谱检测的性能

3.1 协作方案

为了使各认知无线电用户的检测结果传输到中心控制器所需的开销最小化,每一个参与协作的认知无线用户的判决结果均为一个比特 d_i 。 d_i 为 1,代表主用户是活动的(信道被主用户占用); d_i 为 0,代表主用户是静默的(信道没有被主用户占用)。本地判决结果通过控制信道发送到中心控制器,中心控制器对所有的本地判决结果做逻辑“或”运算,得到最终的判决结果,并通过控制信道反馈给各认知无线电用户。这种判决方式称为硬判决。假设有 n 个认知无线电用户向中心控制器发送判决结果,则认知无线电系统的合作频谱检测结果 d_c 为

$$d_c = \bigcup_{i=1}^n d_i \quad (10)$$

3.2 控制信道无误码时的检测性能

为了简化问题,假设控制信道是完美的,即认知无线电用户本地判决结果通过控制信道传输到中心控制器时不存在误码。根据 3.1 节描述的协作方案,可计算出合作频谱检测的虚警概率 Q_f 为

$$Q_f = P(H_1/H_0) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_{f,i}) \quad (11)$$

相应地,合作频谱检测的漏检概率 Q_m 为

$$Q_m = P(H_0/H_1) = \prod_{i=1}^n \bar{P}_{m,i,Ray} \quad (12)$$

假设 n 个认知无线电用户接收的信号经历的衰落独立同分布,并且平均信噪比相等,它们均使用能量检测器并且使用相同的判决门限,这时参与协作的认知用户本地检测虚警概率 $P_{f,i}$ 和平均漏检概率 $\bar{P}_{m,i,Ray}$ 都相等,分别用 P_f 和 \bar{P}_m 表示,则合作频谱感知的虚警概率和漏检概率分别为

$$Q_f = 1 - (1 - P_f)^n \quad (13)$$

$$Q_m = (\bar{P}_m)^n \quad (14)$$

图3给出了认知无线电用户的本地感知信道为瑞利衰落信道,传送本地检测结果到中心控制器的控制信道无误码,参与合作的认知无线电用户数 n 分别为 1, 2, 5 和 10 时合作频谱检测的虚警概率与漏检概率的关系曲线。其中时间带宽积 u 为 5, 认知无线电用户接收平均信噪比 $\bar{\gamma}$ 为 10dB。

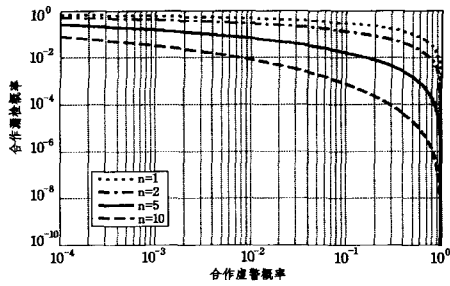


图3 控制信道无码时的合作虚警概率-漏检概率曲线

从图3中可以看出,随着 n 的增加,同一虚警概率下漏检概率明显降低,这说明通过合作检测,能在虚警概率不变的情况下增加检测概率,从而提高整个认知无线电系统的检测性能。不过,从式(13)可以看出,在本地虚警概率 P_f 相同的情况下,当 n 增加时, Q_f 也随之增加。

3.3 控制信道存在误码时的检测性能

实际上,在很多情况下,与感知信道类似,控制信道也会经历阴影和衰落。认知无线电用户的本地检测结果通过控制信道传送到中心控制器时会出现误码,控制中心收到的各认知用户的频谱检测结果的可靠性得不到保证,合作频谱感知的性能将受到一定的影响。因此,有必要分析控制信道存在误码时合作频谱检测的性能。

假设 $P_{e,i}$ 为第 i 个认知无线电用户通过控制信道向控制中心发送本地判决结果出错的概率。那么,根据3.1节描述的合作方案,可推导出合作频谱检测的虚警概率和漏检概率的表达式分别为

$$Q_f = 1 - \prod_{i=1}^n [(1 - P_{f,i})(1 - P_{e,i}) + P_{f,i}P_{e,i}] \quad (15)$$

$$Q_m = \prod_{i=1}^n [\bar{P}_{m,i}(1 - P_{e,i}) + (1 - \bar{P}_{m,i})P_{e,i}] \quad (16)$$

假设 n 个认知无线电用户接收信号经历的衰落独立同分布,并且接收平均信噪比相等,则各认知无线电用户单用户检测的虚警概率和平均漏检概率都相等,分别用 P_f 和 \bar{P}_m 表示。这时,本地检测结果通过控制信道传输到中心控制器时出错的平均概率 P_e 也相同,用 P_e 表示,那么有

$$Q_f = 1 - [(1 - P_f)(1 - P_e) + P_f P_e]^n \quad (17)$$

$$Q_m = [\bar{P}_m(1 - P_e) + (1 - \bar{P}_m)P_e]^n \quad (18)$$

进一步,可以推出 Q_f 的下限^[8]为

$$\bar{Q}_f = \lim_{\lambda \rightarrow 0} Q_f = 1 - (1 - P_e)^n \quad (19)$$

图4给出了感知信道采用瑞利衰落模型,各认知无线电用户接收平均信噪比为10dB,控制信道平均误码率 P_e 为0.001, n 分别为1,2,5和10时合作频谱感知的合作虚警概率和漏检概率的关系曲线。

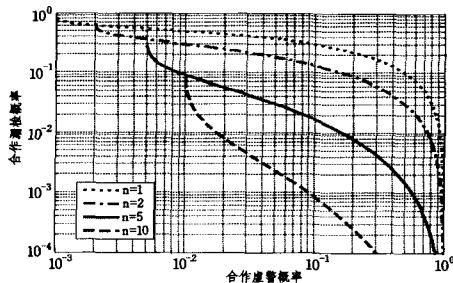


图4 控制信道有码时的合作虚警概率-漏检概率曲线

从图4可以看出,对于相同的合作虚警概率,参与协作的认知用户数越多,合作漏检概率就越小;每条曲线会出现一个近似垂直的突变,突变处横坐标对应式(19)中合作虚警概率的下限。如果要求认知无线电系统的虚警概率比合作虚警概率的下限小,采用3.1节描述的方案不能满足认知无线电系统性能要求,这时必须采用其它方案。文献[8]中采用基于分簇的协作频谱检测方案,可使合作频谱检测的虚警概率下限尽可能小。

结束语 认知无线网络中,衰落和阴影效应会降低单个认知无线电用户的感知性能,为避免对主用户的干扰,应采用合作频谱检测方法。本文以采用能量检测器为基础,探讨了认知无线网络中分析频谱感知性能的基本方法。为了使各认知无线电用户的本地检测结果传输到中心控制器所需的开销最小化,可采用硬合并的协作方案。分析表明,控制信道存在误码时,硬合并的协作方案会导致虚警概率下限的出现。而且参与协作的认知无线电用户数越多,虚警概率下限越大,这样会使认知无线电系统的频谱利用率达不到性能要求。

在设计认知无线电系统时,会遇到很多复杂的情况。为了满足感知可靠性和频谱使用效率等方面的性能,应视具体情况采取不同的合作方案。进行不同条件下的性能分析,是采用何种合作方案的重要依据,也是我们下一步要解决的关键问题之一。

参考文献

- [1] Spectrum policy task force report[R]. Technical Report 02-135. Federal Communications Commission, Nov. 2002
- [2] Mitola J. Cognitive Radio: An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio[R]. Stockholm, Sweden: Royal Institute of Technology (KTH), 2000
- [3] Hsykin S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(2): 201-220
- [4] Cabric D, Mishra S M, Brodersen R W. Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios[C]//Conference Record of the Thirty-Eighth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, vol. 1, Nov. 2004: 772-776
- [5] Urkowitz H. Energy Detection of Unknown Deterministic Signals[J]. Proceedings of the IEEE, 1967, 55(4)
- [6] Digham F F, Alouini M S, Simon M K. On the energy detection of unknown signals over fading channels[J]. Proc. of IEEE International Conference on Communications (ICC'03), 2003, 5(4): 3575-3579
- [7] Ghasemi A, Sousa E S. Collaborative Spectrum Sensing for Opportunistic Access in Fading Environments[C]//Proc. of 2005 First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, Nov. 2005: 131-136
- [8] Sun Chunhua, Zhang Wei, Letaief K B. Cluster-based Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radio Systems[C]//IEEE International Conference on Communications (ICC'07), 2007: 2511-2515